

# 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

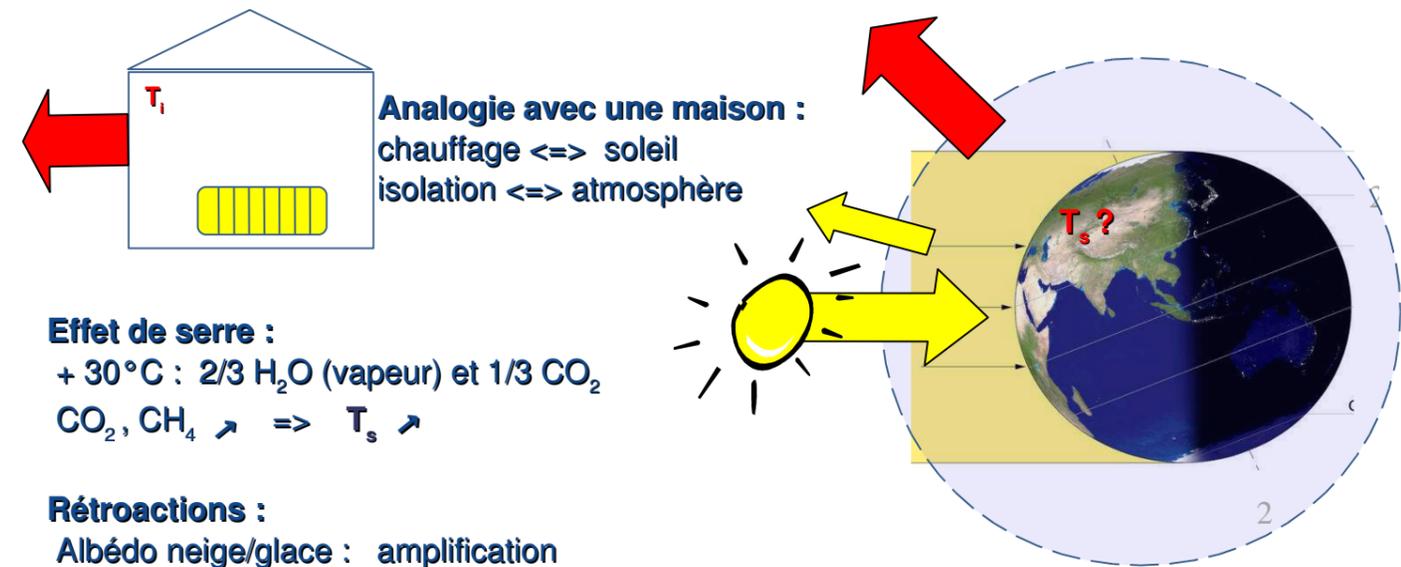
- Problématique du changement climatique
- Les principes de la modélisation du climat
- Modélisation d'un système complexe : découpage en sous systèmes.

## II. Les modèles de circulation générale

- Les équations primitives
- Les 'paramétrisations' : principe et illustrations
- Prédiction météorologique / modélisation du climat
- Vers des modèles de plus en plus complexes

## III. Conclusions

## Température moyenne $T_s$ à la surface de la terre



### Effet de serre :

+ 30°C : 2/3 H<sub>2</sub>O (vapeur) et 1/3 CO<sub>2</sub>  
CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> → ⇒ T<sub>s</sub> ↗

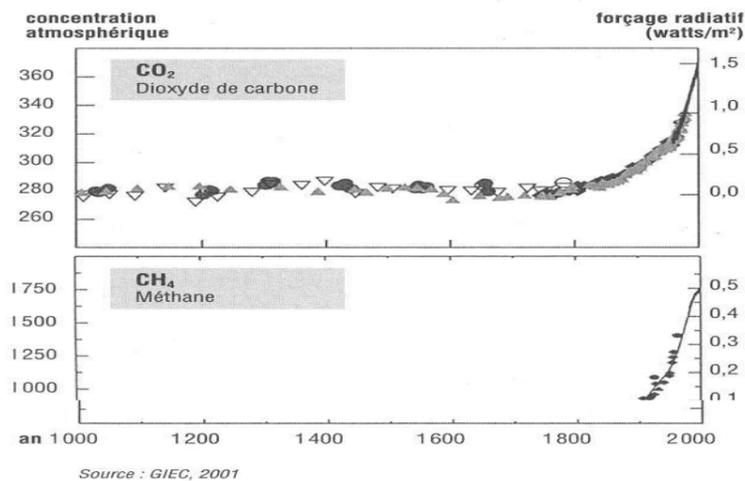
### Rétroactions :

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

### Système complexe :

Simulations numériques sur base de scénario d'évolution du CO<sub>2</sub>  
Groupe Intergouvernemental d'Experts sur l'Evolution du Climat (GIEC)

## Évolution des gaz à effet de serre depuis 1000 ans



### On sait :

- La concentration en gaz à effet de serre de l'atmosphère augmente fortement depuis le début de l'ère industrielle.
- Une augmentation des gaz à effet de serre piège le rayonnement et réchauffe la surface

### Mais : nombreuses rétroactions

- > vapeur d'eau : plus chaud -> plus de vapeur d'eau -> plus d'effet de serre -> plus chaud
- > albédo : plus chaud -> moins de neige -> plus sombre -> plus chaud
- > nuages ??????

