

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.

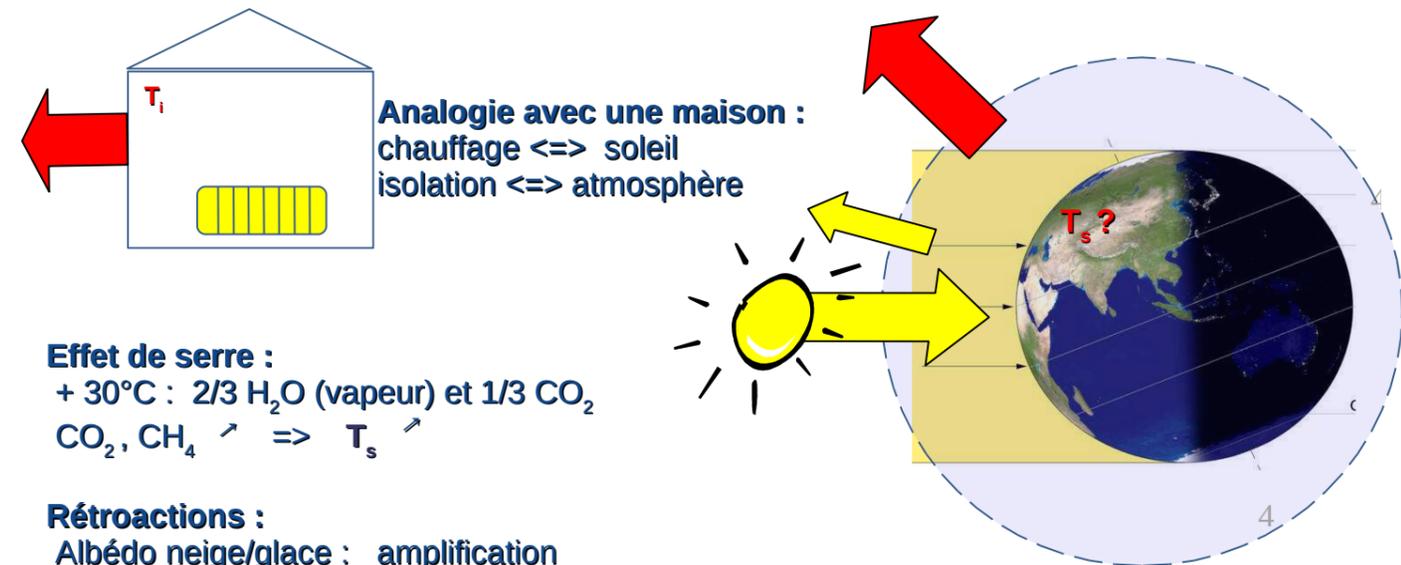
II. Les modèles de circulation générale

- Les équations primitives
- Les 'paramétrisations' : principe et illustrations
- Prévion météorologique / modélisation du climat (Animation LMDZ, animation ETEX)

III. Illustrations

IV. Acquis et incertitudes sur le changement climatique

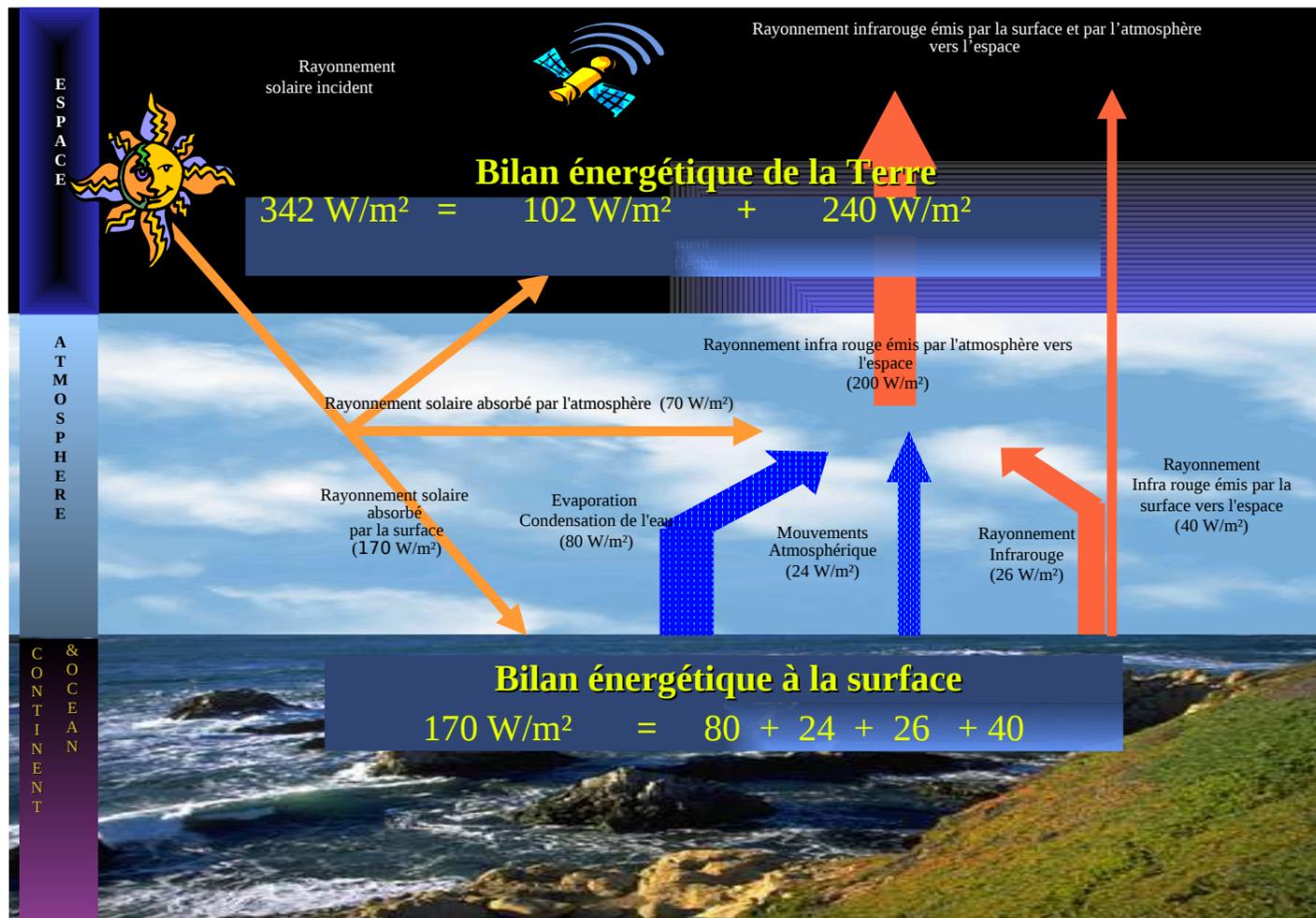
Température moyenne T_s à la surface de la terre



