

Modélisation numérique Océan/Atmosphère

Introduction

Frédéric Hourdin

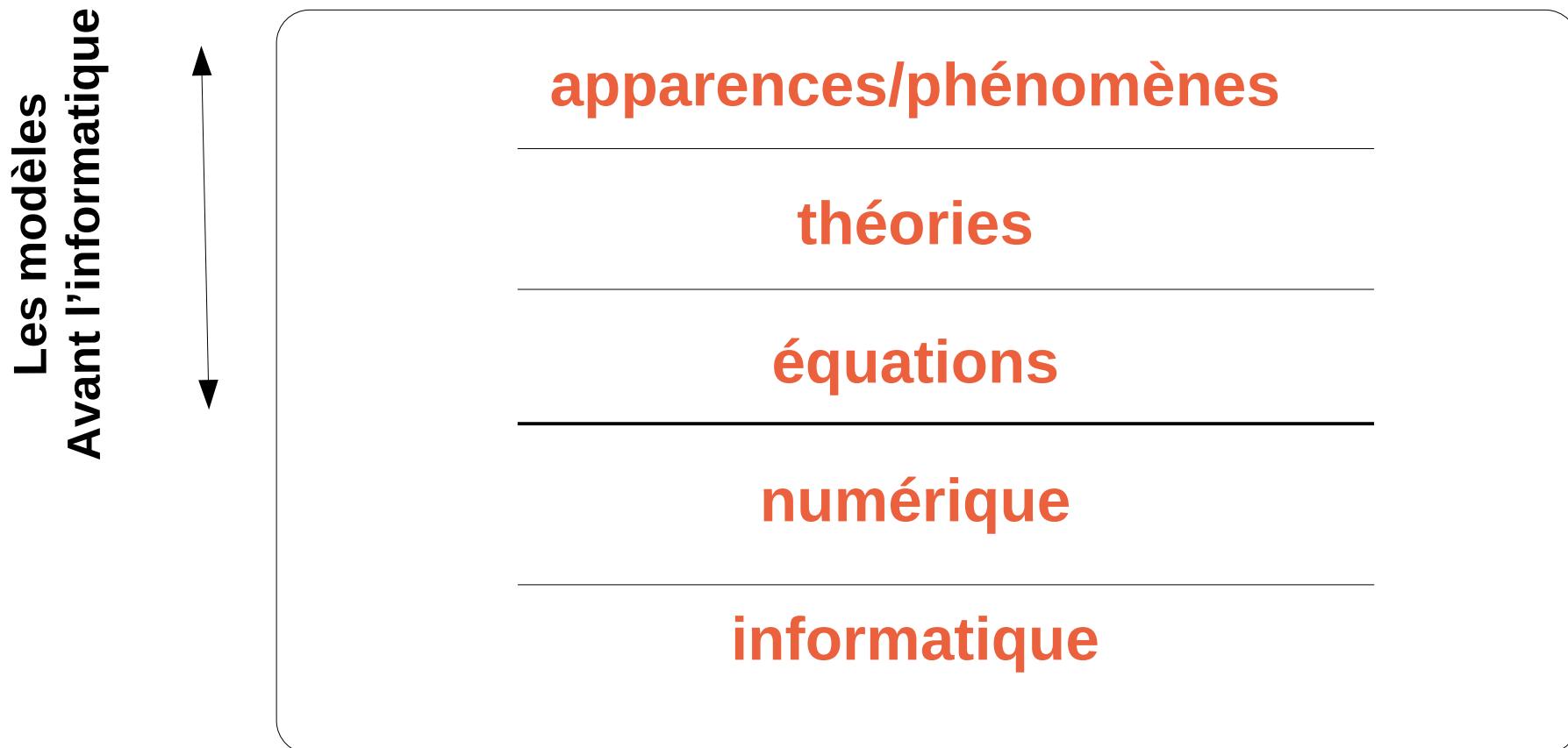
Laboratoire de Météorologie Dynamique / IPSL / UPMC

Responsable du développement du modèle global atmosphérique LMDZ
<http://www.lmd.jussieu.fr/~hourdin/COURS/ModnumOA/2025/>
frederic.hourdin@lmd.ipsl.fr