### Une problématique particulière :

- > On cherche à 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 Lorenz 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)

- > De type encyclopédique
- > Tentative d'exhaustivité
- > Recherche du "réalisme"
- > Modélisation numérique : simulations suivies de traitements statistiques

## Modèles de circulation générale

- Construits à partir de principes physiques
- Cependant, pour certains processus (par exemple la convection nuageuse) les modèles sont réglés sur les observations → **incertitudes**
- Manque d'observations dans certains domaines

## Augmenter la confiance :

- Les modèles doivent être bâtis autant que faire se peut sur la physique
- Les modèles doivent être capables de rendre compte de la sensibilité à certaines perturbations
- Etudes paléo-climatiques
- Etudes planétaires
- Utilisation de modèles variés
- Comprendre les mécanismes mis en jeu

## Philosophie générale

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

## Le monde des modèles numériques

apparences  
 théories (physique, chimie, biologie, économie)  
 mathématique  
 numérique  
 informatique

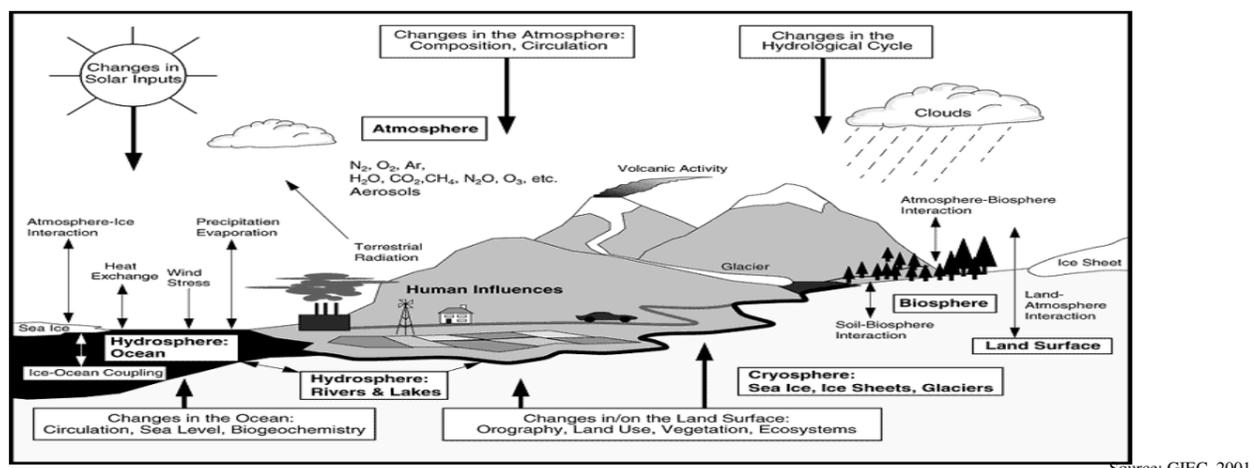
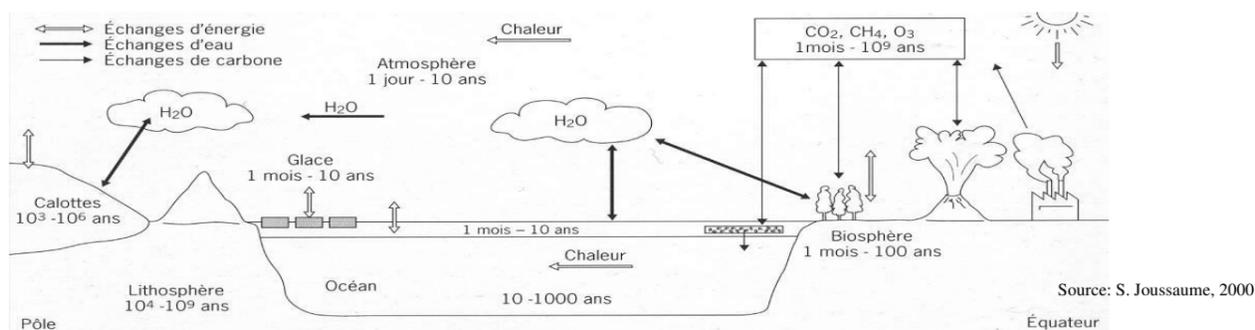
Les mathématiques constituent un langage commun.

La modélisation concerne l'ensemble de ces couches.