Effet de serre :
 + 30°C : 2/3 H₂O (vapeur) et 1/3 CO₂
 CO₂, CH₄ ↗ ⇒ T_s ↗

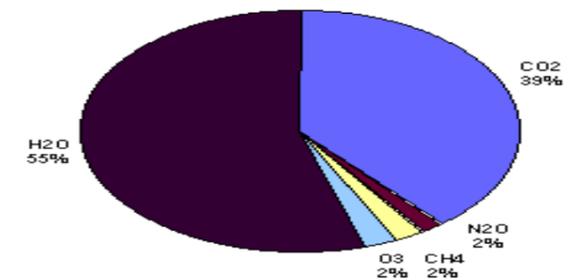
Rétroactions :
 Albédo neige/glace : amplification
 Vapeur d'eau : amplification
 Nuages : ?

Système complexe :
 Simulations numériques sur base de scenario d'évolution du CO₂
 Groupe Intergouvernemental d'Experts sur l'Evolution du Climat (GIEC)

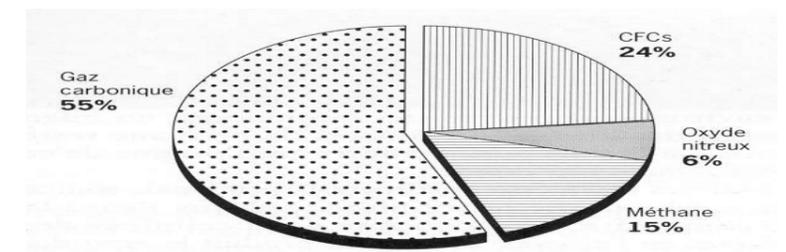


Contribution des différents gaz à effet de serres

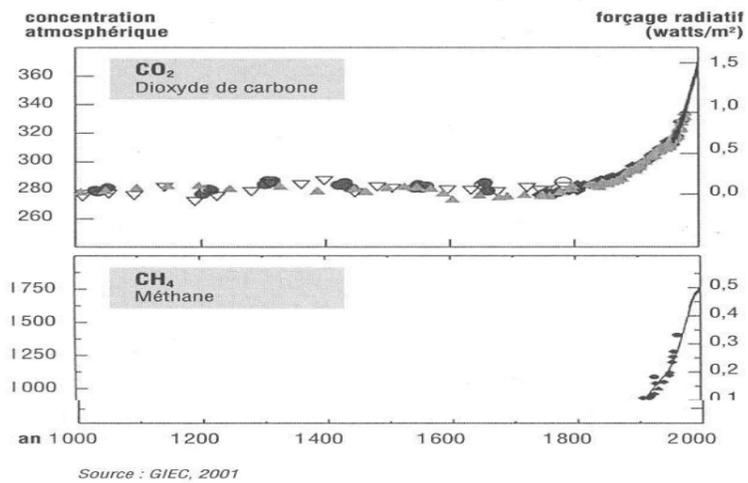
Effet de serre (W.m ⁻²):	
vapeur d'eau	100
gaz carbonique	50
méthane	1,7
ozone	1,3
oxyde nitreux	1,3



Perturbations anthropiques:



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 cahotique 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

Aérosols anthropiques

Les aérosols :

- Réfléchissent le rayonnement solaire
- Modifient la taille des gouttes des nuages
- Modifient la formation des précipitations ?

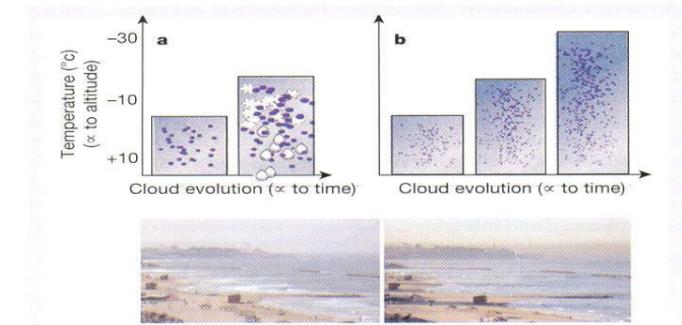
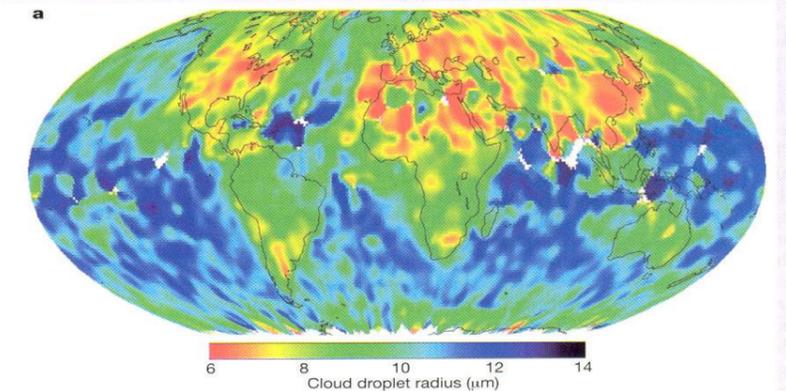


Figure 6 Schematic diagram of cloud formation in a clean and polluted atmosphere. **a**, In a clean atmosphere, the cloud droplet size increases with cloud development until liquid precipitation or glaciation and precipitation take place. **b**, In polluted clouds, the availability of cloud condensation nuclei decreases cloud droplet development. In clouds with strong updrafts the developed cloud can be supercooled with no glaciation down to -37.5 °C. The filled circles show the location of droplets of varying size, the asterisks show the location of ice crystals, and the oval shapes indicate rain drops.

Figure 7 Effect of aerosol on cloud droplet and reflectance derived from POLDER and AVHRR spaceborne measurements. **a**, Seasonal (March–May 1997) average droplet size in liquid water clouds estimated from the POLDER measurements³¹. **b**, The dependence of the droplet size on the aerosol index, also derived from POLDER over land (red) and ocean (blue). **c**, Analysis of AVHRR data for the dependence of the droplet size (purple) and cloud reflectance (brown and red) on aerosol optical thickness over the Amazon Basin during the dry burning season of 1987 (refs 16, 19). The reflectance of low-level clouds (brown) with reflectance of 0.35 increases with the aerosol concentration and the reflectance of bright clouds (red) decreases.



