

Les principes de la modélisation du climat.

Frédéric Hourdin, physicien du climat
Laboratoire de Météorologie Dynamique, Institut Pierre Simon Laplace
hourdin@lmd.jussieu.fr

I. Contexte et principes de la modélisation du climat

- Modélisation numérique
- Problématique du changement climatique
- Les principes de la modélisation du climat

II. Les modèles de circulation générale

- Les équations primitives
- Les 'paramétrisations' : principe et illustrations

III. Utilisation climatique des modèles

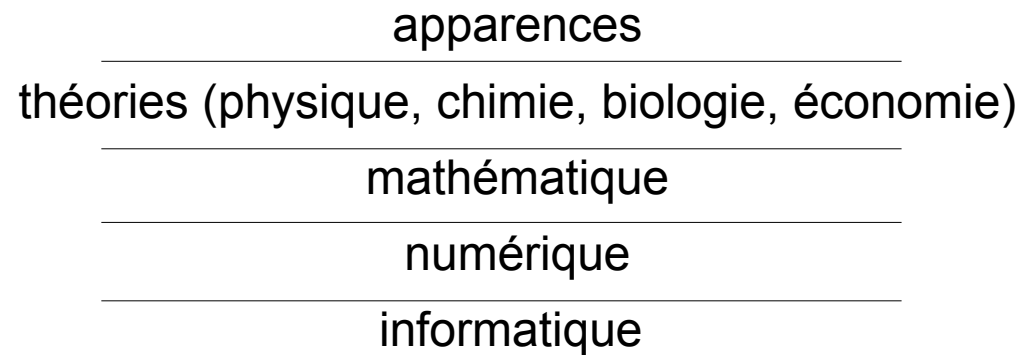
Prévision météorologique / modélisation du climat

IV. Modélisation du système climatique

- Découpage en sous systèmes
- Advection/Diffusion

I. Contexte et principes

Le monde des modèles numériques



Les mathématiques constituent un langage commun.

La modélisation concerne l'ensemble de ces couches.

Il faut toujours essayer de mettre en évidence les liens avec les couches supérieures.

Il faut en même temps être capable de bien séparer ces différentes couches (savoir dans laquelle on se trouve).

I. Contexte et principes

Des modèles numériques pour :

Intégrer des équations dont on ne connaît pas de solution analytique

Appréhender le système dans sa complexité (dynamique, physique, chimique ...)

Prévoir (météorologie, pollution, climat, tsunamis, ...)

Comprendre

Des modèles développés

→ au fil du temps (dizaines d'années)

→ par des équipes (5-10 équipes de 5-20 personnes) autour d'un même modèle de climat.

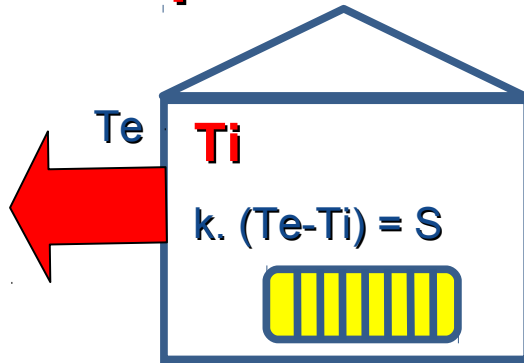
→ Avec un aller retour constant entre développement et évaluation.

Un contexte particulier :

le changement climatique.

I. Contexte et principes

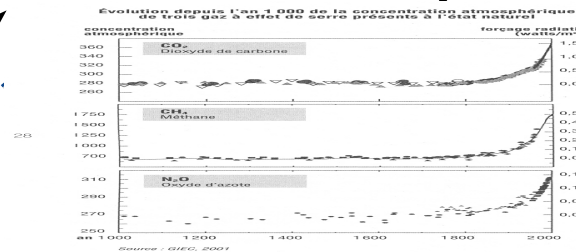
Température moyenne T_s à la surface de la terre



Analogie avec une maison :
chauffage $\Leftrightarrow$ soleil
isolation $\Leftrightarrow$ atmosphère

Effet de serre :

- + 30°C : 2/3 H₂O (vapeur) et 1/3 CO₂
- CO₂, CH₄ $\Rightarrow$ T_s

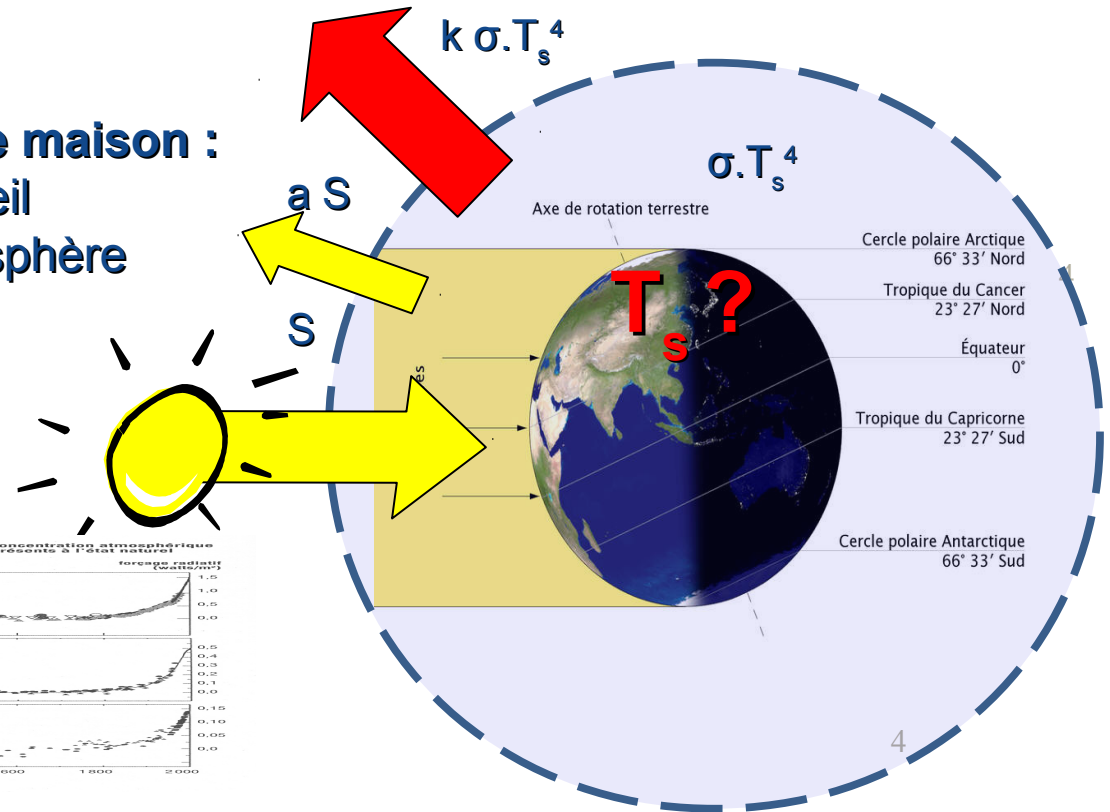


Rétroactions :

- Albédo neige/glace : amplification
- Vapeur d'eau : amplification
- Nuages : ?

Système complexe :

- Simulations numériques sur base de scénario d'évolution du CO₂
- Groupe Intergouvernemental d'Experts sur l'Evolution du Climat (GIEC)



I. Contexte et principes

Une problématique particulière :

- prédire une évolution du climat unique à partir de la connaissance du climat actuel.
- système complexe, dont on ne connaît pas a priori les éléments déterminants pour la sensibilité
- système sensible aux conditions initiales (chaos, attracteurs étranges, etc ...)

Différentes approches en termes de modélisation :

- Modèles simples pour explorer un mécanisme ou processus particulier (modèle de Lorentz qui a mis en évidence la nature chaotique de la circulation atmosphérique, modèles 1D d'équilibre radiatifs, etc ...)
- **Modélisation tri-dimensionnelle réaliste.**

➤ **Modélisation 3D (celle dont on va parler ici) : Modèles de circulation générale**

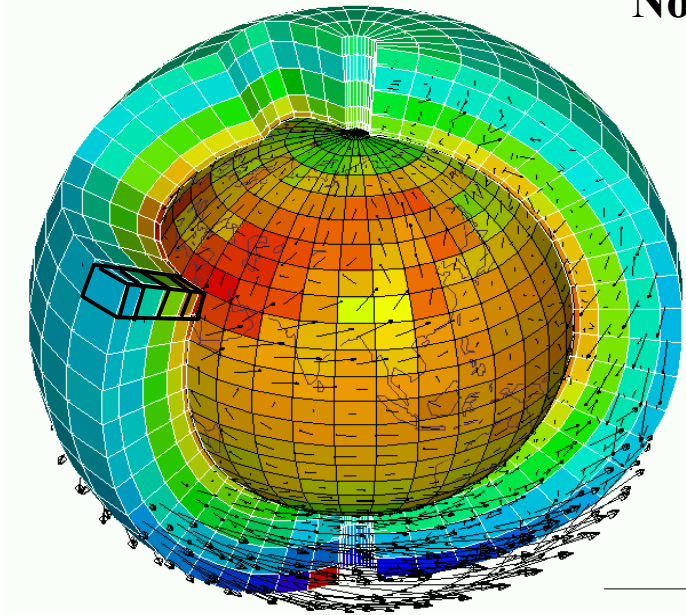
- De type encyclopédique
- Tentative d'exhaustivité
- Recherche du "réalisme"
- Construits à partir de principes physiques

Philosophie générale

- Définie par Charney en 1950 : travailler avec des modèles incomplets et imparfaits et les améliorer pas à pas.

II. Modèles de circulation générale

Noyau dynamique : équations de bases discrétisées sur la sphère



- Conservation de la masse
 $D\rho/Dt + \rho \operatorname{div}\underline{U} = 0$
- Conservation de la température potentielle
 $D\theta/Dt = Q / C_p (p_0/p)^\kappa$
- Conservation de la quantité de mouvement
 $D\underline{U}/Dt + (1/\rho) \operatorname{grad}p - \underline{g} + 2 \underline{\Omega} \wedge \underline{U} = \underline{F}$
- Conservation des composants secondaires
 $Dq/Dt = Sq$

Version simplifiée : Equations primitives de la météorologie

→ Approximation de couche mince

→ Approximation hydrostatique

Equations mathématiques continues

Représentation dans un ordinateur : dimension finie

Deux méthodes :