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

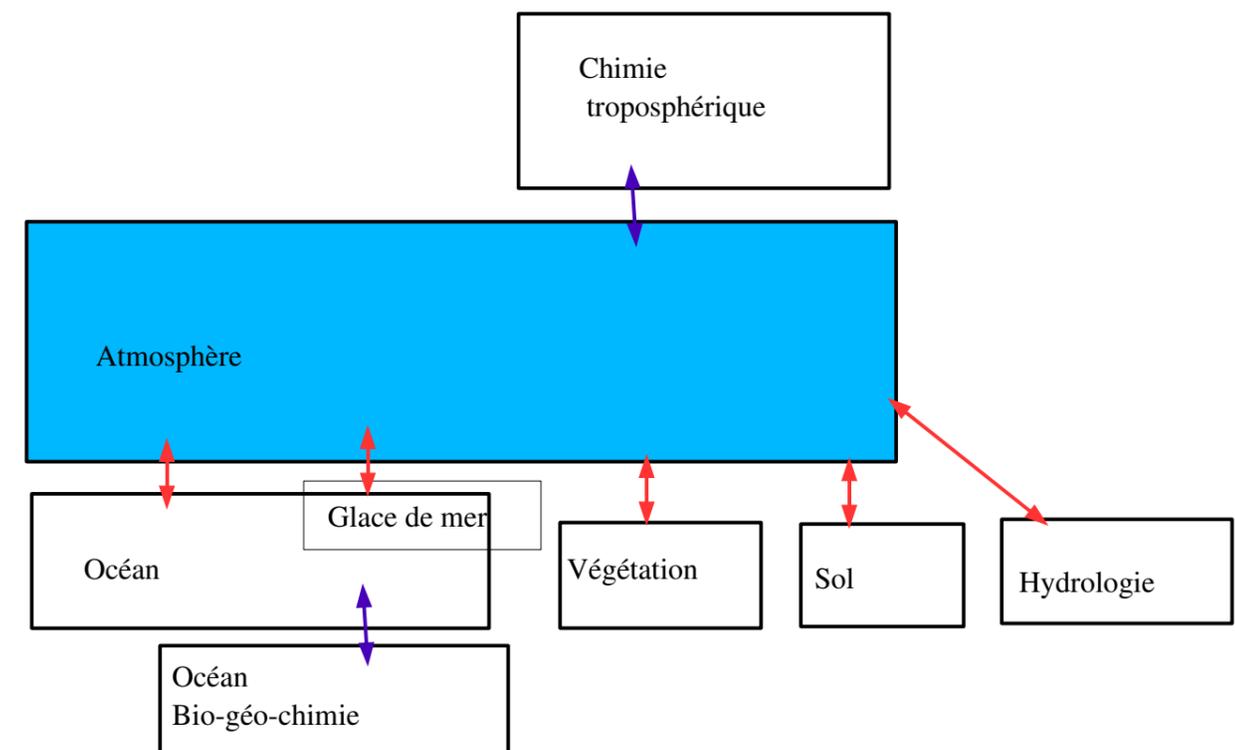
Il faut en même temps être capable de bien séparer ces différentes couches (savoir dans laquelle on se trouve).

## Le climat : le monde des apparences



## Un système complexe

## Modélisation du climat : découpage en sous-systèmes



## Découpage en sous-systèmes :

Bien identifier les variables d'interfaces.

Tester indépendamment les différents sous-systèmes et leur réactions aux paramètres d'interface.

Tester ensuite le système couplé.

A partir d'ici, on s'intéresse plus particulièrement à la composante atmosphérique (mais beaucoup des principes énoncés restent vrais pour d'autres composantes, et notamment pour les modèles de circulation océanique).

## I. Contexte et principes de la modélisation du climat

- Problématique du changement climatique
- Les principes de la modélisation du climat
- Modélisation d'un système complexe : découpage en sous systèmes.

## II. Les modèles de circulation générale

- Les équations primitives
- Les 'paramétrisations' : principe et illustrations
- Prévision météorologique / modélisation du climat
- Vers des modèles de plus en plus complexes

## III. Conclusions

### Les modèles de circulation générale

basés sur les équations primitives de la météorologie

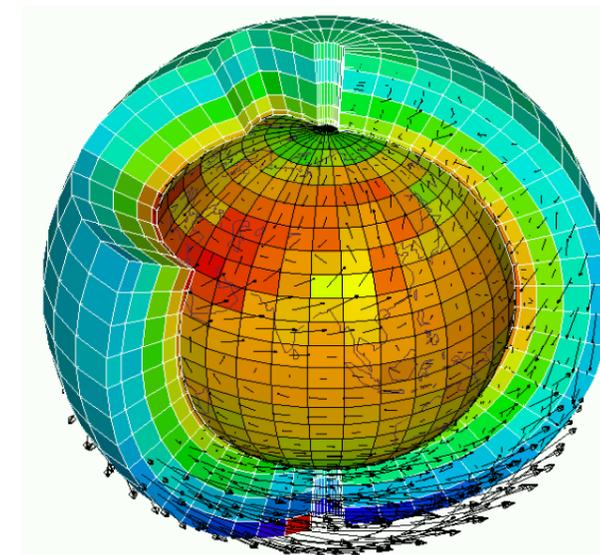
- > Equations de Navier stokes
- > Approximation de couche mince : l'épaisseur de l'atmosphère est petite devant le rayon de la terre
- > Approximation hydrostatique sur la verticale

En coordonnée pression sur la verticale :

$$\left\{ \begin{array}{l} \partial_t \vec{V} = \underbrace{-(\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V}}_{\text{transport}} - \underbrace{\omega \partial_p \vec{V}}_{\text{gravity}} + \underbrace{\nabla \Phi}_{\text{Coriolis}} - f \vec{k} \times \vec{V} + \vec{S}_v \\ \nabla \cdot \vec{V} + \partial_p \omega = 0 \\ \partial_t q = -\vec{V} \cdot \nabla q - \omega \partial_p q = S_q \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} \vec{n} \\ \vec{S}_v \\ \text{risat} \end{array} \left\{ \begin{array}{l} \Phi = gz \text{ geopotentiel} \\ \omega = \partial_t p \text{ vitesse vert.} \\ q = \text{humidite specifique} \end{array} \right. \quad (1)$$

$\vec{S}_v$  et  $S_q$ : termes source déterminés par

$q$ : température potentielle, eau (totale, vapeur, ...) espèces chimiques, aérosols ...