Source: Kaufman et al. 2002

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

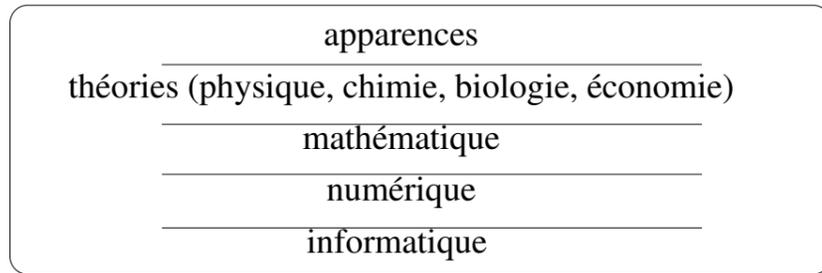
Augmenter la confiance :

- > 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 paléoclimatiques
- > 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



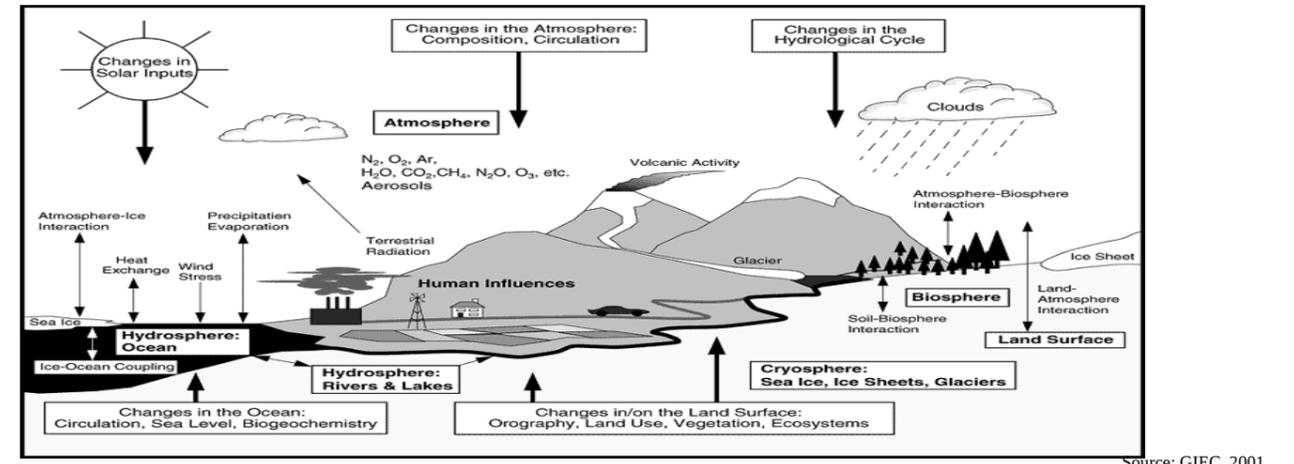
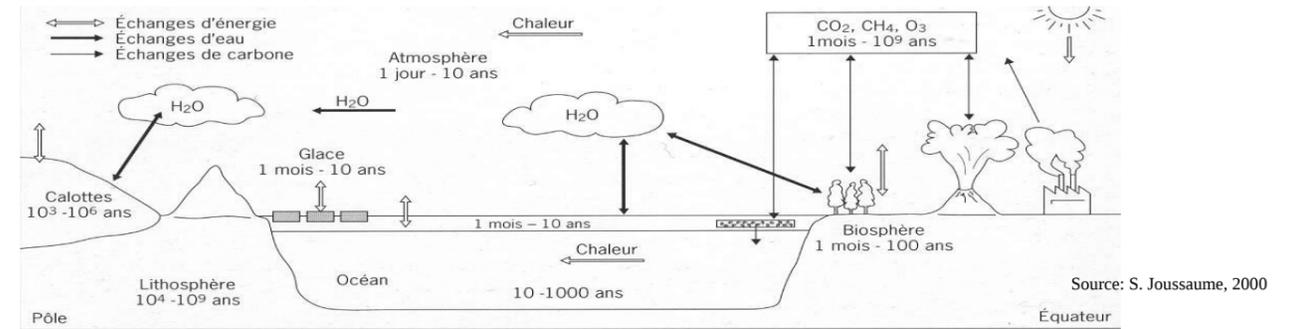
Les mathématiques constituent un langage commun.

La modélisation concerne l'ensemble de ces couches.

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

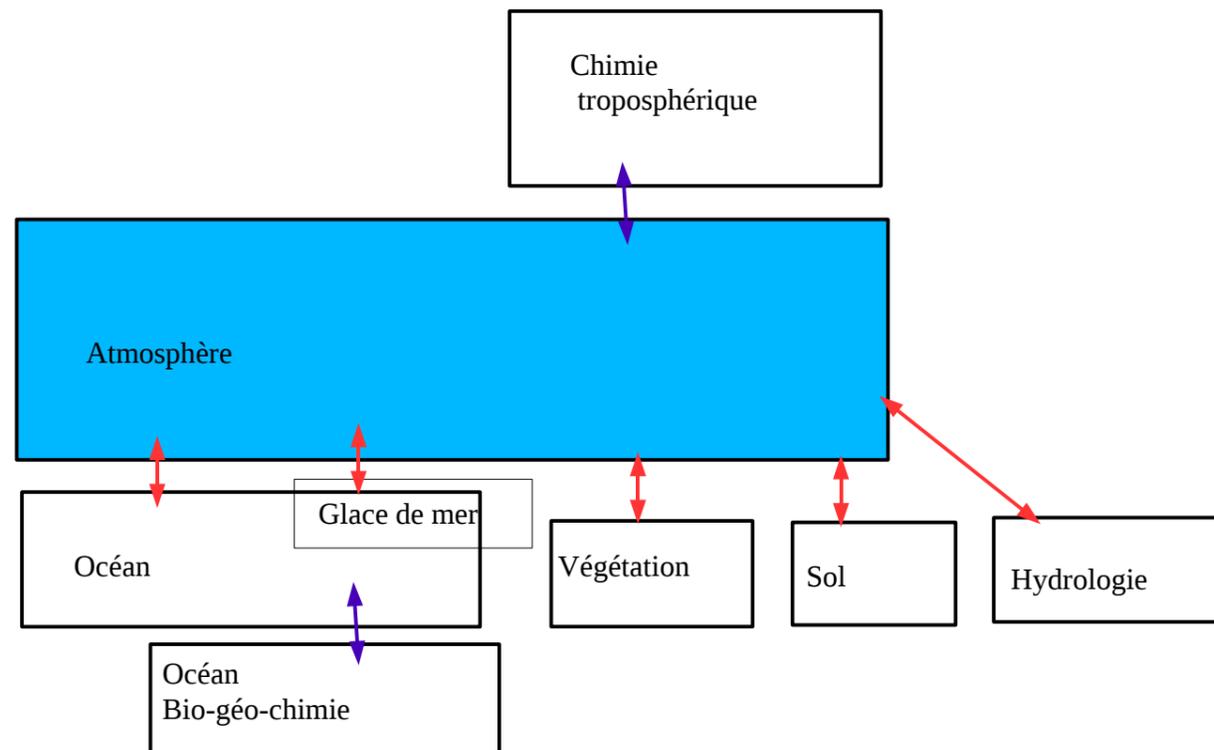
Il faut en même temps être capable de bien séparer ces différentes couches (savoir dans laquelle on se trouve).