→ Points de grille : Différences finies, volumes finis, éléments finis

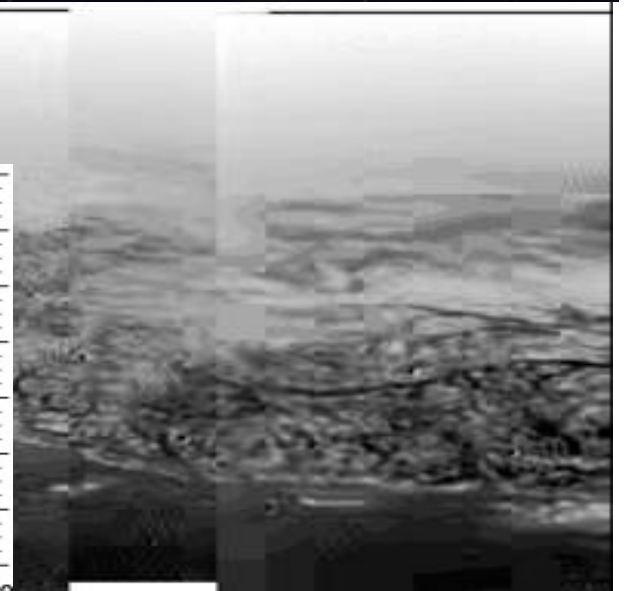
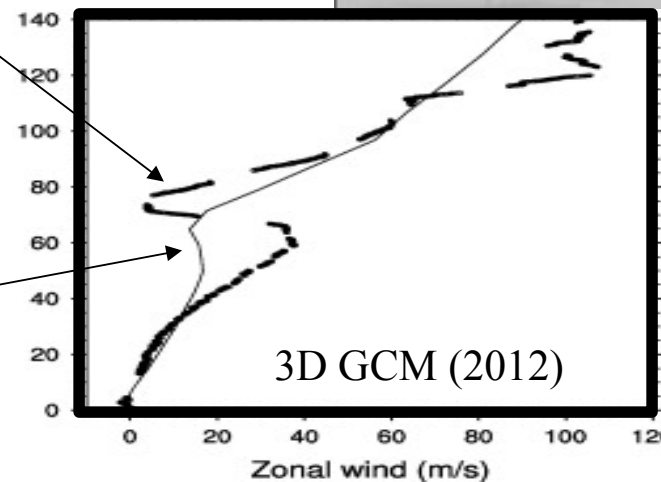
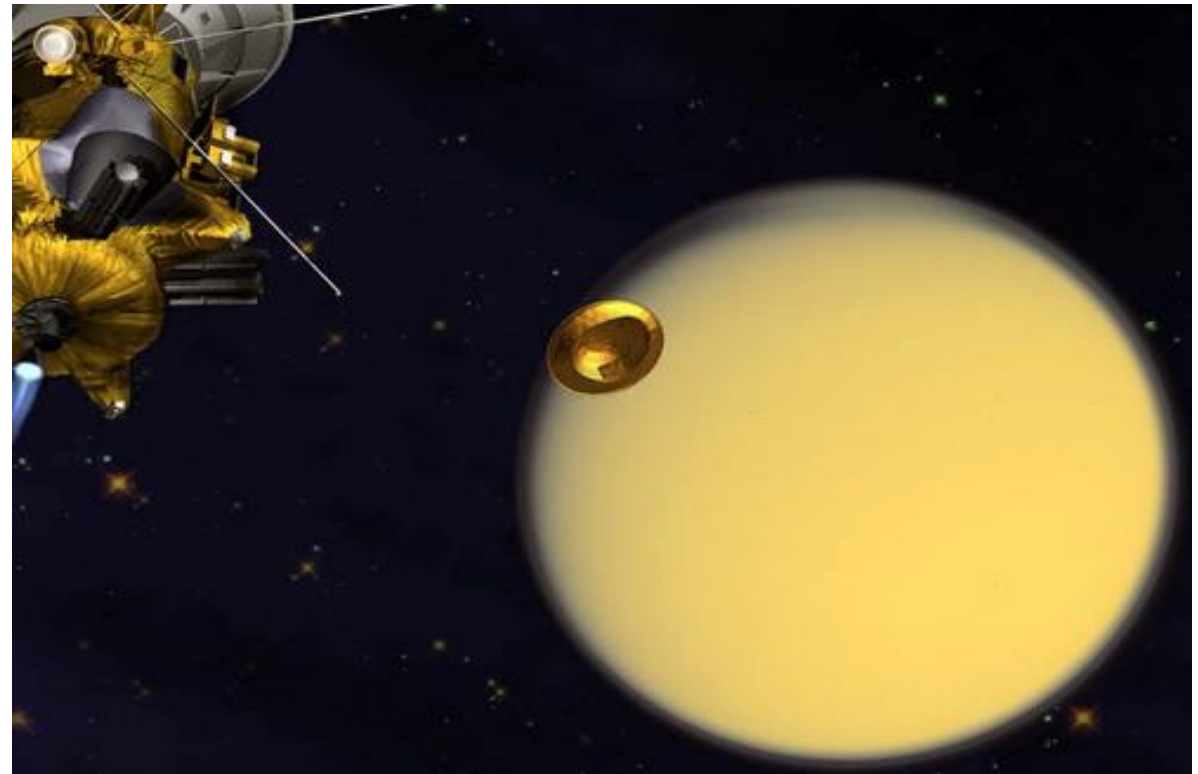
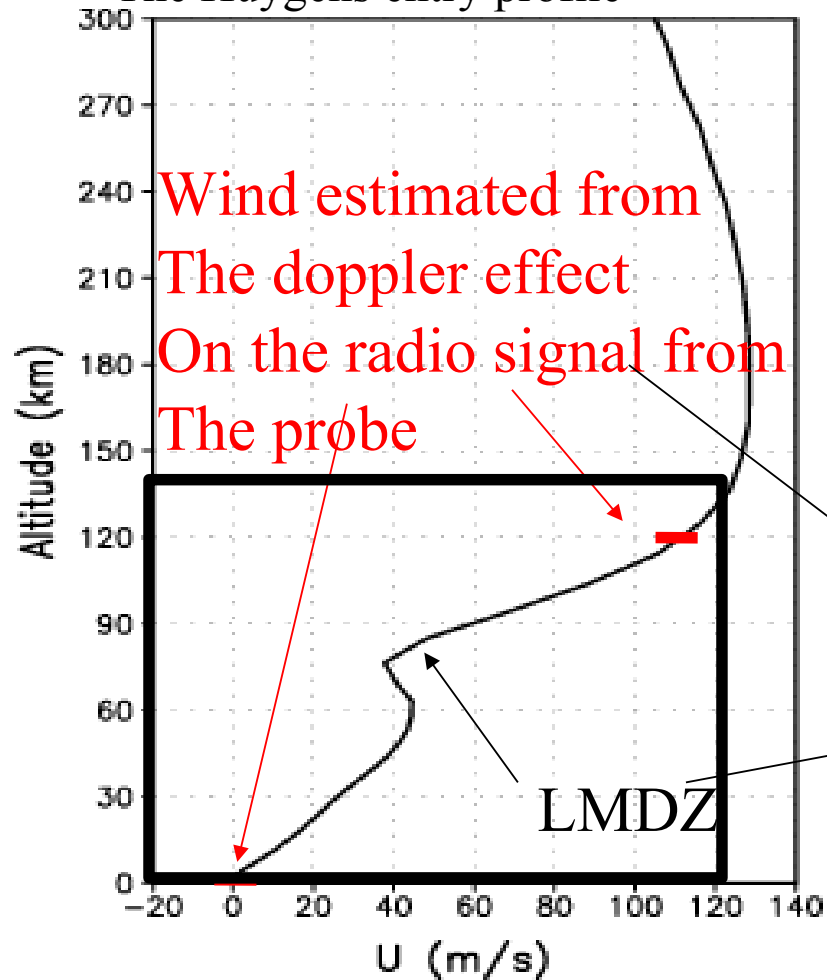
→ Méthodes spectrales (harmoniques sphériques)

Développés dans les années 60 pour la prévision et le climat

Utilisés sur la terre mais aussi sur d'autres planètes (Mars, Vénus, Titan ...)

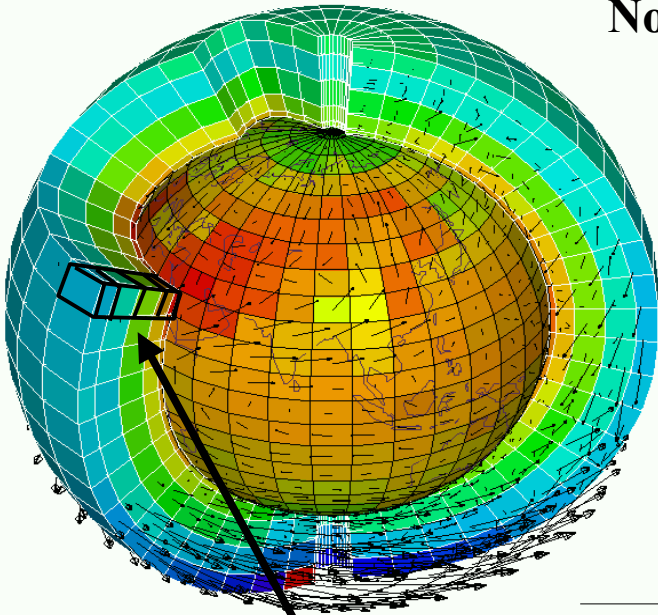
Prediction of Titan atmospheric
Super-rotation with the
LMDZ Titan GCM
(1995, 2005)

An a posteriri comparison with
The Huygens entry profile

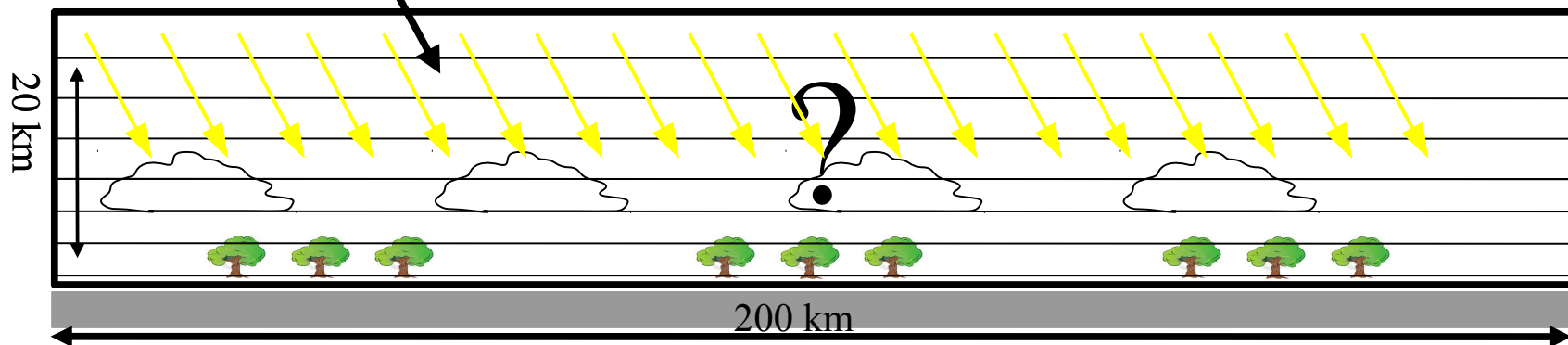


II. Modèles de circulation générale

Noyau dynamique : équations de bases discrétisées sur la sphère



- Conservation de la masse
$$D\rho/Dt + \rho \operatorname{div}\underline{U} = 0$$
- Conservation de la température potentielle
$$D\theta/Dt = Q / C_p (p_0/p)^\kappa$$
- Conservation de la quantité de mouvement
$$D\underline{U}/Dt + (1/\rho) \operatorname{grad} p - \underline{g} + 2 \underline{\Omega} \wedge \underline{U} = \underline{E}$$
- Conservation des composants secondaires
$$Dq/Dt = Sq$$



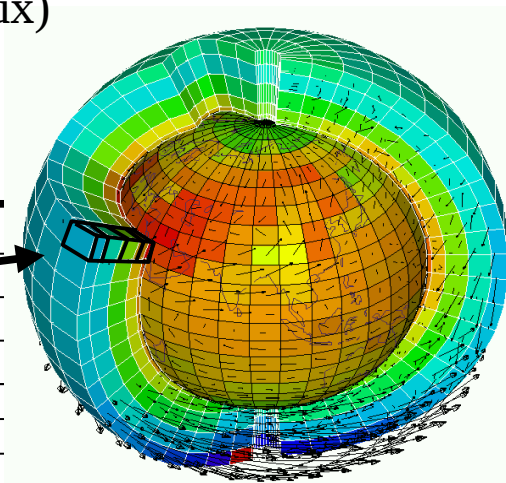
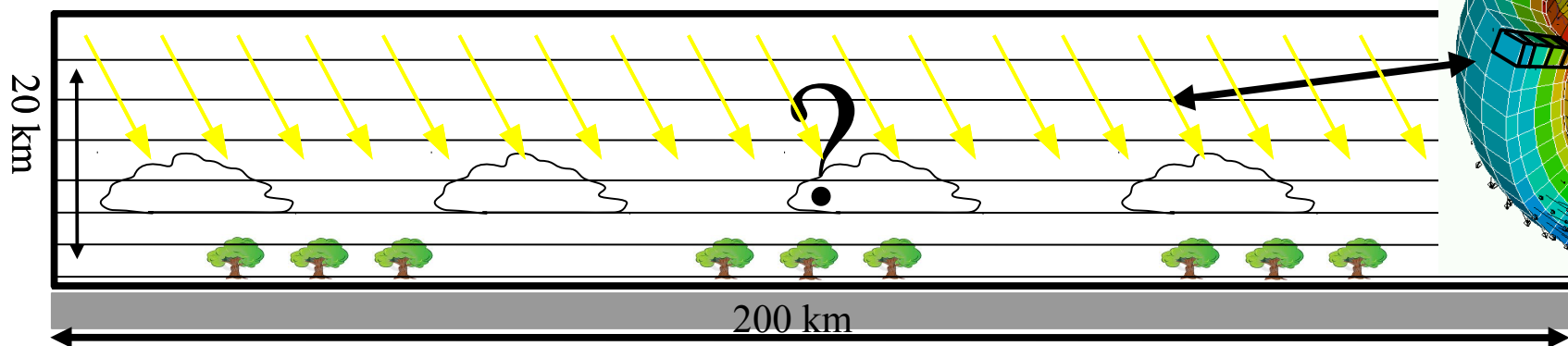
II. Modèles de circulation générale

Paramétrisations : principes



- Calcul de l'effet **collectif** des processus **non résolus** sur les variables d'état **explicites** ($\underline{U}$, θ , q) du modèle global
- **description physique approchée** du comportement collectif des processus
- qui fait intervenir des **variables internes aux paramétrisations** (caractéristiques des nuages, écart-type de la distribution sous-maille d'une variable, ...)
- dérivation d'**équations** reliant ces variables internes aux variables d'état
 $\underline{U}$, θ , q à l'instant $t \rightarrow$ **variables internes** $\rightarrow E, Q, Sq \rightarrow \underline{U}$, θ , q à $t + \delta t$
- **hypothèses d'homogénéité** (statistique) horizontale des processus représentés (comme dans l'hypothèse plan parallèle du transfert radiatif)
 - $\rightarrow$ Equations uni-dimensionnelles en z (échanges verticaux)
 - $\rightarrow$ Colonnes atmosphériques indépendantes

Dans une colonne du modèle ...