1. Des modèles parmi les modèles
2. Les modèles de circulation générale
3. Les modèles et leur utilisation

I. Modèles parmi les modèles

Les 5 couches/mondes de la modélisation numérique



Les 5 mondes.couches de la modélisation numérique

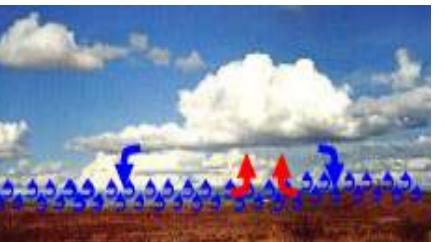
Exemple : mouvements turbulents

Les modèles avant l'ordinateur

apparences/phénomènes
tempêtes, cycle saisonnier des températures, réchauffement climatique



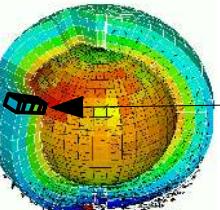
théories
Mécanique des fluides, circulation générale, échange rayonnement-matière, effet de serre, thermodynamique, *fonctionnement d'un ensemble de nuages*



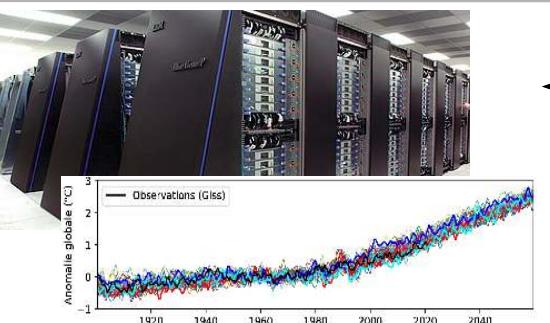
équations
Traduction mathématique de la physique, ex : Navier-Stokes
transfert radiatif
modèle statistique de nuage

$$\begin{aligned} \rho \frac{D\vec{V}}{Dt} &= -\nabla p + \rho \vec{g} + \mu \nabla^2 \vec{V} \\ \mu \frac{\partial I_v(r, \mu)}{\partial r} + \frac{1-\mu^2}{r} \frac{\partial I_v(r, \mu)}{\partial \mu} &= -\kappa_v(r) I_v(r, \mu) - \bar{s}_v(r) I_v(r, \mu) \\ &\quad + \eta_v^{\text{ind}}(r) I_v(r, \mu) + \eta_v^{\text{sp}}(r) \\ \alpha_c = \int_0^\infty Q(s) ds &+ \frac{1}{4\pi} \int_{-1}^{+1} \int_0^{2\pi} I_v(r, \mu') s_v(r, \mu, \mu'; \phi, \phi') d\mu' d\phi' \\ Q(s) &= (1 - \alpha_{th}) f(s, s_{\text{env}}, \sigma_{\text{env}}) + \alpha_{th} f(s, s_{th}, \sigma_{th}) \\ f(s, \bar{s}, \sigma_s) &= \frac{1}{\sigma_s \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(s - \bar{s})^2}{2\sigma_s^2}\right) \end{aligned}$$

numérique
Modèles point de grille ou spectraux, schémas numériques



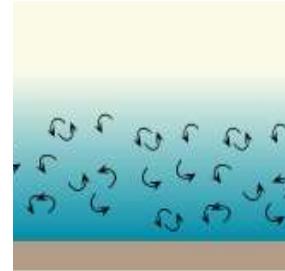
informatique
Algorithmes, boucles, langages, optimisation, adaptation aux calculateurs, post-traitements



Mouvements de l'air désordonnés à petite échelle, bourrasques de vent.
... vus par Van Gogh

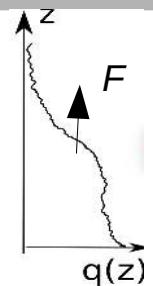


Mélange d'une espèce q (vapeur d'eau, polluant) émise en surface par des mouvements turbulents de l'air



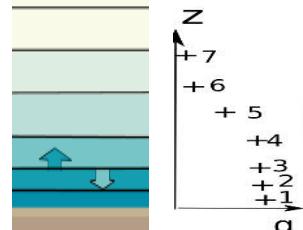
Eq. de la diffusion turbulente : flux turbulent proportionnel au gradient de la quantité

$$F_q(z) = -K_z \frac{\partial q}{\partial z}$$



Transfert entre les couches 2 et 3 par la turbulence

$$F_{2 \rightarrow 3} = K_{2 \rightarrow 3}^*(q_2 - q_3)$$



Code informatique

```
do iv=1,nv ! Boucle sur les niveaux verticaux
  do ih=1,nh ! Boucle sur la grille horizontale
    Fq(ih,iv)=Kz(ih,iv)*(q(ih,iv)-q(ih,iv+1))
  enddo
enddo
```