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

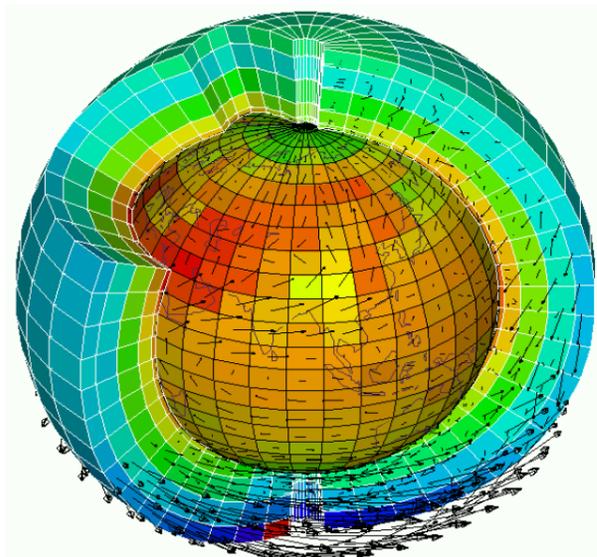
- Problématique du changement climatique
- Les principes de la modélisation du climat
- Modélisation d'un système complexe : découpage en sous systèmes.

II. Les modèles de circulation générale

- Les équations primitives
- Les 'paramétrisations' : principe et illustrations
- Prévion météorologique / modélisation du climat (Animation LMDZ, animation ETEX)

III. Illustrations

IV. Acquis et incertitudes sur le changement climatique



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'

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 :

$$\begin{cases} \partial_t \vec{V} = \underbrace{-(\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V}}_{\text{transport}} - \underbrace{\omega \partial_p \vec{V}}_{\text{gravity}} + \underbrace{\nabla \Phi}_{\text{Coriolis}} - \underbrace{f \vec{k} \times \vec{V}}_{\text{Coriolis}} + \vec{S}_V \\ \nabla \cdot \vec{V} + \partial_p \omega = 0 \\ \partial_t q = -\vec{V} \cdot \nabla q - \omega \partial_p q = S_q \end{cases}$$

$$\begin{cases} \Phi = gz \quad \text{geopotentiel} \\ \omega = \partial_t p \quad \text{vitesse vert.} \end{cases}$$

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

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.

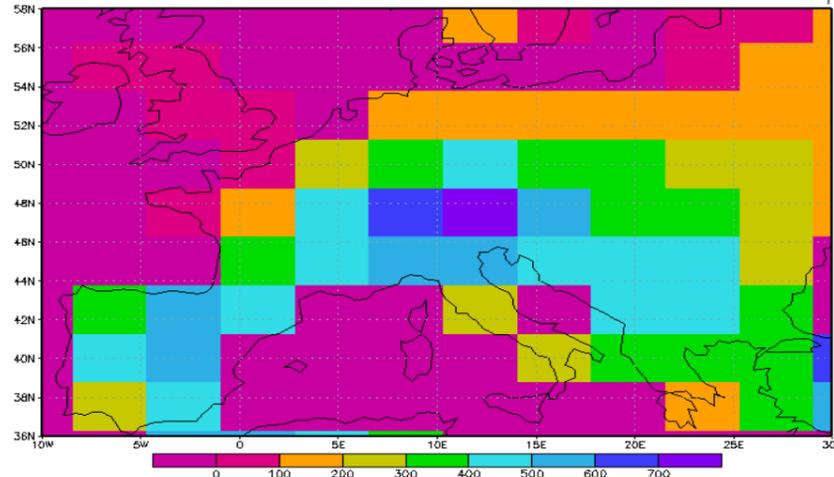
Les paramétrisations correspondent à nouveau à un découpage : cette fois-ci entre échelles explicitement représentées et échelles "sous-mailles".

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.

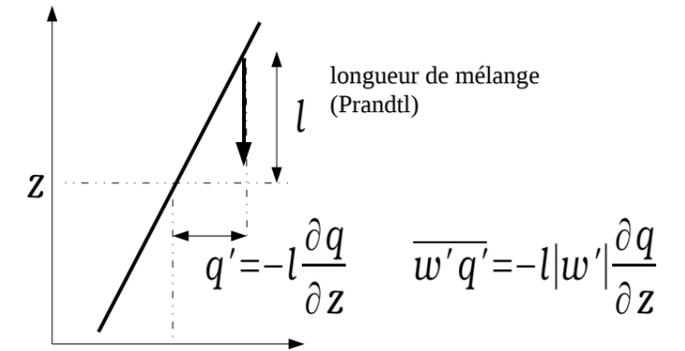
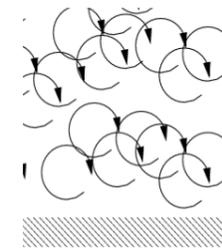
Note that snow is still a problem.

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



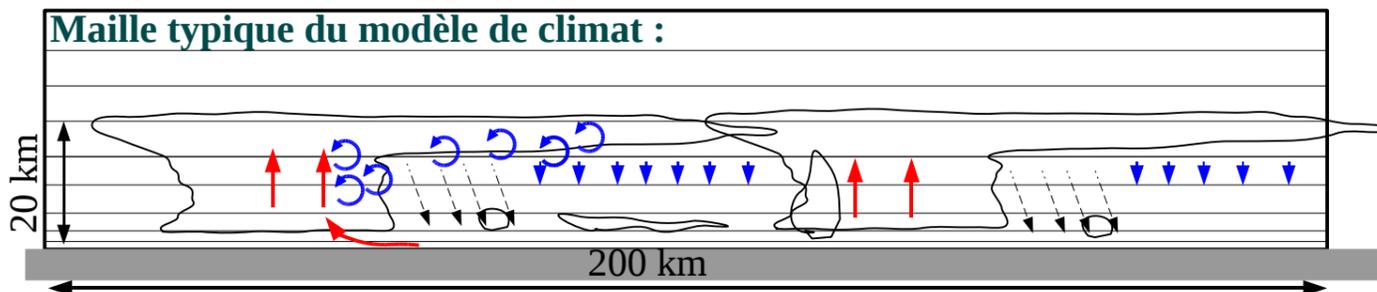
$$\frac{\partial q}{\partial t} = K_z \frac{\partial^2 q}{\partial z^2}$$