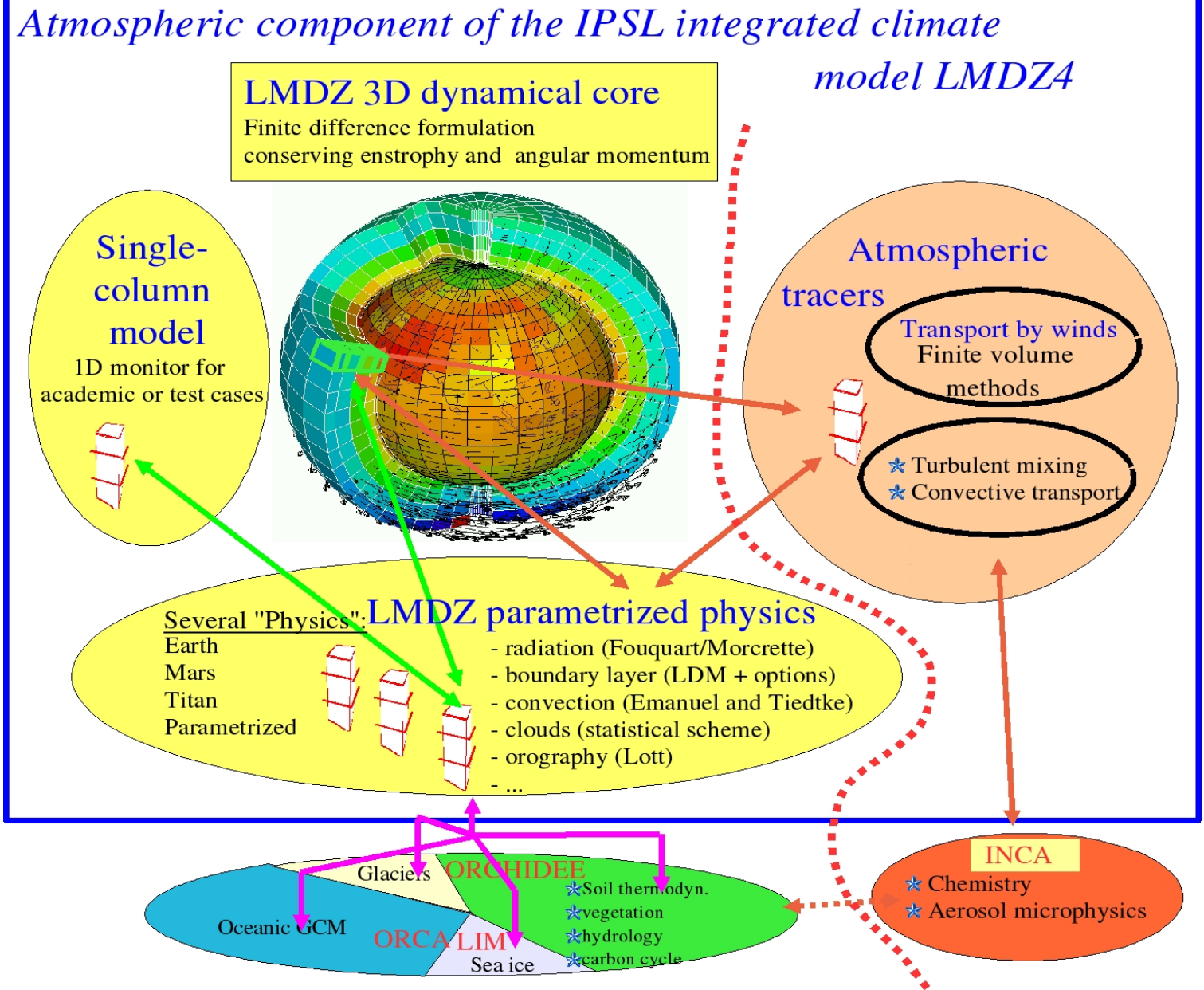




The Earth

Mars

Titan



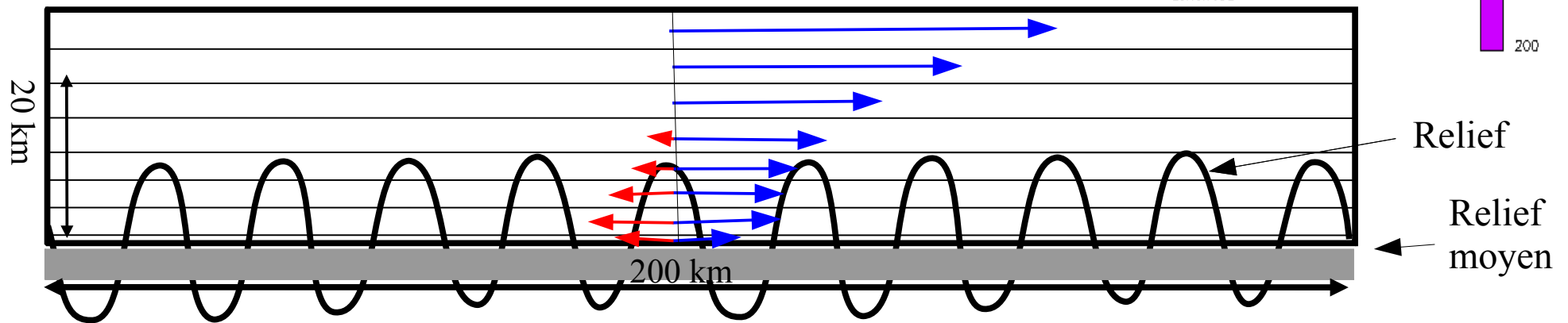
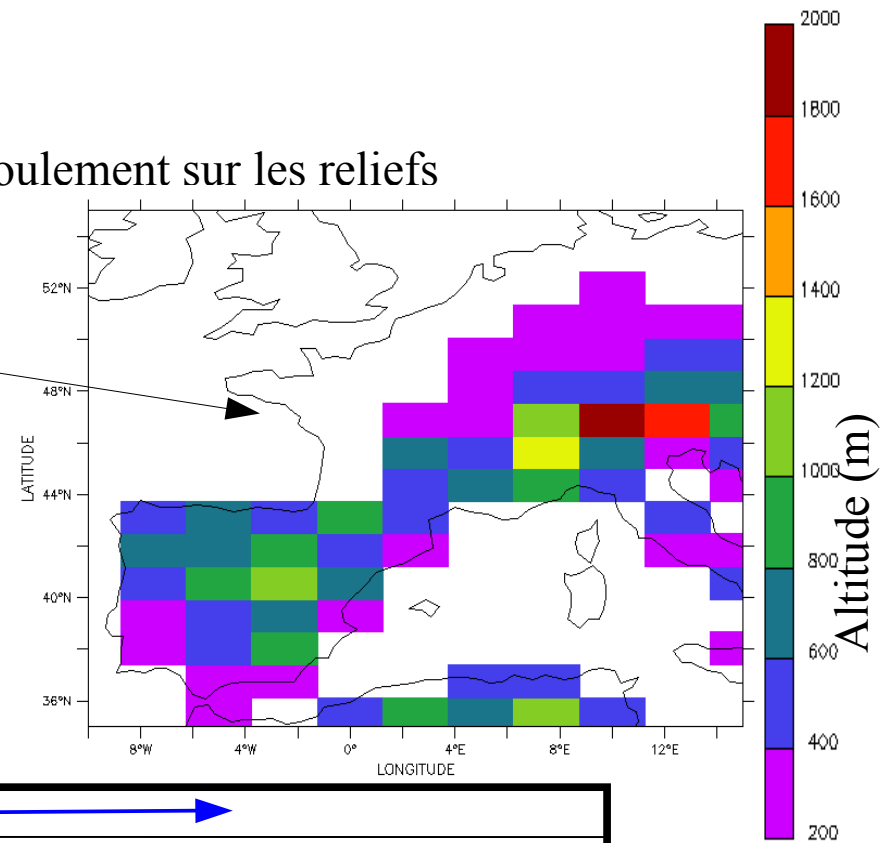
II. Modèles de circulation générale

Un exemple de processus sous-maille : l'écoulement sur les reliefs

- Le **relief moyen de la surface** intervient dans le noyau dynamique comme une condition à la limite inférieure
- Ce relief moyen ne rend pas compte de la barrière que représentent les montagnes les plus hautes pour l'écoulement
- Exemple simple de paramétrisation possible : introduction d'un terme de freinage dans les basses couches de l'atmosphère.

$$\frac{D\mathbf{U}}{Dt} + \frac{1}{\rho} \text{grad} p - \mathbf{g} + 2 \mathbf{\Omega} \wedge \mathbf{U} = \mathbf{F}$$

$$\mathbf{F} = -\mathbf{a}(z) \mathbf{U}$$

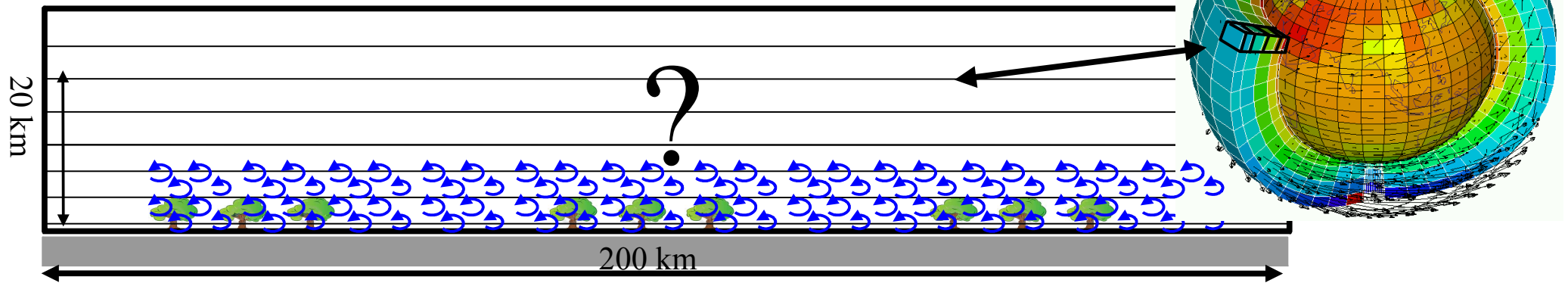


Dans les modèles actuels, on rend compte en plus de :

- l'injection d'ondes (de gravité) dans l'atmosphère
- l'effet de détournement (portance) du relief
- l'effet de la stabilité de l'atmosphère (franchissement plus facile dans une atmosphère moins stratifiée)

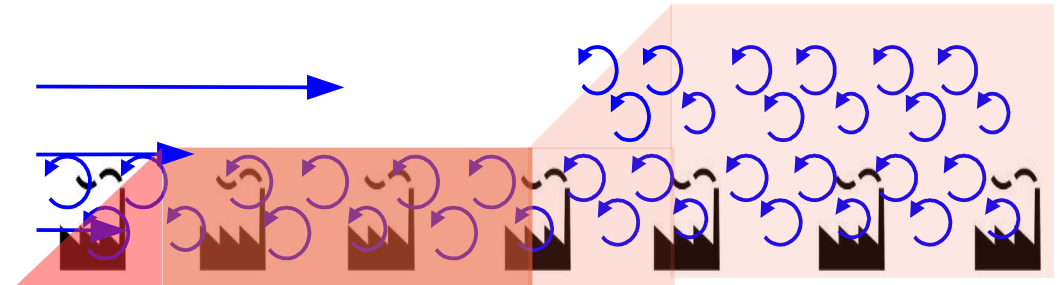
II. Modèles de circulation générale

Dans une colonne du modèle ...