Le monde des simulations numériques

I. Modèles parmi les modèles

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

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 processus particulier (modèle de Lorentz mettant en évidence la nature chaotique de la météo, modèles 1D d'équilibre radiatifs, etc ...)
- **Modélisation tri-dimensionnelle « « « réaliste » » ».**

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

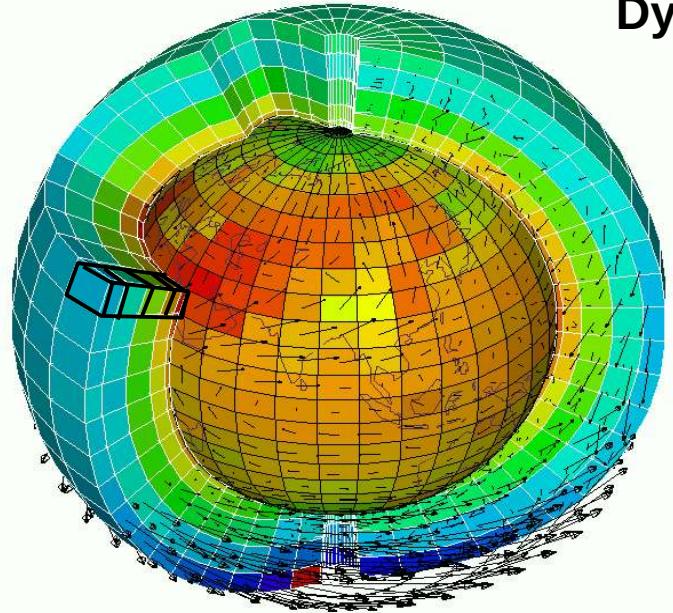
- De type encyclopédique
- Tentative d'exhaustivité
- Recherche du “réalisme”
- Construits à partir de principes physiques

Philosophie générale

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

II. Les modèles de circulation générale

Dynamique des fluides sur la sphère



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

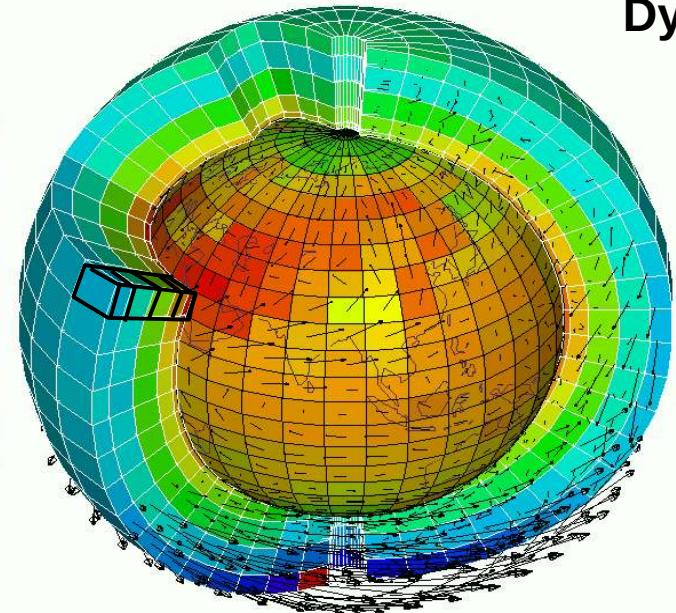
Passage au monde numérique : modèles en points de grille et modèles spectraux.

Résolu jusqu'à une certaine échelle :

- typiquement qq 100 km pour les modèles globaux de climat
- quelques dizaines de m à qq km pour des modèles régionaux ou des études de processus.

Remarques sur l'acronyme MCG ou GCM : Modèles de climat global ou de circulation générale

II. Les modèles de circulation générale



Dynamique des fluides sur la sphère

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

Passage au monde numérique : modèles en points de grille et modèles spectraux.