Représentation des équations dans un ordinateur : le monde numérique.  
Différences finies, volumes finis, éléments finis, formulations spectrales  
Nombre de degrés de liberté fini.  
On ne traite pas l'ensemble des échelles de l'écoulement

Les processus non résolus doivent être représentés de façon simplifiée, au travers de 'paramétrisations'

**Qu'est-ce qu'une paramétrisation.**

Une paramétrisation décrit un processus non explicitement représenté au travers d'un jeu d'équations à partir des variables d'état du modèle et calcule l'effet de ce processus sur les variables d'état.

Les variables d'état (explicites) du modèle global (ou non) sont utilisées pour prédire des variables internes aux paramétrisations.

Exemple : on diagnostique la stabilité statique de l'atmosphère à partir du profil de température grande échelle. On en déduit l'intensité de la turbulence ou de la convection. On utilise cette information pour en déduire le mélange vertical effectué par la turbulence sur le profil vertical de température.

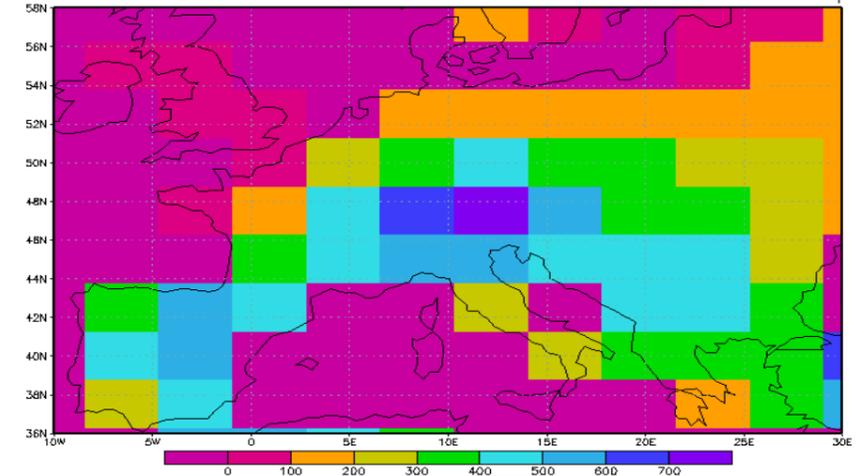
Les paramétrisations correspondent à nouveau à un découpage : cette fois-ci entre échelles explicitement représentées et échelles "sous-mailles".

On suppose en général dans les paramétrisations que les processus représentés sont homogènes dans la maille et s'étendent à l'infini.

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

**Orography**

At the model grid scale, orography is poorly represented; e.g. Europe orography for 3.5x2.5 grid is:



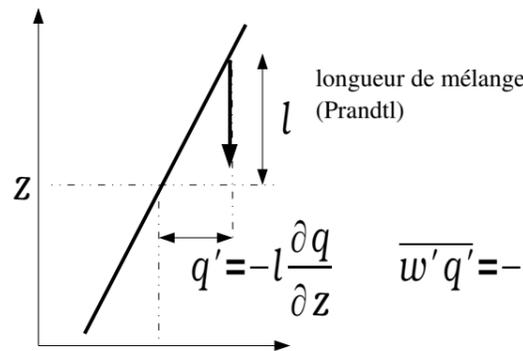
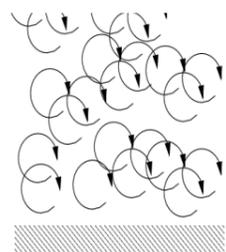
The purpose of the parametrization of orography effect is to determine the **drag** and the **lift** due to mountains and acting on atmospheric flow. → use of high resolution orography data base.

Note that snow is still a problem.

Un autre exemple de processus sous-maille : la couche limite planétaire.

Près de la surface, le frottement du vent sur les aspérités provoquent de mouvements turbulents.

**Diffusion turbulente**



$$\frac{\partial q}{\partial t} = K_z \frac{\partial^2 q}{\partial z^2} \quad \text{avec}$$

$$K_z = l|w'|$$

**Equations de GCM atmosphérique (extraits)**

Equations dynamiques en coordonnées pression

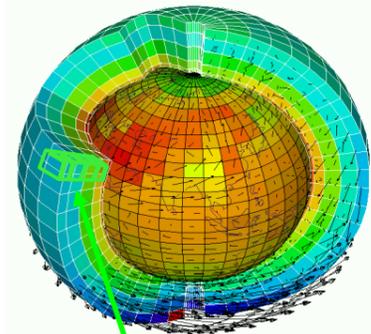
$$\begin{cases} \partial_t \vec{V} = \underbrace{-(\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V}}_{\text{transport}} - \omega \partial_p \vec{V} + \underbrace{\nabla \Phi}_{\text{gravity}} - \underbrace{f \vec{k} \times \vec{V}}_{\text{Coriolis}} + \underbrace{S_v}_{\text{Sources}} \\ \nabla \cdot \vec{V} + \partial_p \omega = 0 \\ \partial_t q = -\vec{V} \cdot \nabla q - \omega \partial_p q + S_q \end{cases} \begin{cases} \Phi = gz \quad \text{geopotentiel} \\ \omega = \partial_t p \quad \text{vitesse vert.} \\ q = \text{humidite specifique} \end{cases} \quad (1)$$

$S_v$  et  $S_q$ : termes source déterminés par les **paramétrisations physiques** :

- couche limite planétaire
- convection profonde (Gros cumulus et cumulonimbus)
- nuages
- processus radiatifs
- orographie
- sol . . . . .