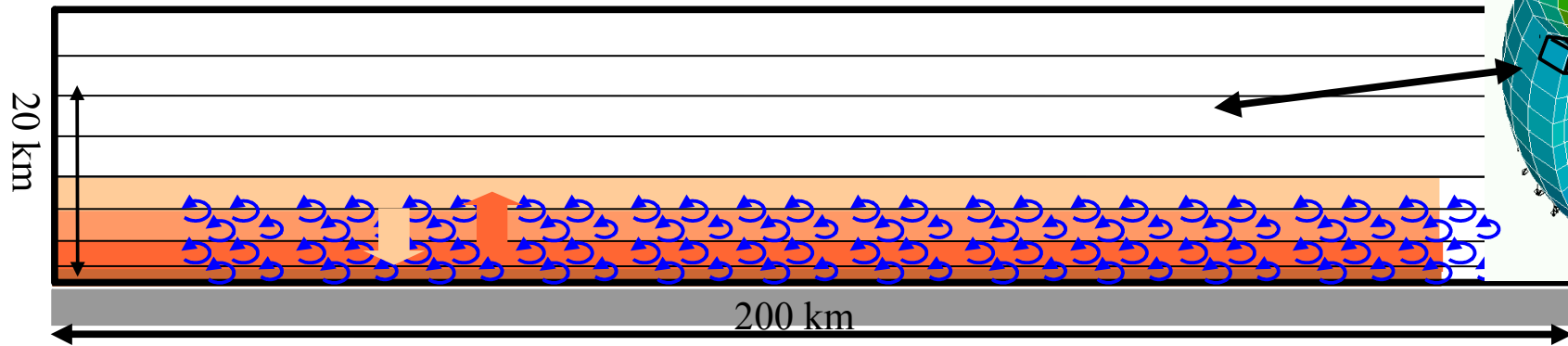
la turbulence

- Mouvements aléatoires de petite échelle (bourrasques)
- Importants près de la surface (1-3 km) dans la « couche limite » atmosphérique (turbulence au décollage en avion).
Source : frottement sur les obstacles + chauffage surface
- Responsables du mélange vertical des composants
- Peu de turbulence (atmosphère « stable »)
→ pollution forte en surface.



II. Modèles de circulation générale

Dans une colonne du modèle ...



Paramétrisation de la turbulence



→ « **Mélange turbulent** » ou diffusion turbulente.
Transport par des petits mouvements aléatoires.
Analogie à la diffusion moléculaire.

$$Dq/Dt = Sq \quad \text{avec} \quad Sq = \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial q}{\partial z} \right)$$

→ Longueur de mélange de Prandtl : $K_z = l |w|$
 l : longueur caractéristique des mouvements
 w : vitesse caractéristique

→ Energie cinétique turbulente : $K_z = l \sqrt{e}$

$$De/Dt = f(dU/dz, d\theta/dz, e, \dots)$$

$$Dl/dt = \dots$$

Les mêmes modèles sont utilisés en sciences de l'ingénieur
Lois de similitudes → Tests à des échelles différentes en laboratoire

Un monde en soi ...

II. Modèles de circulation générale

Représentation des nuages

q : concentration en vapeur d'eau

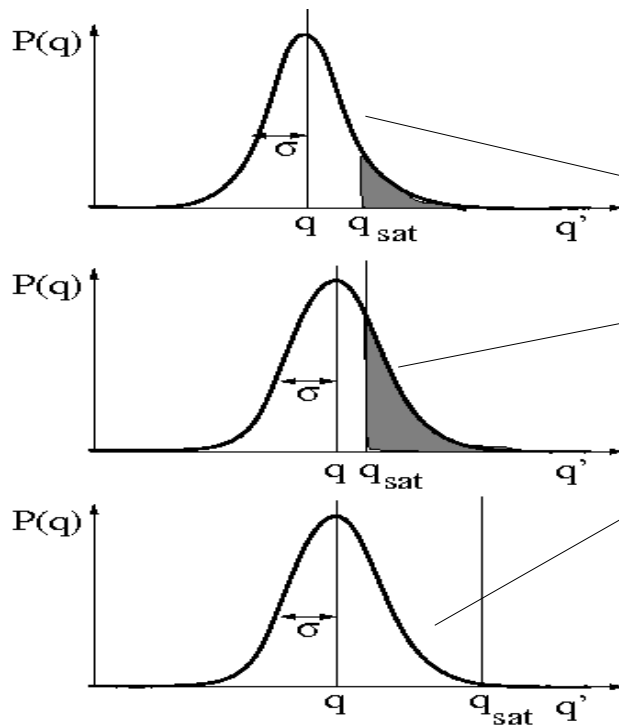
q_{sat} : concentration maximum à saturation

Si $q > q_{\text{sat}}$:

→ la vapeur d'eau condense = nuage

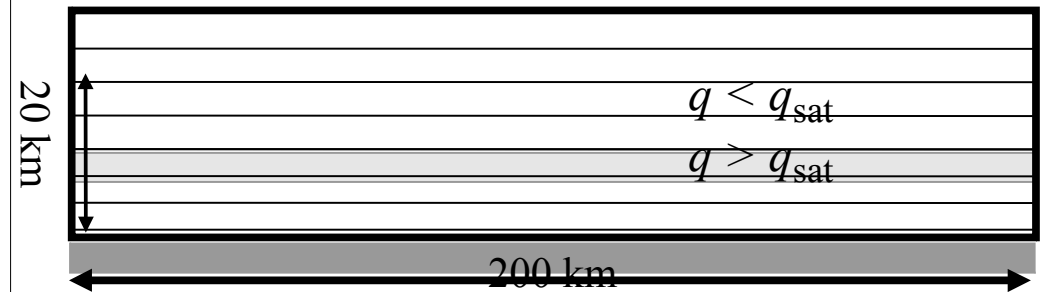
On connaît q et q_{sat} à l'échelle de la maille

→ Fraction de la maille couverte de nuages ?



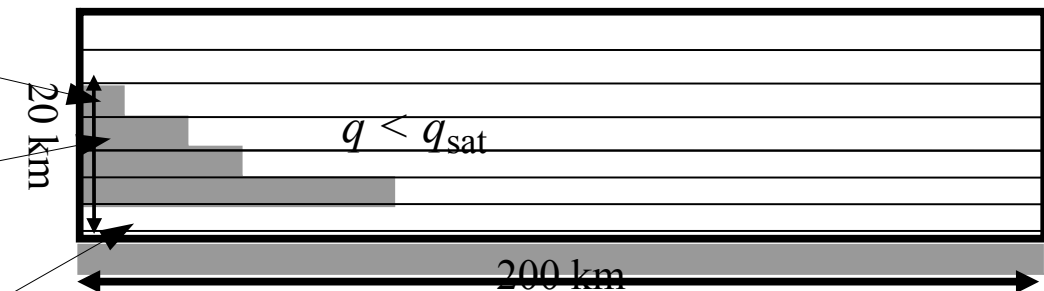
Modèle « tout ou rien » :

Si $q > q_{\text{sat}}$ maille nuageuse, sinon ciel clair.



Modèle « statistique » :

On suppose une distribution statistique de q' dans la maille autour de q



Paramétrisation simple : gaussienne $\sigma / q = 20\%$

II. Modèles de circulation générale

Représentation des nuages

q : concentration en vapeur d'eau

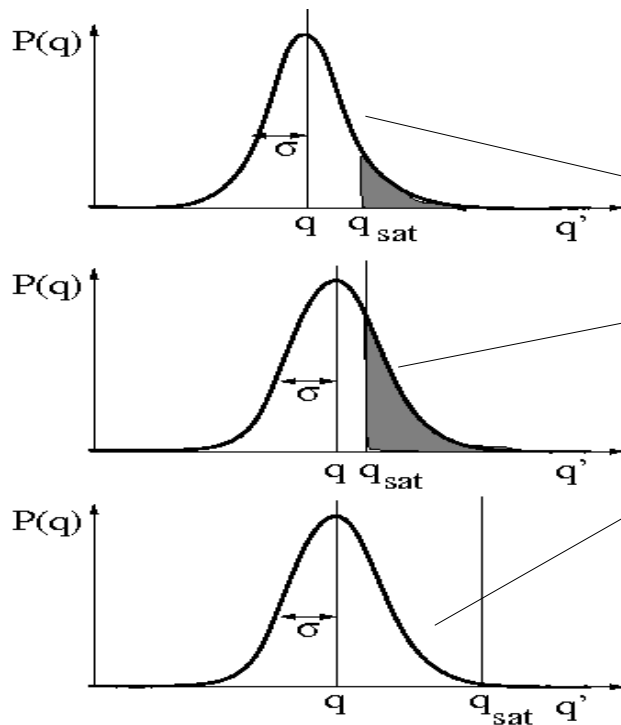
q_{sat} : concentration maximum à saturation

Si $q > q_{\text{sat}}$:

→ la vapeur d'eau condense = nuage

On connaît q et q_{sat} à l'échelle de la maille

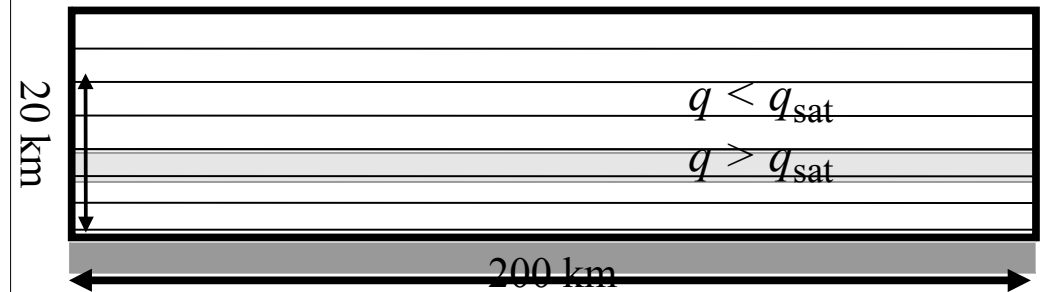
→ Fraction de la maille couverte de nuages ?



Paramétrisation simple : gaussienne $\sigma / q = 20\%$

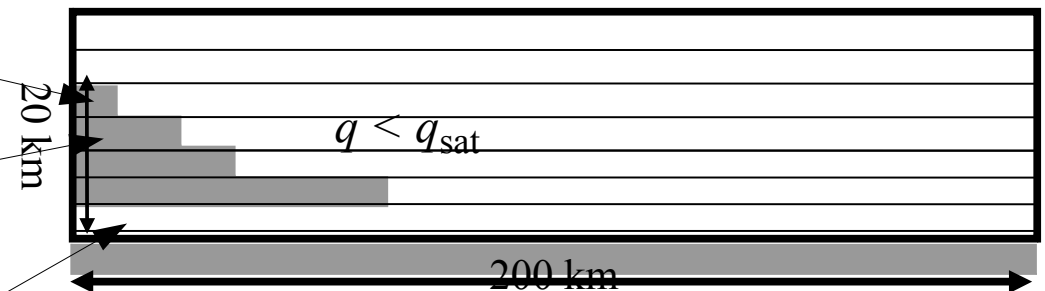
Modèle « tout ou rien » :

Si $q > q_{\text{sat}}$ maille nuageuse, sinon ciel clair.