avec

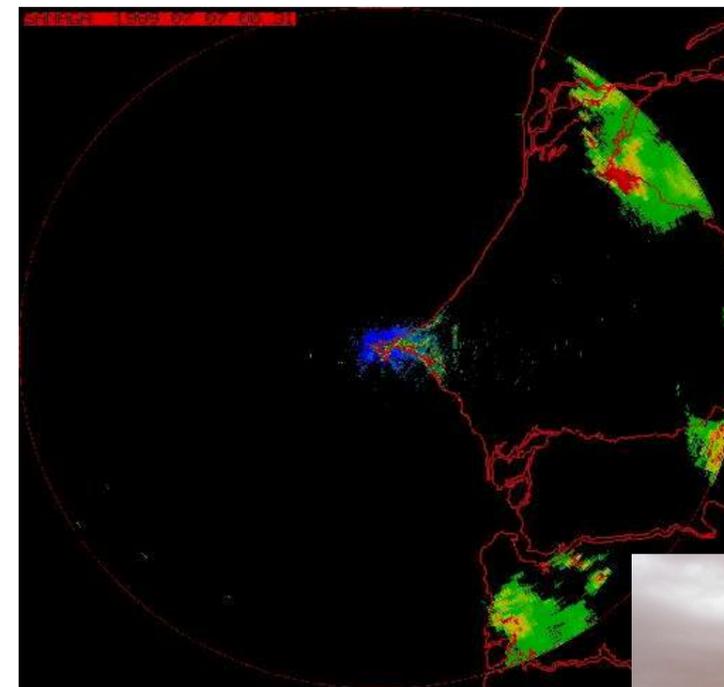
$$K_z = l|w'|$$

- Pas de temps de quelques minutes à une heure
- Grille horizontale : ~ 100-400 km
- Résolution verticale 100m (ou moins) près du sol et 1 à 2 km dans la troposphère libre.

Maille typique du modèle de climat :



-> **Paramétrisation** : réduire à quelques équations simples le comportement collectif des échelles non représentées explicitement dans le modèle.



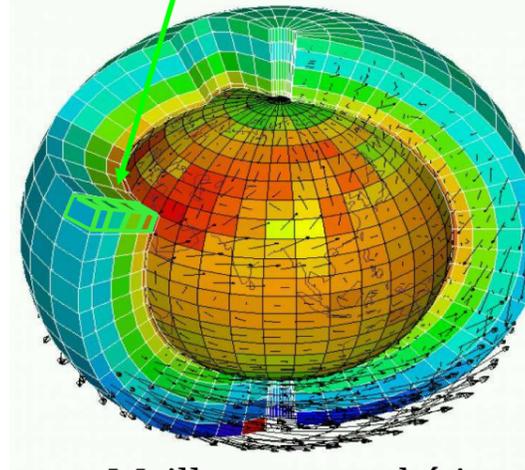
Equations de GCM atmosphérique (extraits)

Equations dynamiques en coordonnées pression

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

\vec{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



Maillage atmosphérique



Maillage océanique

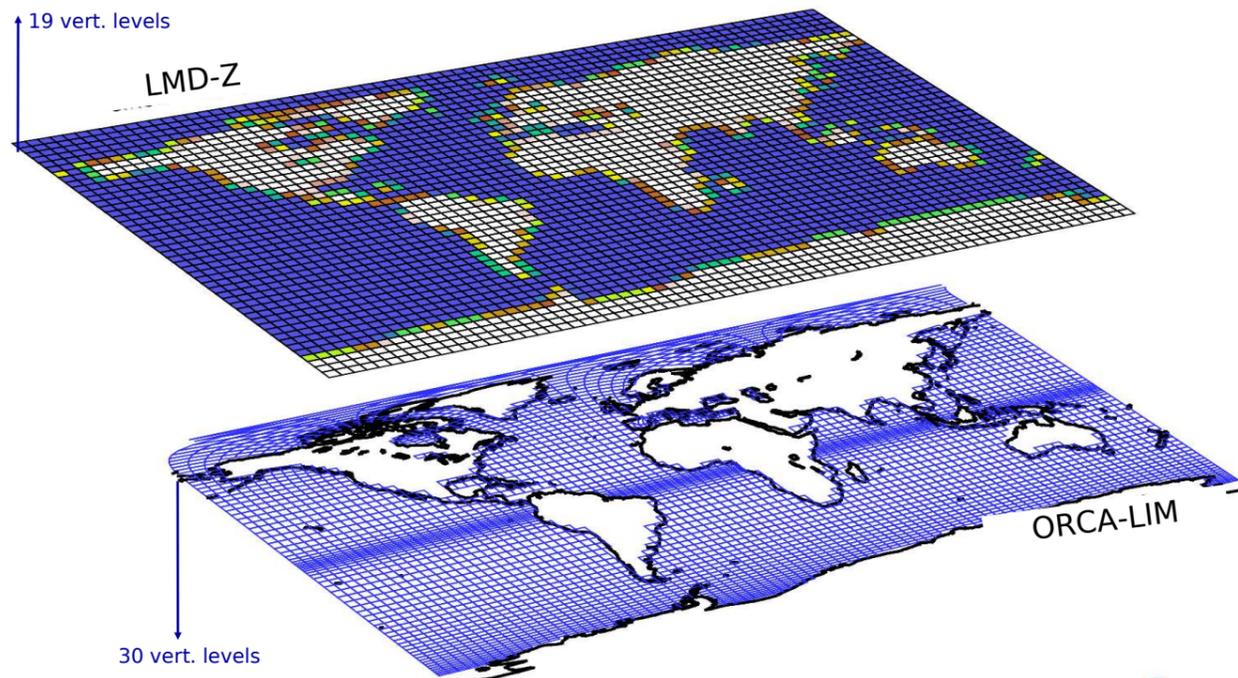
Modélisation numérique du climat :

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

Modèle de climat de l'IPSL :

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

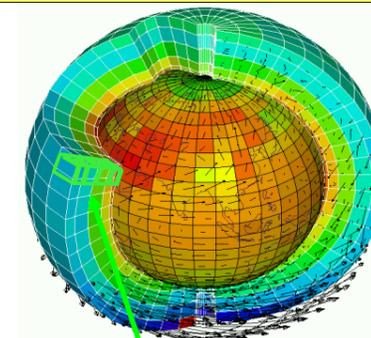
Couplage avec un modèle de circulation océanique Modèle climatique de l'IPSL