## Atmospheric component of the IPSL integrated climate

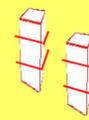
**LMDZ 3D dynamical core**  
Finite difference formulation  
conserving enstrophy and angular momentum



model LMDZ4

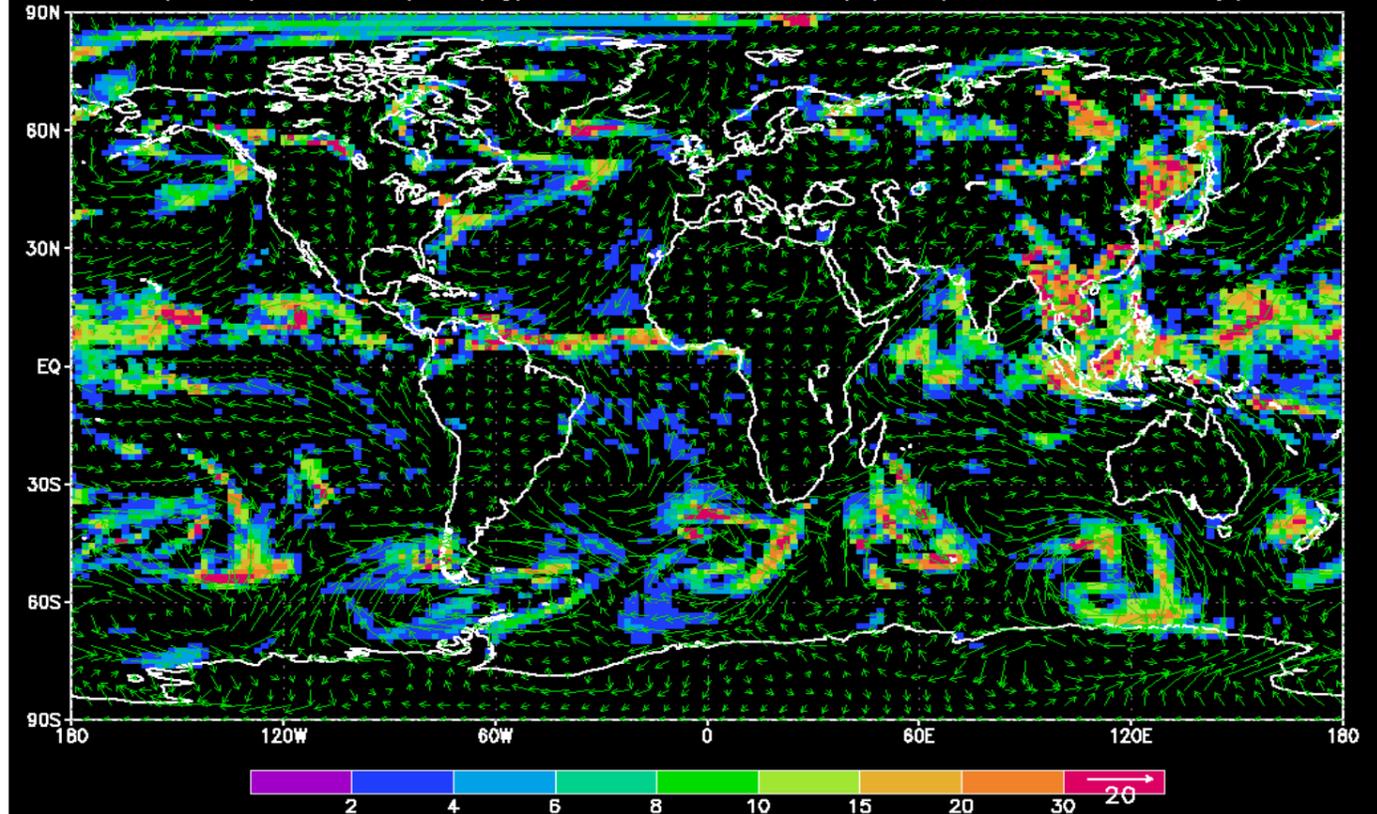
Several "Physics": **LMDZ parametrized physics**

- Earth
  - Mars
  - Titan
  - Parametrized
- radiation (Foucart/Morcrette)
  - boundary layer (LDM + options)
  - convection (Emanuel and Tiedtke)
  - clouds (statistical scheme)
  - orography (Lott)
  - ...



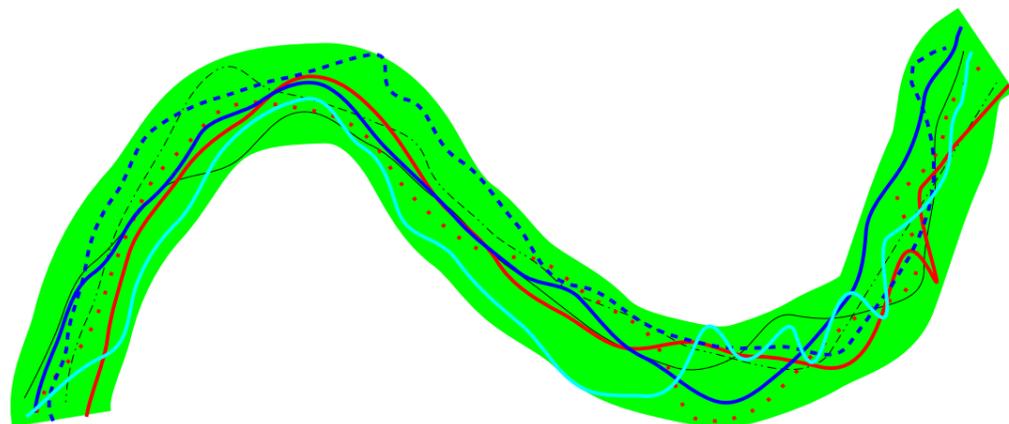
Extrait d'une simulation réalisée avec le modèle de climat de l'IPSL