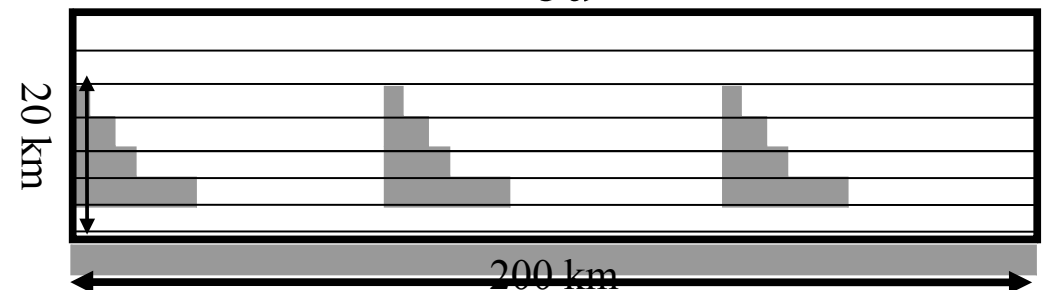


Modèle « statistique » :

On suppose une distribution statistique de q' dans la maille autour de q



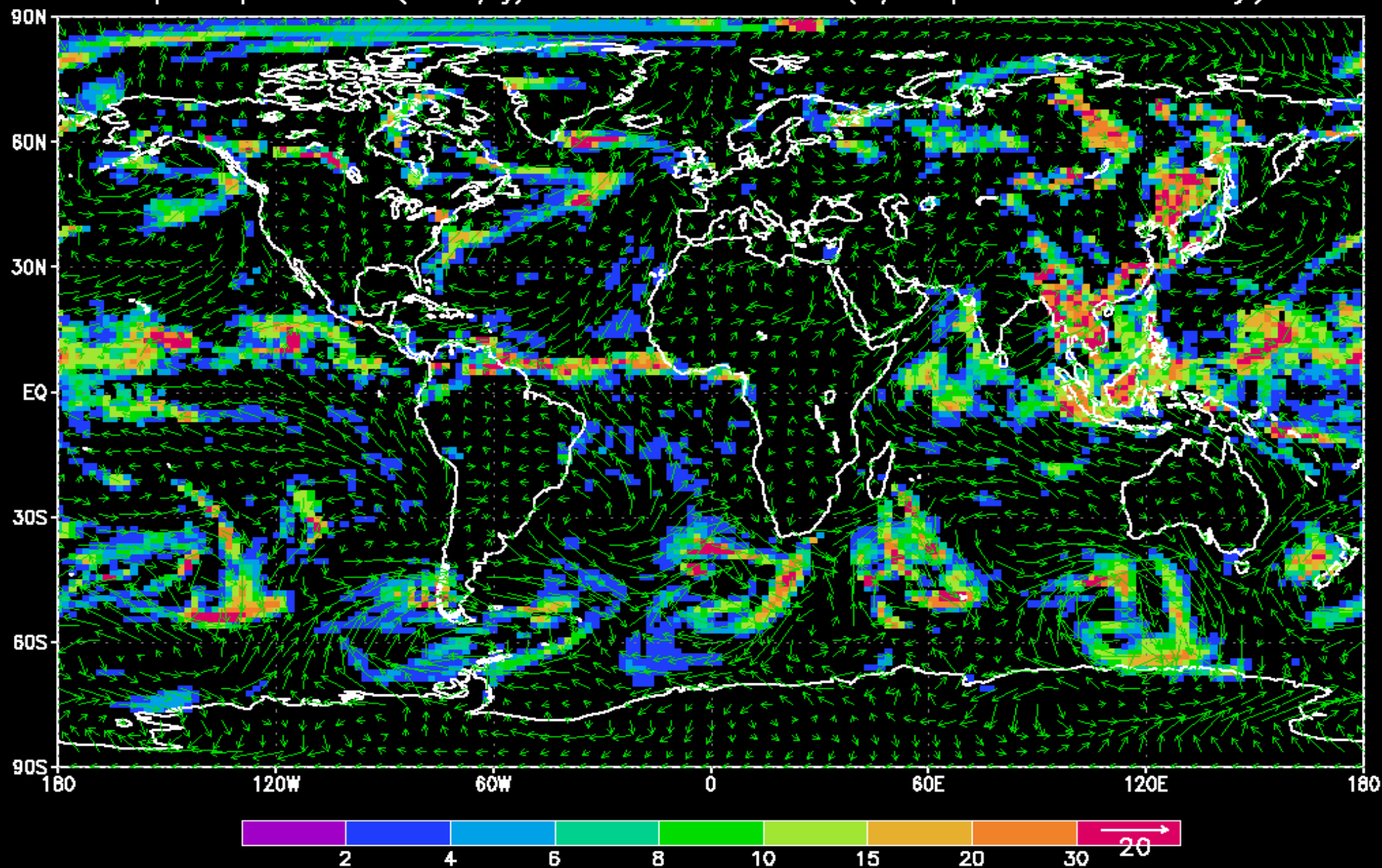
ou



Extrait d'une simulation réalisée avec le modèle de climat de l'IPSL

1 Aout

precipitation (mm/j) et vent a 10m (1/3 points en x et y)

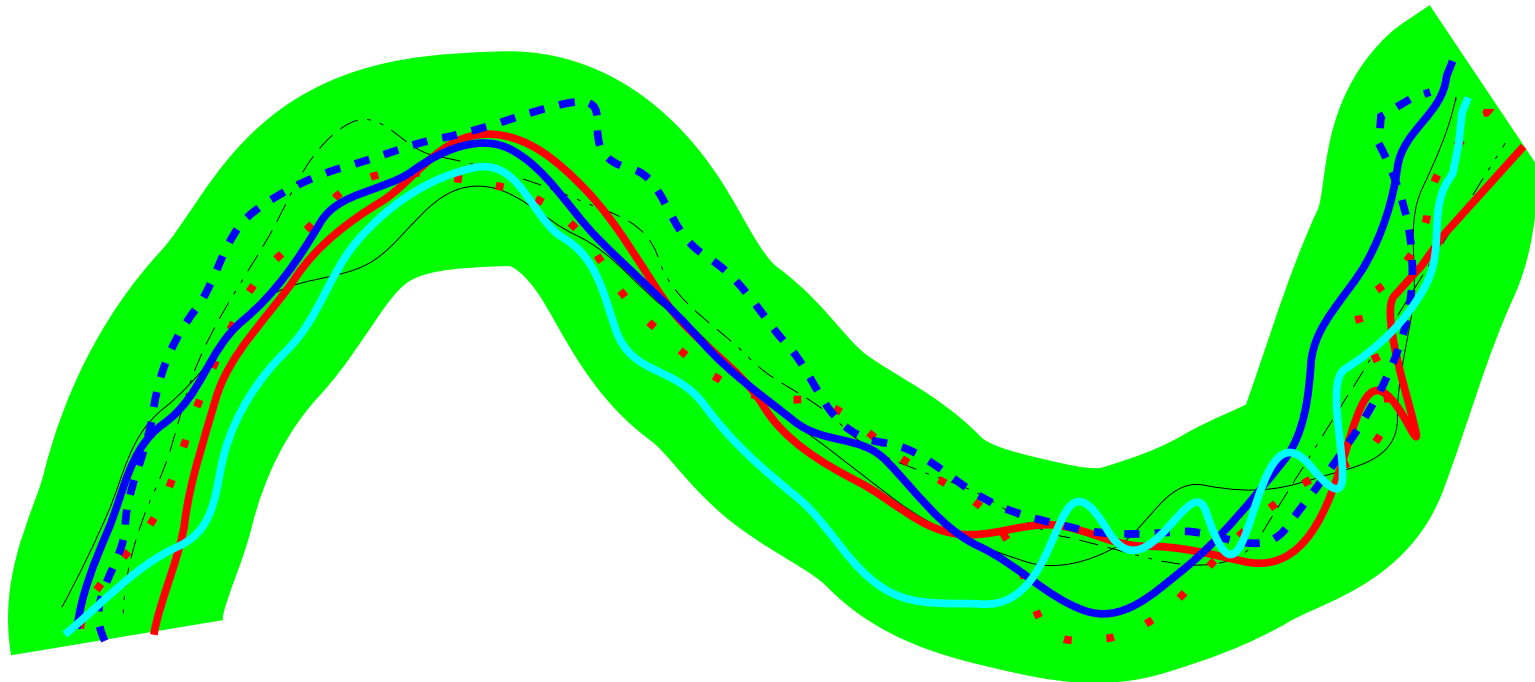


III. Utilisation climatique des modèles

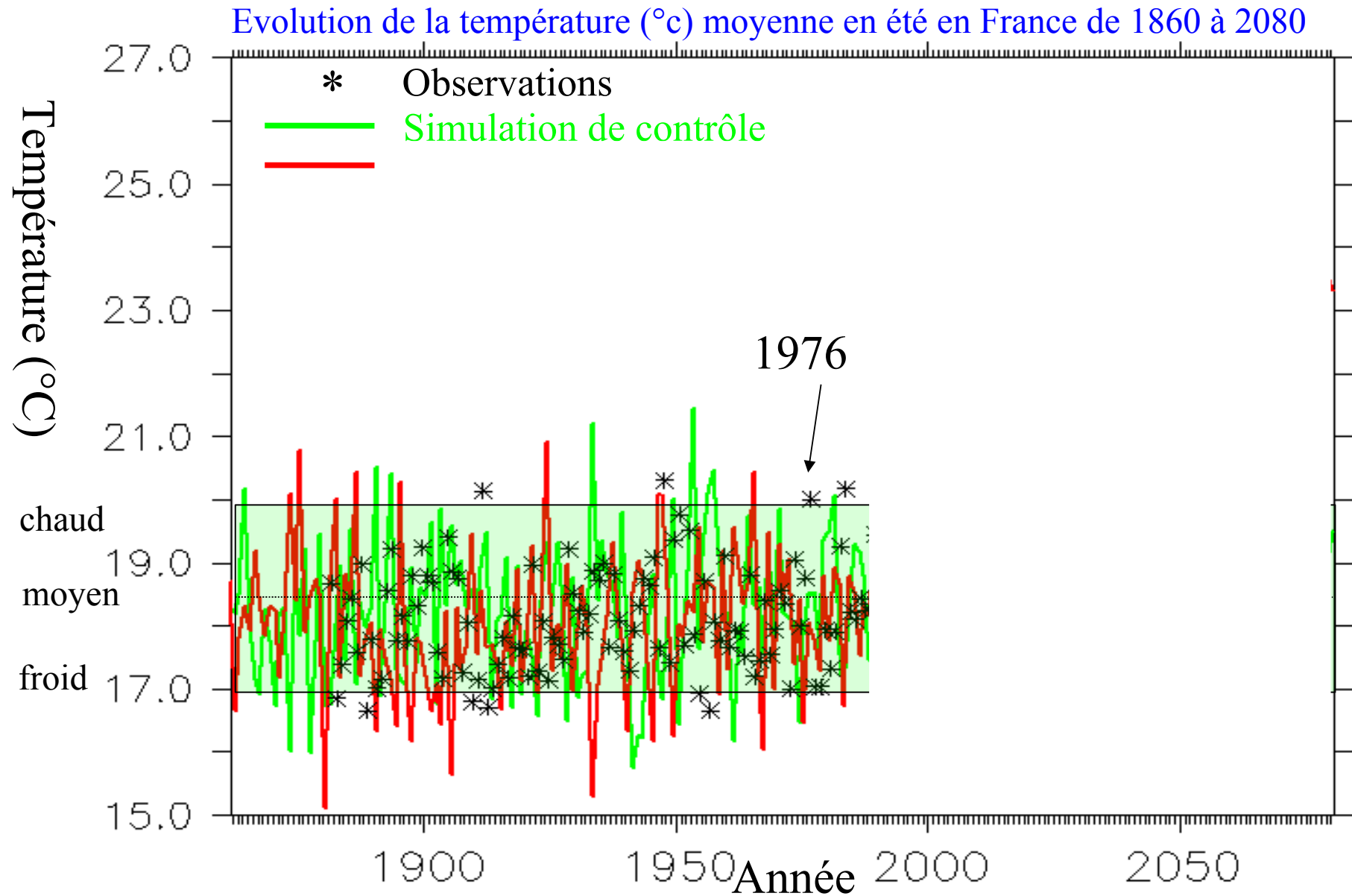
Modélisation du climat / prévision du temps