Atmospheric component of the IPSL integrated climate

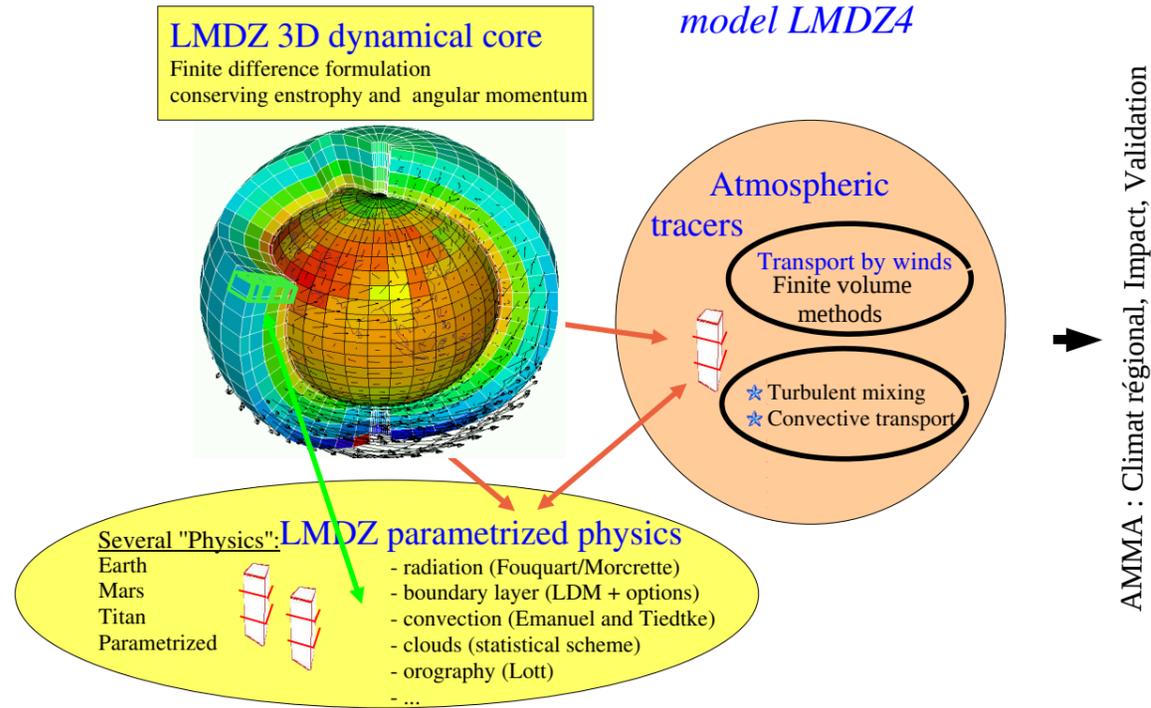
LMDZ 3D dynamical core
Finite difference formulation
conserving enstrophy and angular momentum

model LMDZA

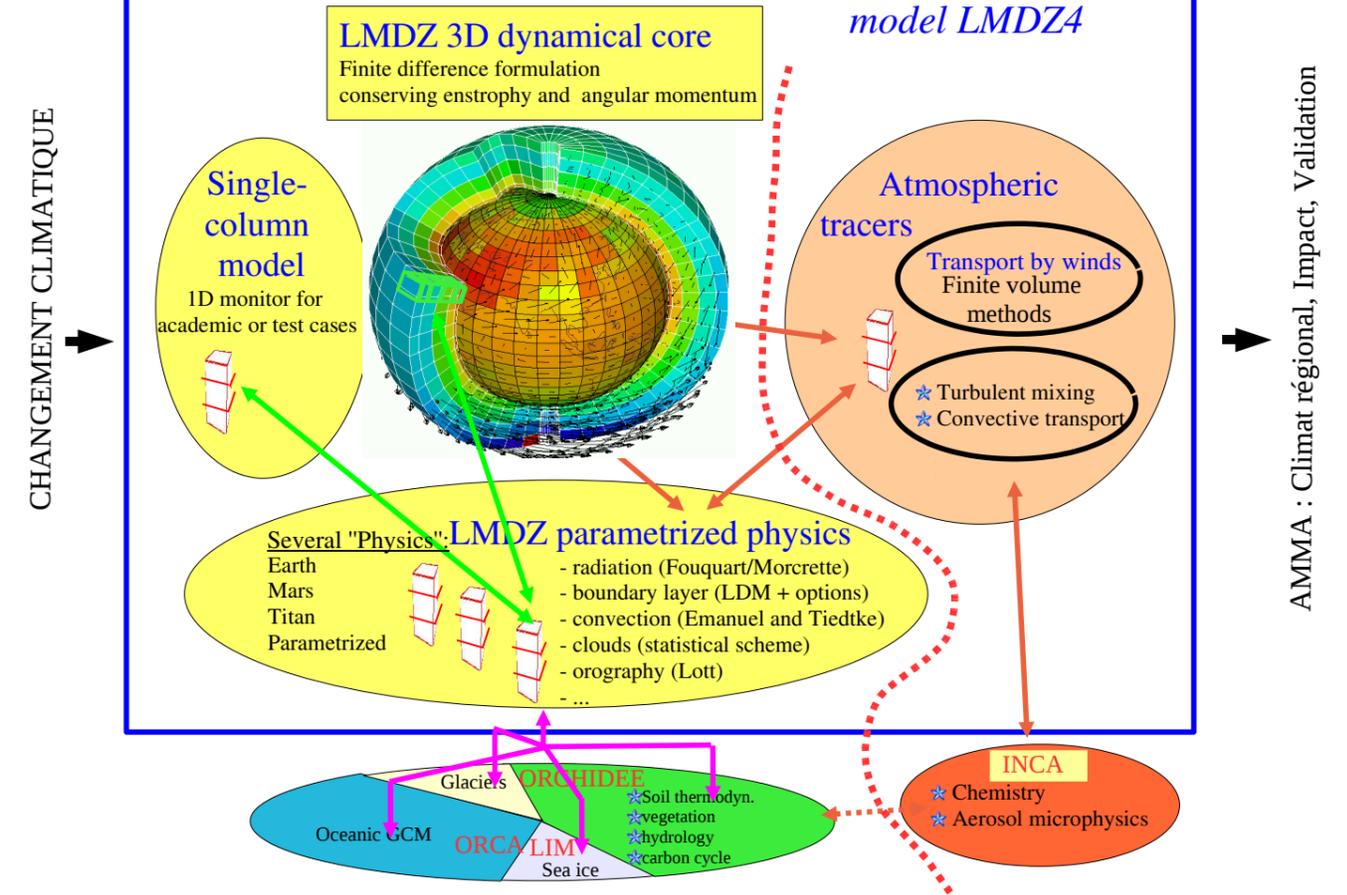


- Several "Physics": **LMDZ parametrized physics**
- Earth
 - Mars
 - Titan
 - Parametrized
- radiation (Fouquart/Morcrette)
 - boundary layer (LDM + options)
 - convection (Emanuel and Tiedtke)
 - clouds (statistical scheme)
 - orography (Lott)
 - ...