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



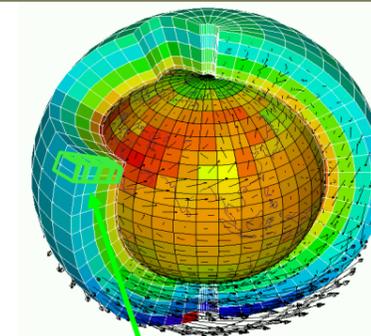
## Modélisation du climat / prévision du temps

- **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).



## Atmospheric component of the IPSL integrated climate

**LMDZ 3D dynamical core**  
Finite difference formulation  
conserving enstrophy and angular momentum



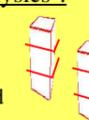
model LMDZ4

**Atmospheric tracers**

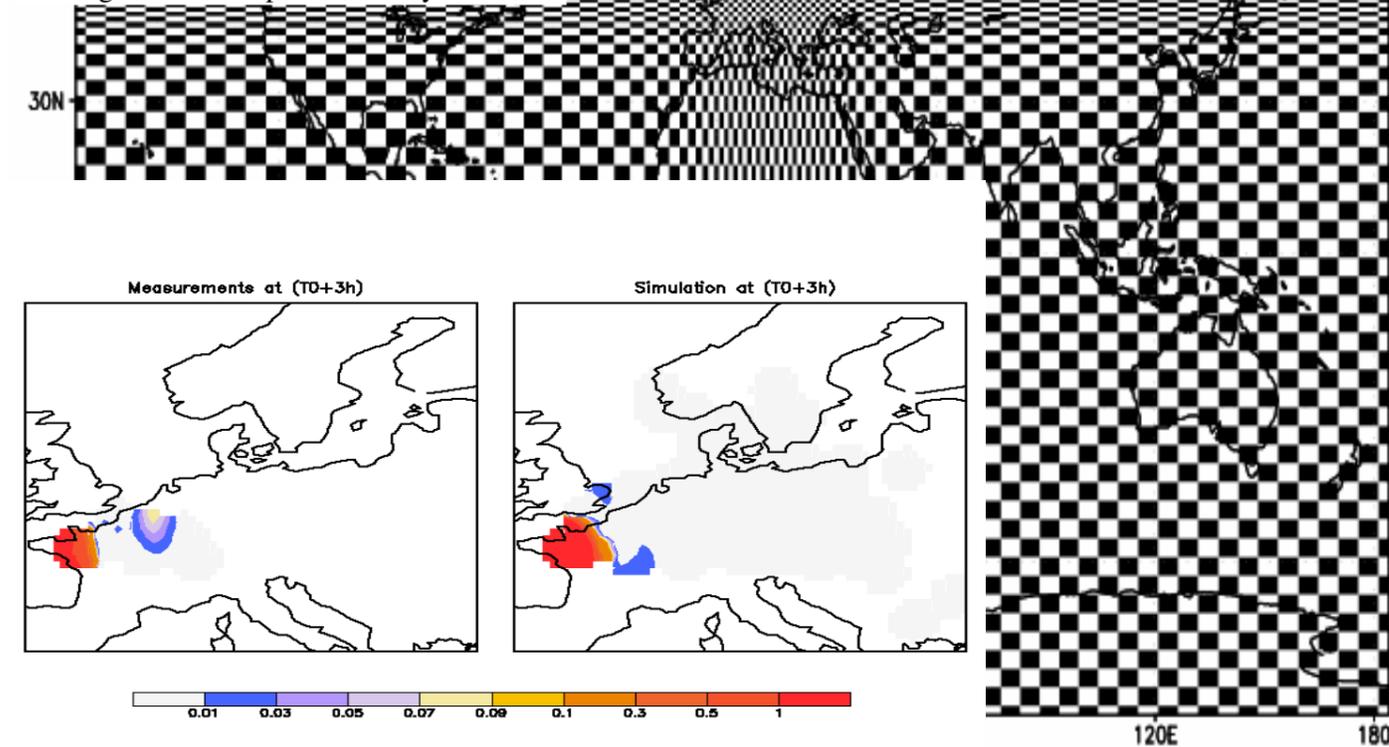
- Transport by winds  
Finite volume methods
- ★ Turbulent mixing
- ★ Convective transport