- **Modèles** : identiques.
- **Durée** : plusieurs décennies ou siècles / 15 jours (prévision saisonnière entre les deux)
- **Etat initial** : quelconque (existence d'un attracteur étrange : le climat) / “analyse” produite à partir d'un processus d'assimilation (variationnelle) des données dans les modèles
- **Prévision** : statistique (ex : la variabilité interannuelle de la pluie d'hivernage) / déterministe (le temps qu'il fait demain).

arial



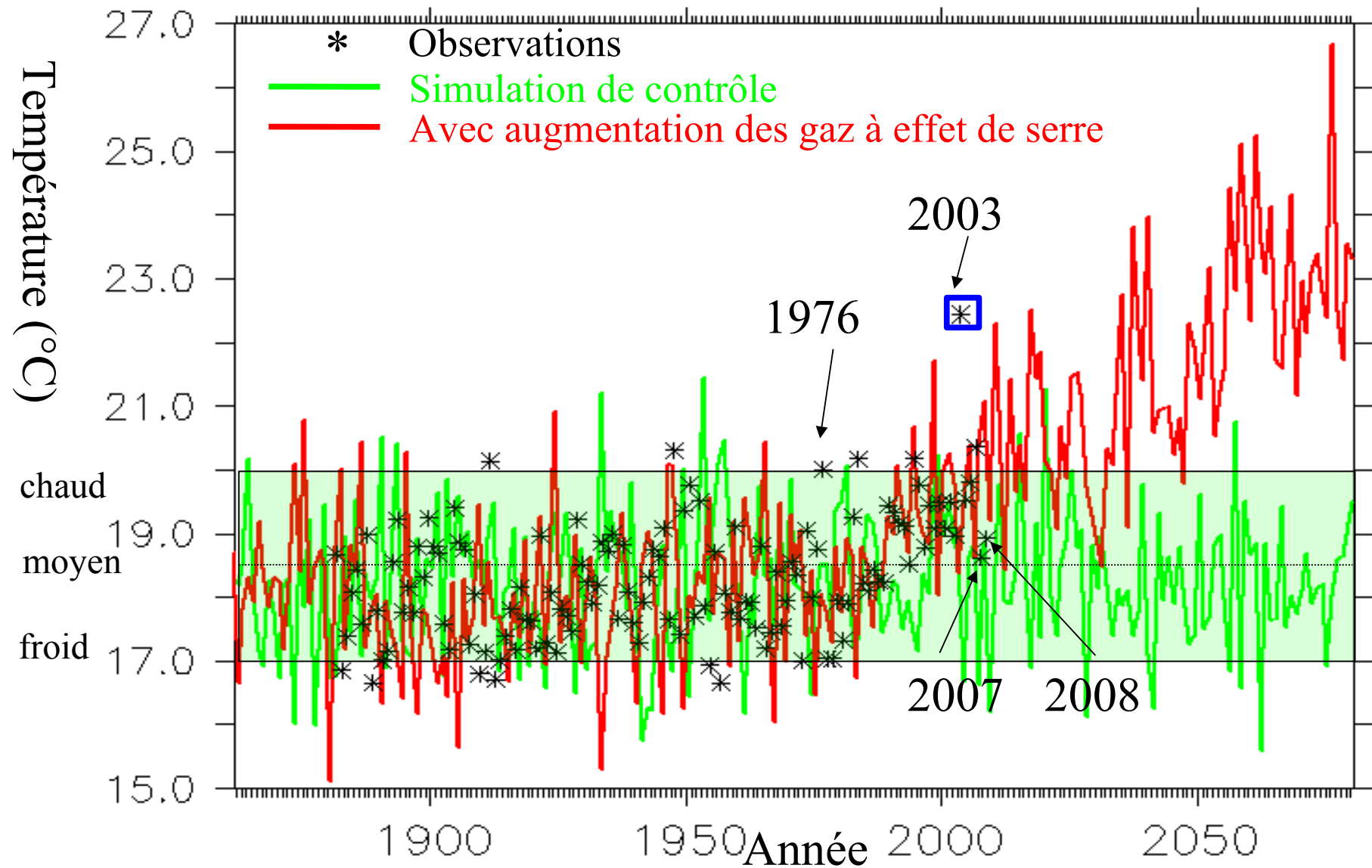
III. Utilisation climatique des modèles



(Scenario SRESA2 du GIEC, modèle de l'IPSL)

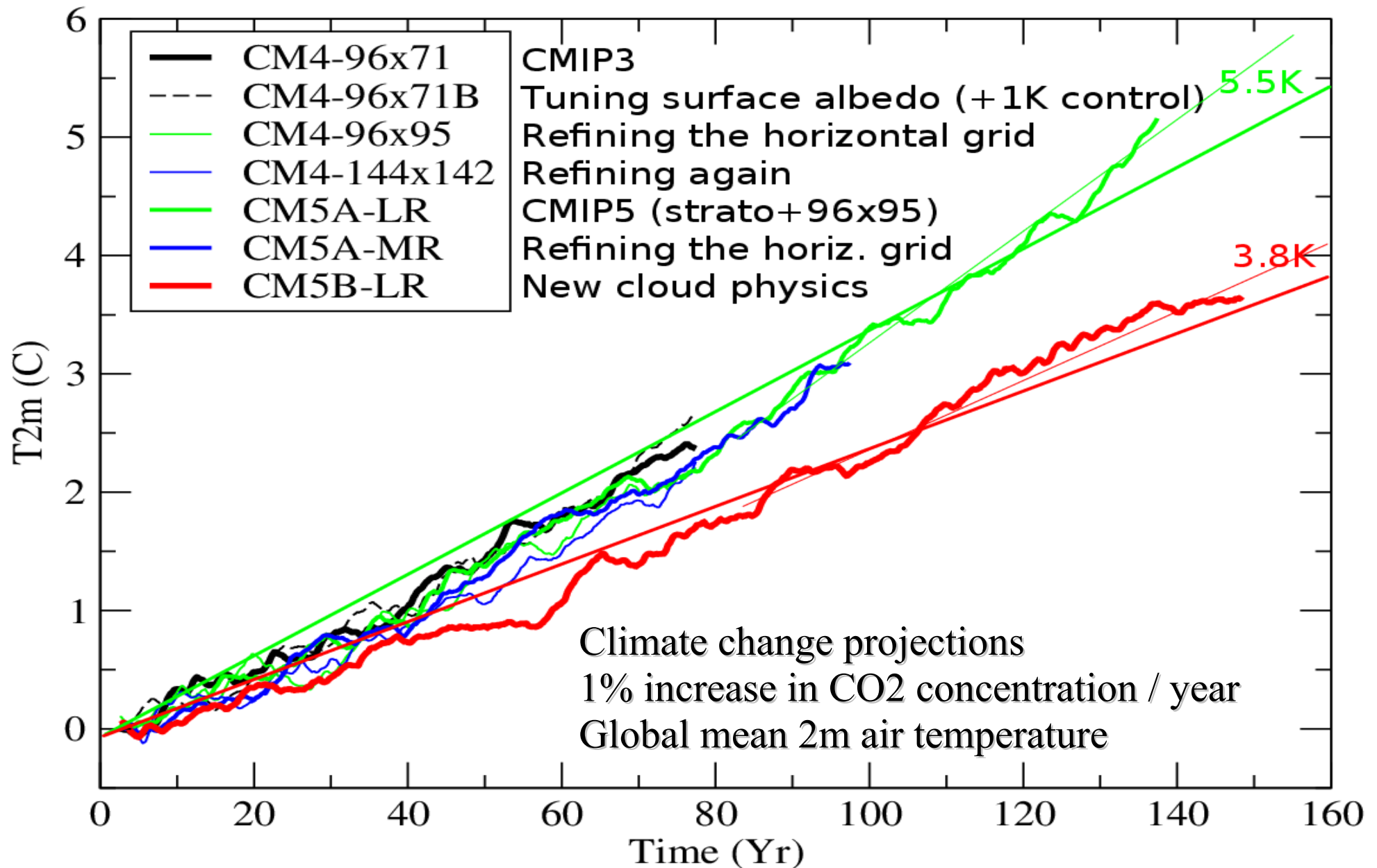
III. Utilisation climatique des modèles

Evolution de la température (°C) moyenne en été en France de 1860 à 2080



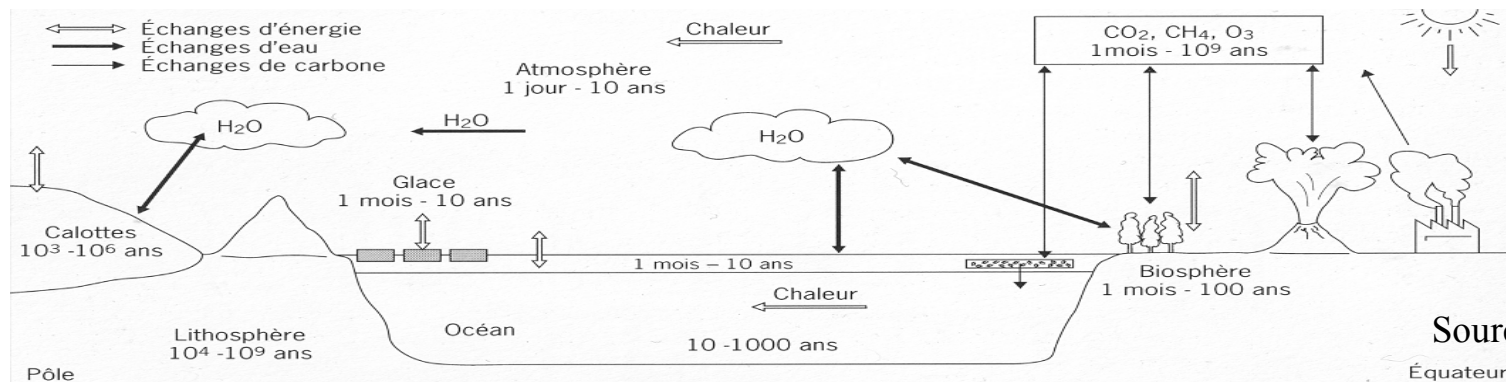
(Scenario SRESA2 du GIEC, modèle de l'IPSL)