Atmospheric component of the IPSL integrated climate



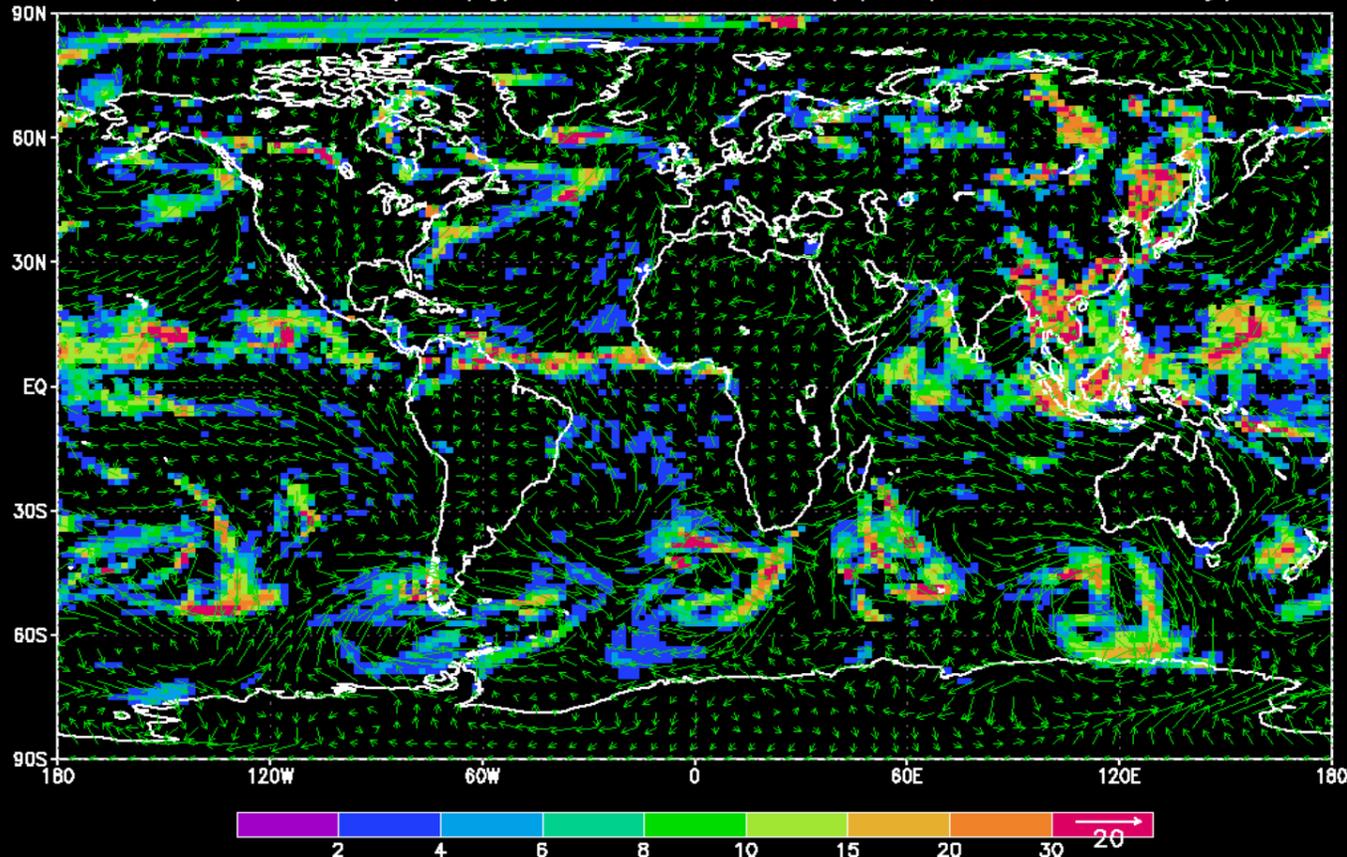
Atmospheric component of the IPSL integrated climate