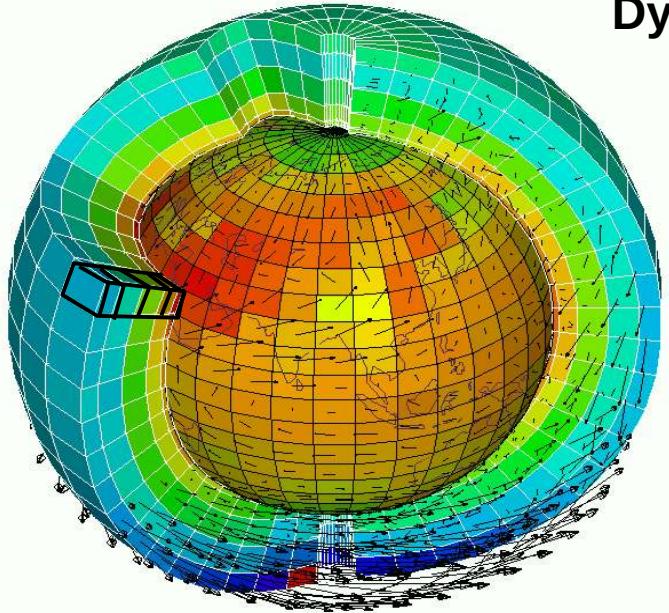
Résolu jusqu'à une certaine échelle :

- typiquement qq 100 km pour les modèles globaux de climat
- quelques dizaines de m à qq km pour des modèles régionaux ou des études de processus.



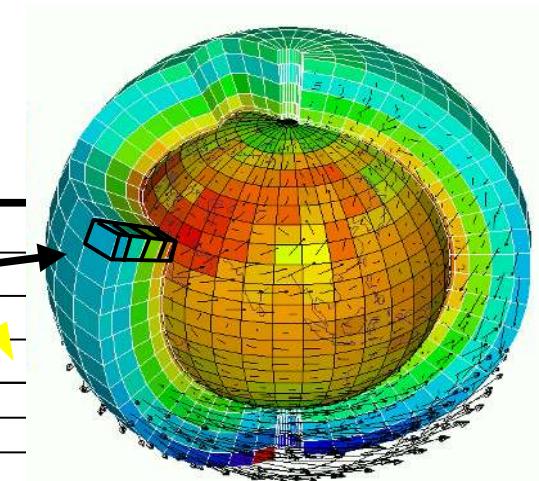
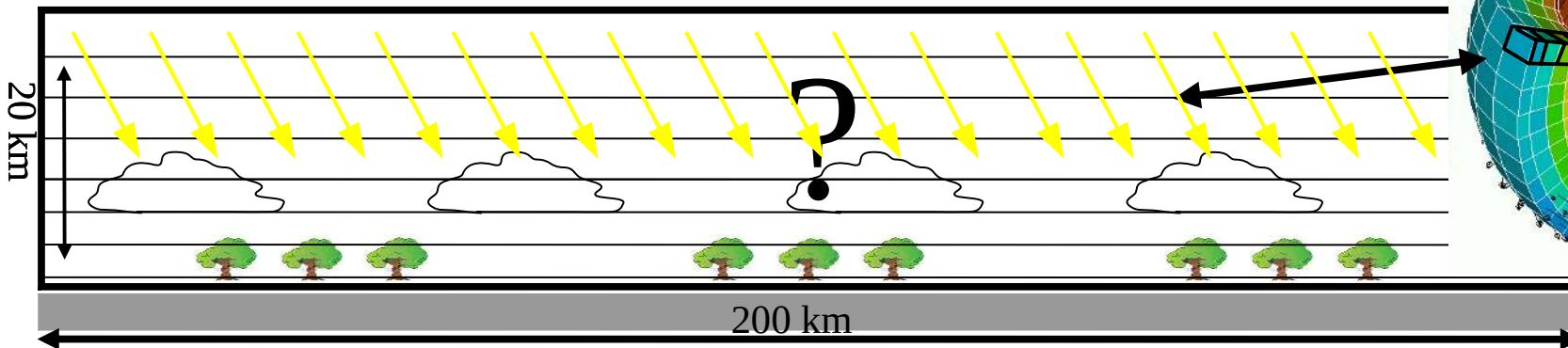
II. Les modèles de circulation générale