III Illustration with the LMDZ climate model : Climate change projections

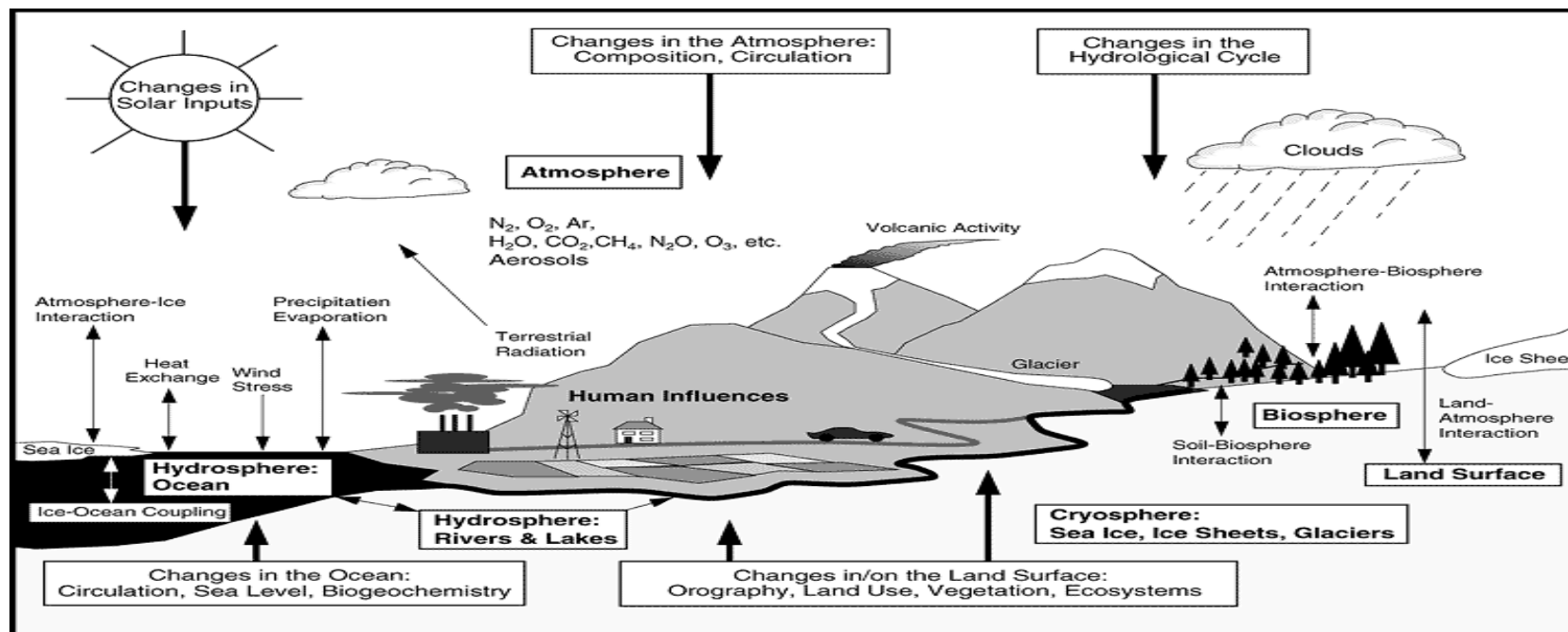


IV. Modélisation du système climatique

Le climat : le monde des apparences



Source: S. Joussaume, 2000

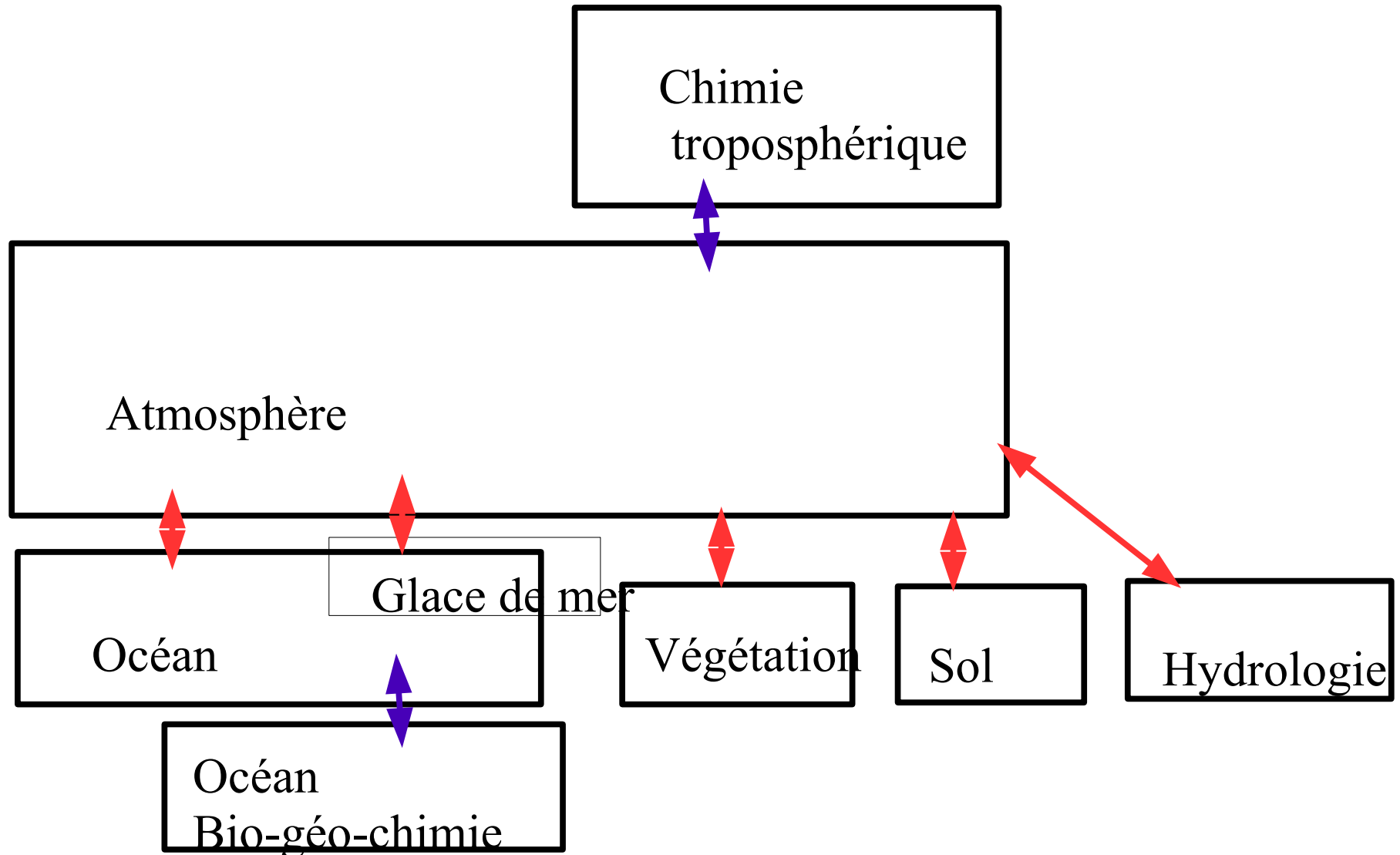


Source: GIEC, 2001

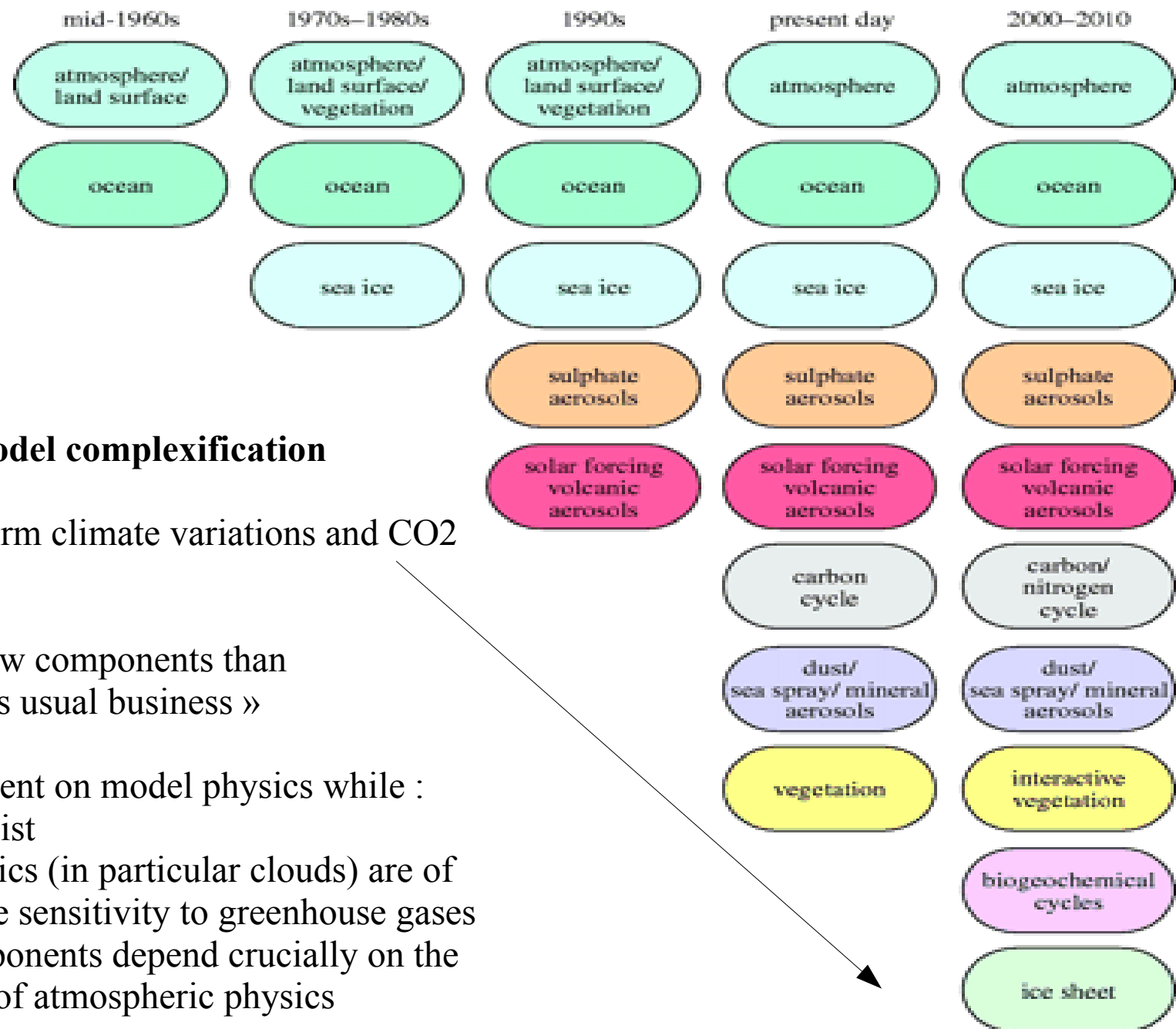
Un système complexe

IV. Modélisation du système climatique

Modélisation du climat : découpage en sous-systèmes



IV. Modélisation du système climatique



Priority given to model complexification

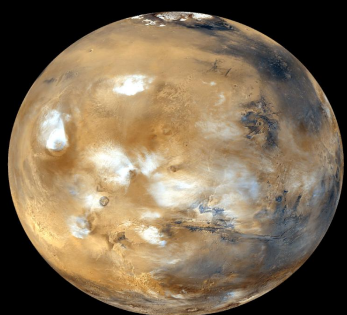
Motivated by long term climate variations and CO₂ cycle

Easier to promote new components than improvements of « as usual business »

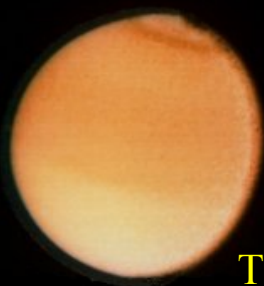
Not much improvement on model physics while :
→ strong biases persist
→ atmospheric physics (in particular clouds) are of first order for climate sensitivity to greenhouse gases
→ all the other components depend crucially on the good representation of atmospheric physics