Several "Physics": **LMDZ parametrized physics**

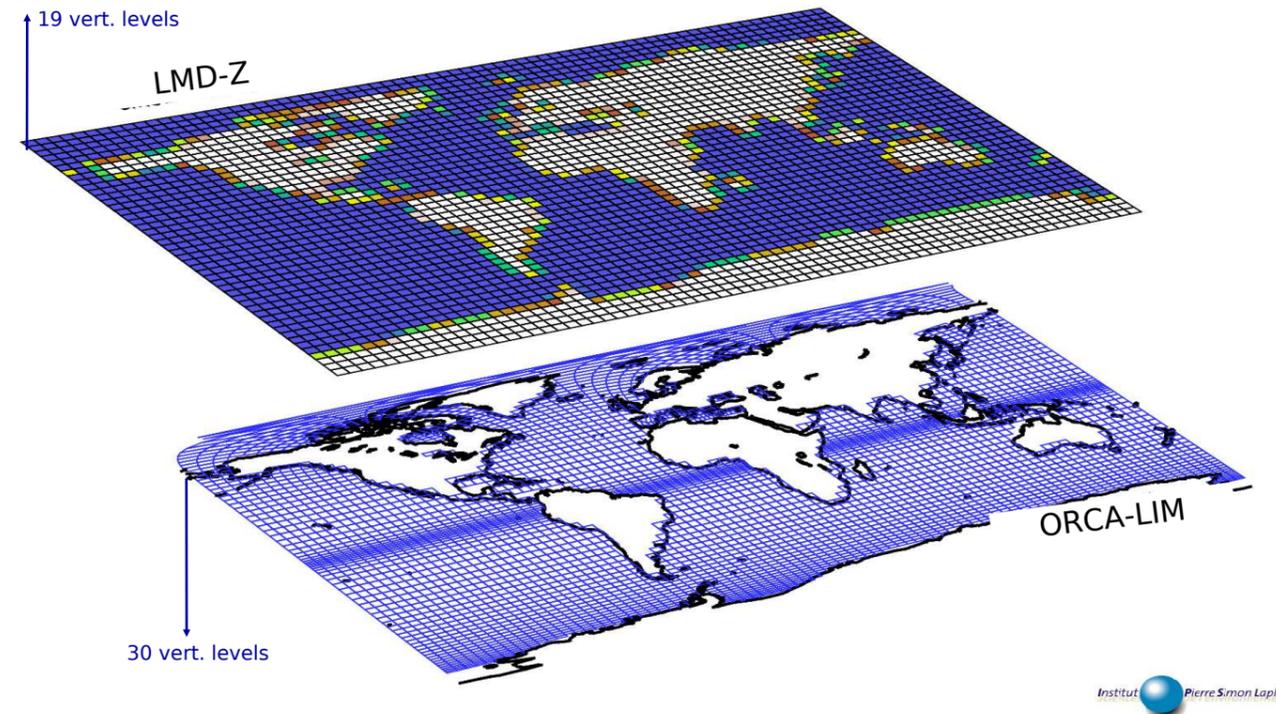
- Earth
  - Mars
  - Titan
  - Parametrized
- radiation (Foucart/Morcrette)
  - boundary layer (LDM + options)
  - convection (Emanuel and Tiedtke)
  - clouds (statistical scheme)
  - orography (Lott)
  - ...



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"