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

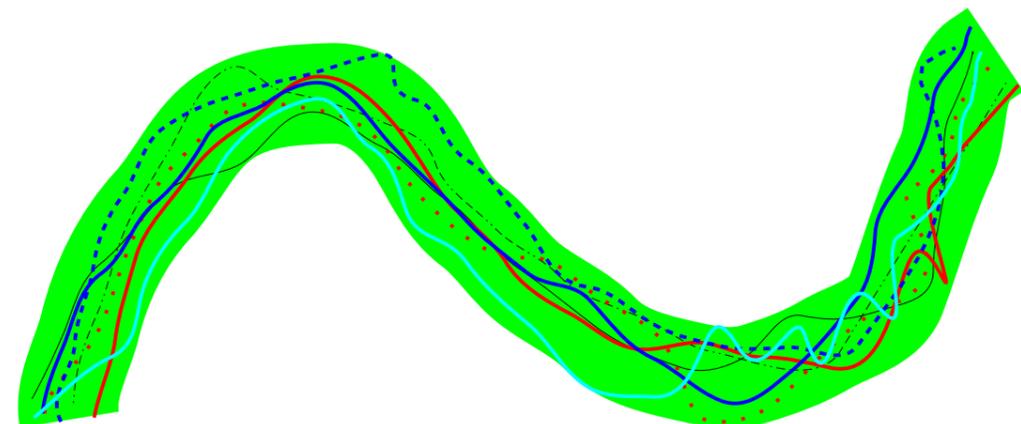
1 Aout

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

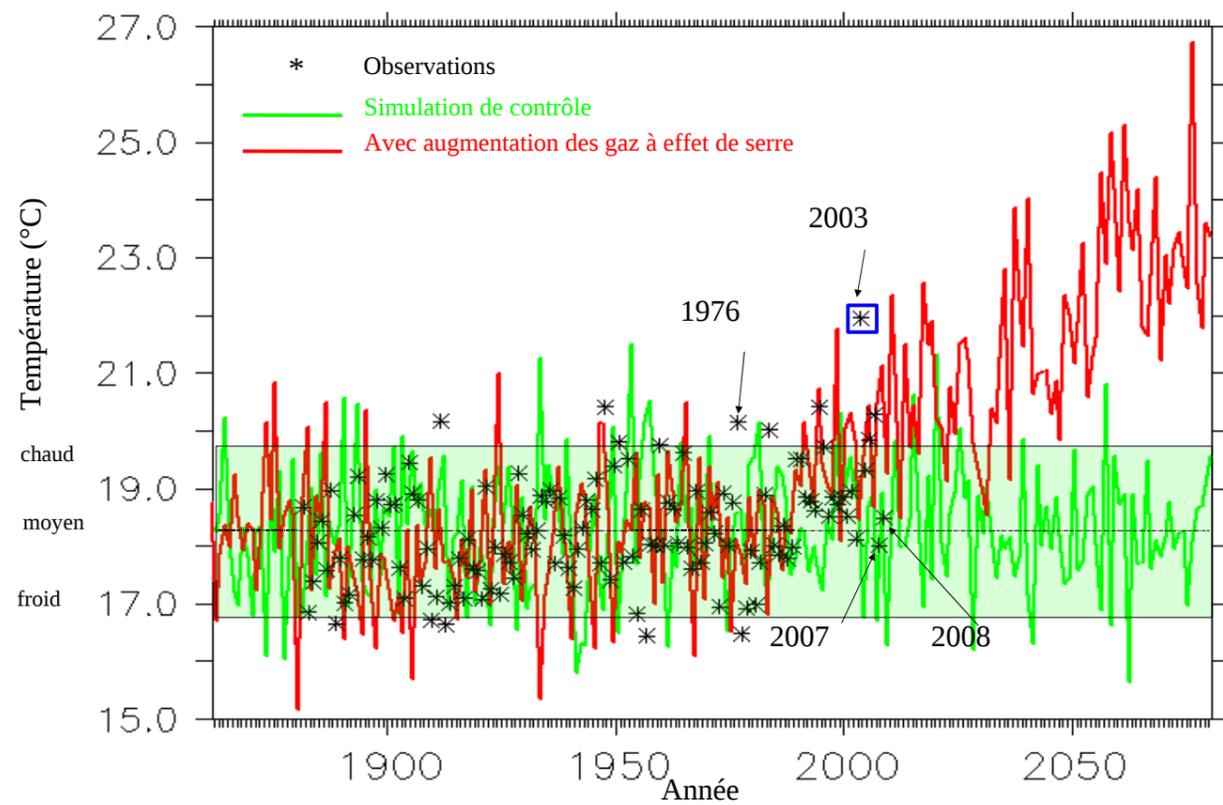


Modélisation du climat / prévision du temps

- **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).



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

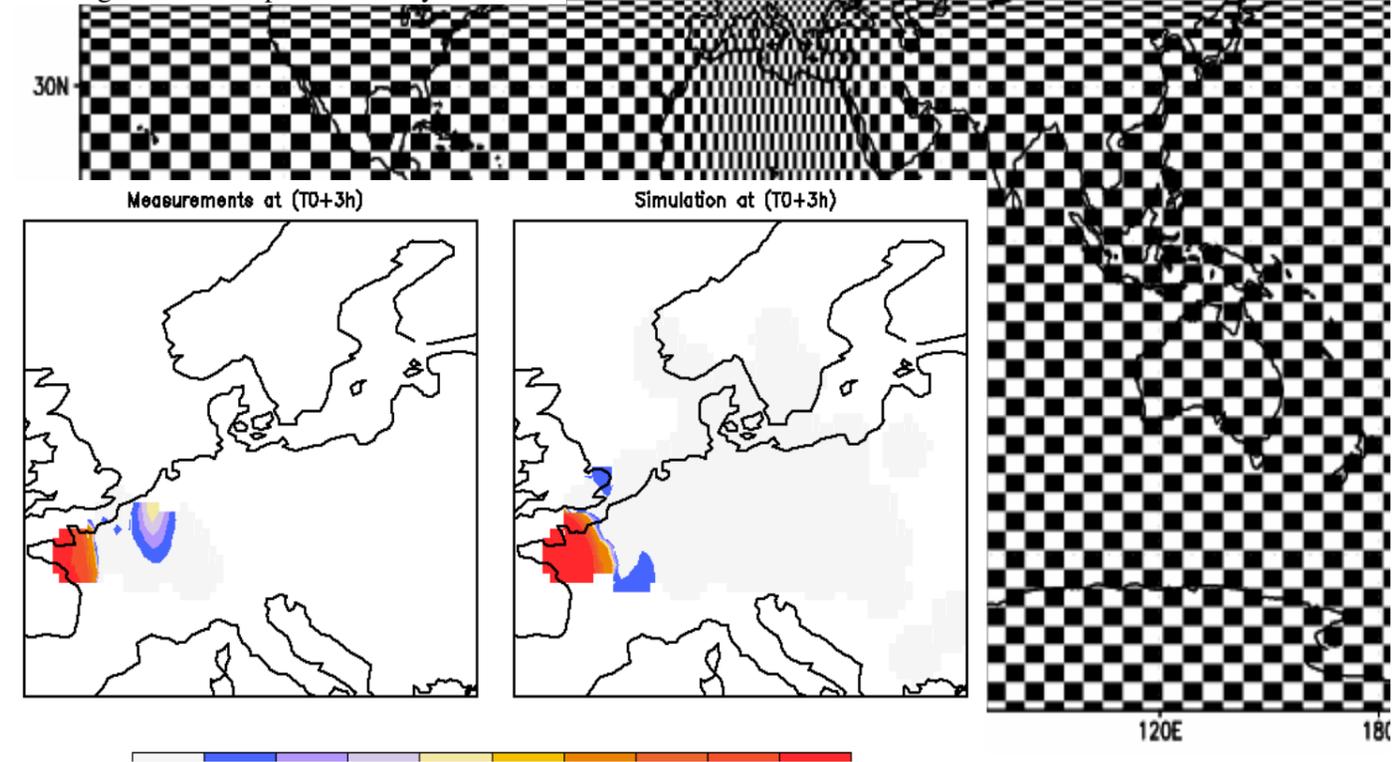


(Scenari SRESA2 du GIEC, modèle de l'IPSL)

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.
- 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 et d'analyser les couplages entre les processus.

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"



Résumé 2

- Au sein même d'un modèle de circulation atmosphérique, on peut distinguer deux sous-systèmes : (i) la Dynamique, dans la quelle on résoud 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.