The Earth

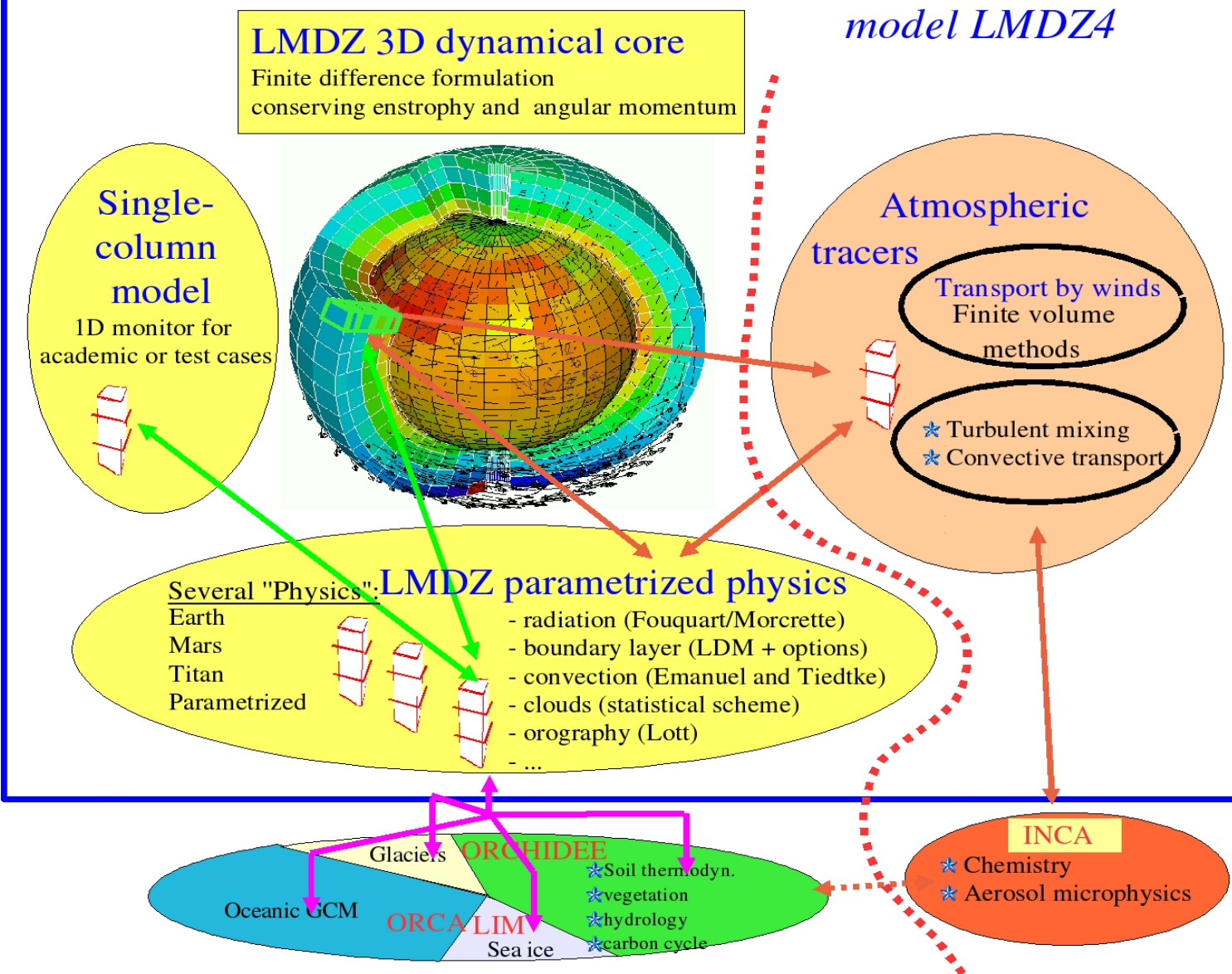


Mars



Titan

Atmospheric component of the IPSL integrated climate



IV. Modélisation du système climatique

Couplage avec la composition : chimie, aérosols, gaz à effet de serre

Equation de transport commune à toutes ces espèces

Commune aux modèles du système climatique, de pollution, de composition océanique.

$$\frac{\partial q_i}{\partial t} + V \cdot \text{grad } q_i = \frac{\partial q_i}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial q_i}{\partial z} \right) + S_i$$

Advection

Diffusion turbulente

Source / Puits

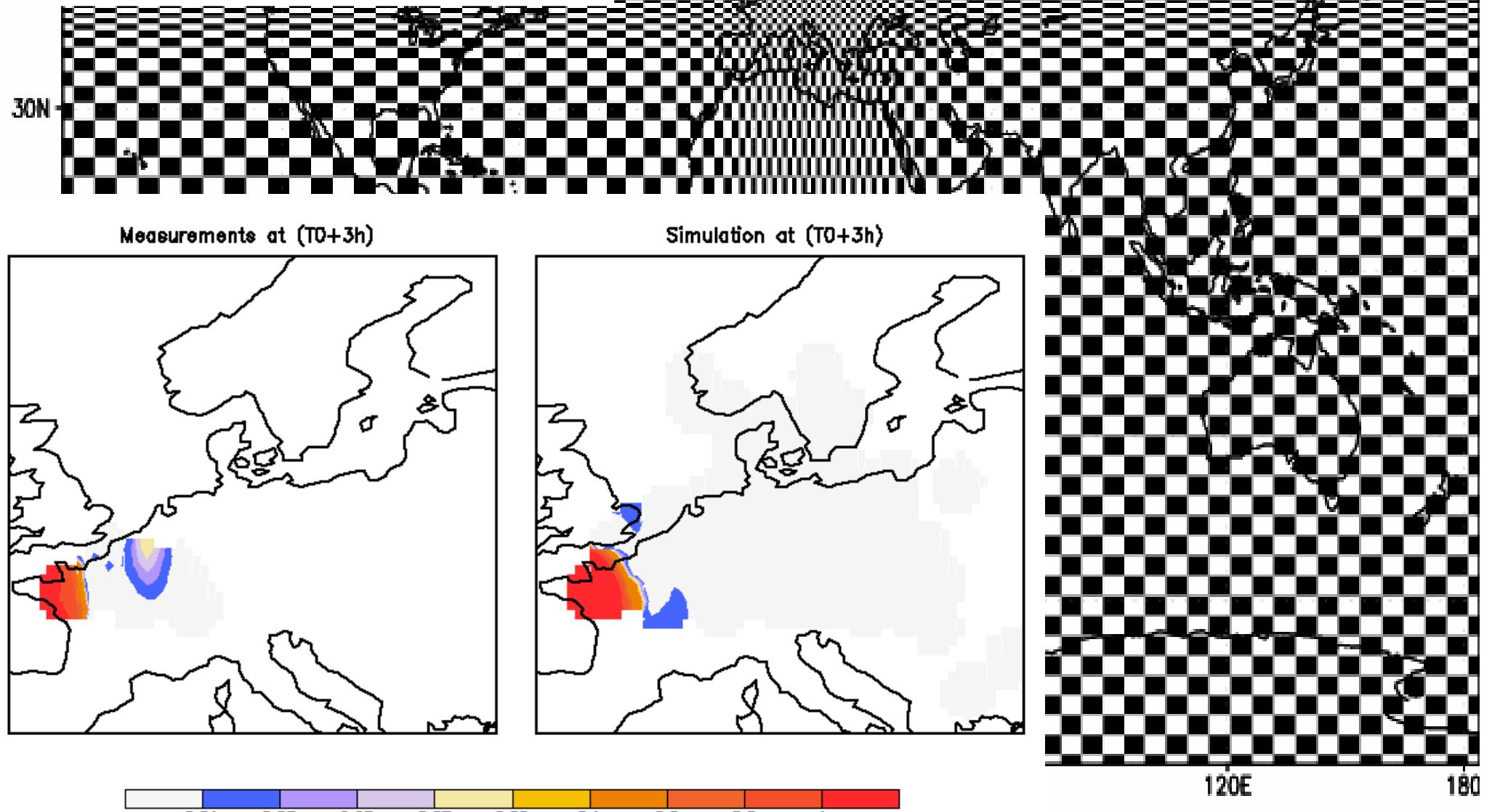
Pendant les TD, on travaille sur cette équation, en supposant que la dynamique atmosphérique est connue (V et K_z). Le problème est alors linéaire en q .
On va regarder les questions numériques posées dans ce cas.

Validation du transport :

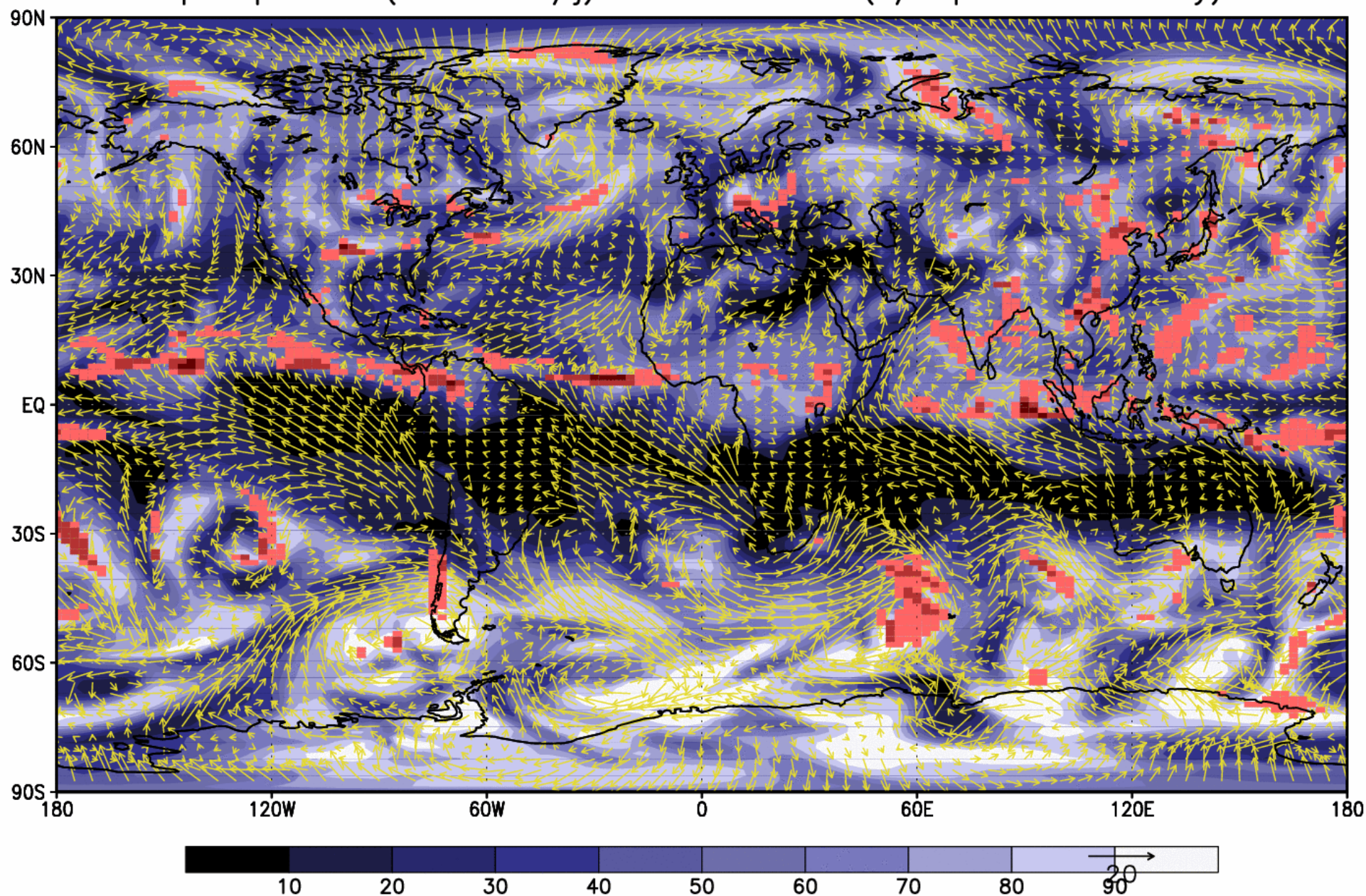
Simulation de la dispersion d'un polluant émis depuis la Bretagne (campagne ETEX)

Modèle avec une grille étirée

“Guidage” des vents par des “analyses”



2 Aout
humidite relative (500hPa, %)
precipitation (> 10 mm/j) et vent a 10m (1/2 points en x et y)



Résumé

Les Modèles de circulation/transport atmosphérique ou océanique :

- modèles (jeux d'équations, de formulations numériques jusqu'à la mise en oeuvre informatique) dont le but est de simuler le comportement de l'atmosphère (ou de l'océan) au cours du temps.
- Les mêmes modèles sont utilisés pour la prévision du temps et pour l'étude du climat mais dans des modes d'utilisation très différents.
- Deux parties : résolution explicite jusqu'à une certaine échelle spatiale / paramétrisation des processus sous-maille
- Pour la partie explicite, les équations sont relativement bien établies, et les questions pour le développement sont essentiellement d'ordre numérique et informatique.
- Pour les paramétrisations, l'établissement même des équations est l'objet de recherches.

Les modèles du système climatique (ou système terre)

- Des modèles analogues sont construits pour l'étude de la chimie atmosphérique, de l'océanographie côtière, etc.
- Les modèles de circulation générale développés pour l'étude du climat incluent de plus en plus de processus physiques, chimiques, biologiques ...
- Le découpage et couplage entre sous-systèmes permet de développer et valider indépendamment des morceaux de modèles spécifiques de l'un ou l'autre de ces processus
- Le système couplant les sous-systèmes doit également faire l'objet de validations spécifiques.

TDs et suites du cours

- Développement d'un modèle d'advection / diffusion