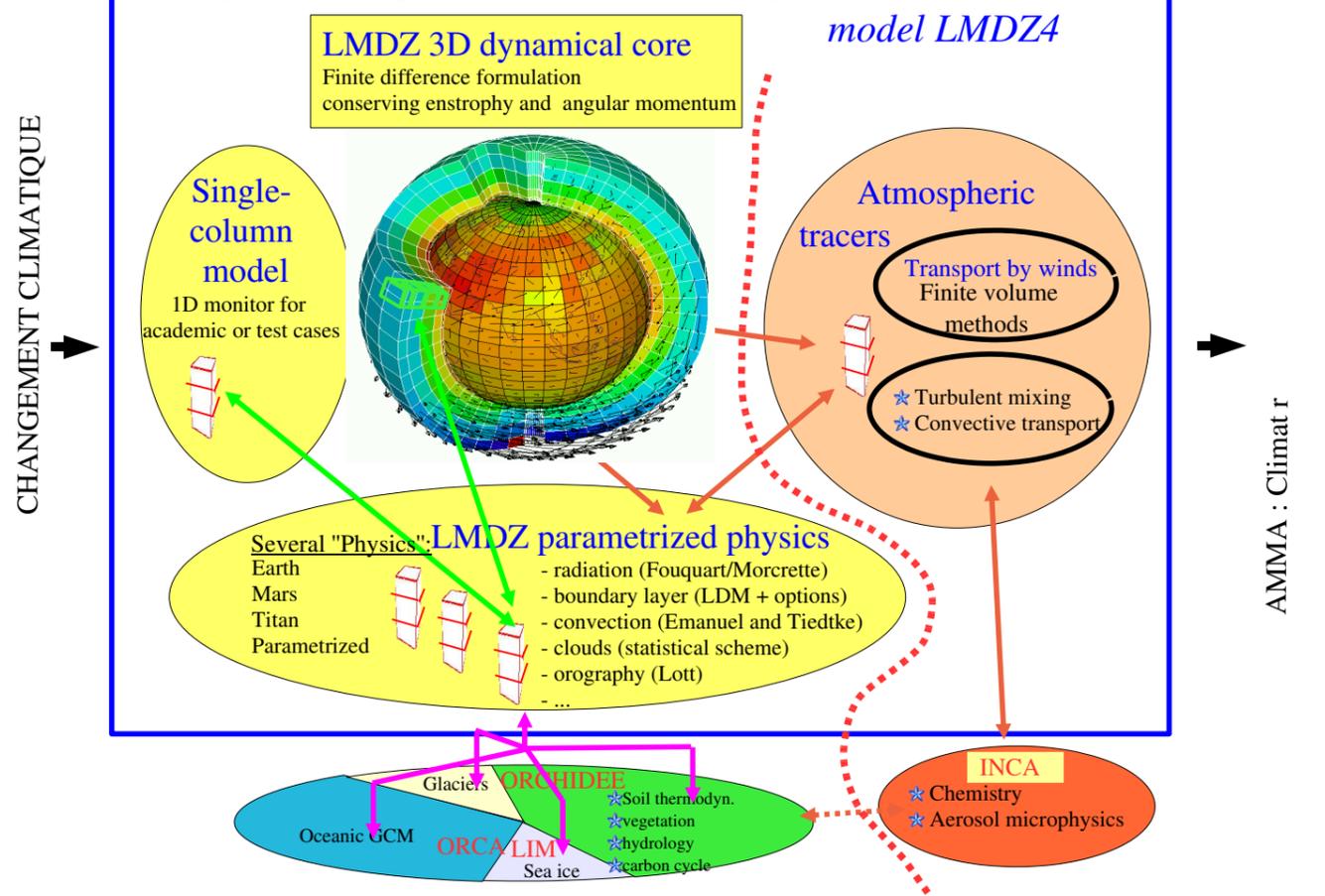


## Couplage avec un modèle de circulation océanique Modèle climatique de l'IPSL

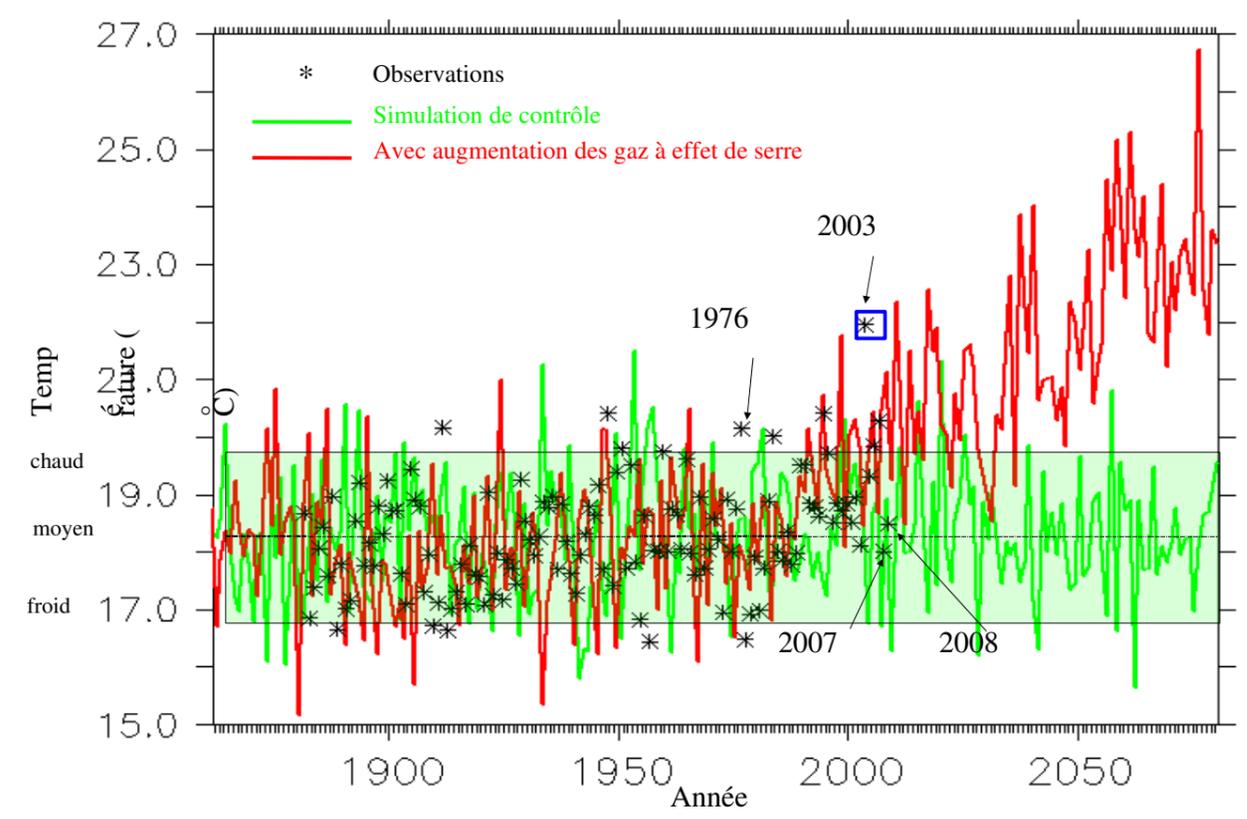


Institut Pierre Simon Laplace

### Atmospheric component of the IPSL integrated climate model LMDZ4



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



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

## Résumé 1

- Les Modèles de circulation générales : 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.
- 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-système doit également faire l'objet de validations spécifiques.

## Résumé 2

- Au sein même d'un modèle de circulation atmosphérique, on peut distinguer deux sous-systèmes : (i) la Dynamique, dans laquelle on résout les équations jusqu'à une certaine échelle (dite explicite) ; (ii) la Physique qui représente les mouvements (et plus particulièrement les échanges verticaux) d'échelle inférieure à la maille du modèle.
- On demande aux modèles globaux de climat : (i) de bien représenter les moyennes climatiques ; (ii) de bien représenter la variabilité depuis les échelles diurnes jusqu'aux échelles pluri-décennales ; (iii) de bien représenter la sensibilité du climat (aux perturbations anthropiques notamment) ; (iv) de bien représenter les rétroactions.