Dynamique des fluides sur la sphère



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

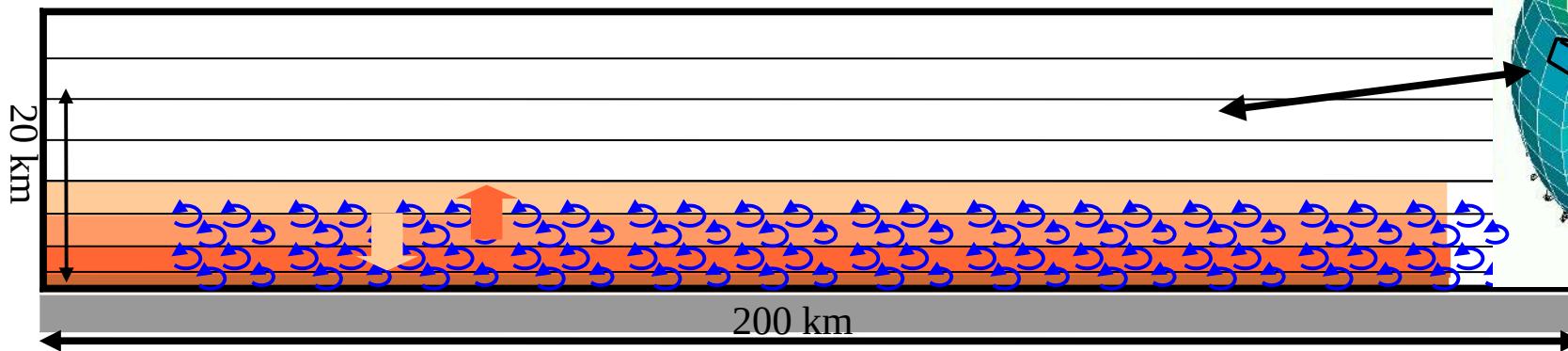
Dans une colonne du modèle ...



Objet des paramétrisations : rendre compte de l'effet des processus non résolus par ces équations
→ **Termes « sources » des équations de conservation ci-dessus**

II. Les modèles de circulation générale

Dans une colonne du modèle ...



Paramétrisation de la turbulence



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

→ « Mélange turbulent » ou diffusion turbulente.
Transport par des petits mouvements aléatoires.
Analogue 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 : $K_z = l \sqrt{e}$

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

$$Dl/dt = \dots$$

Un monde en soi ...

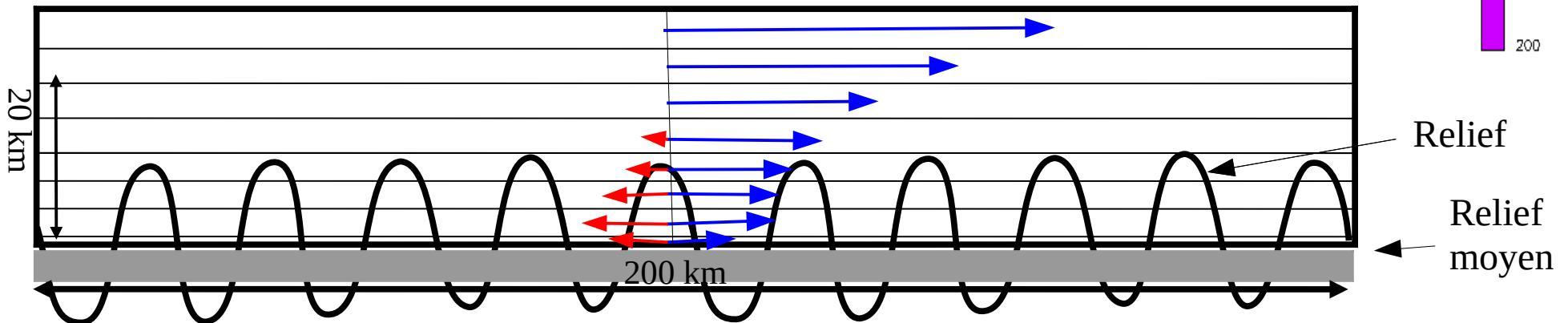
II. Les modèles de circulation générale

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.

$$\underline{DU}/Dt + (1/\rho) \underline{\text{grad}} p - g + 2 \Omega \wedge \underline{U} = \underline{F}$$

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



Dans les modèles actuels, on rend compte en plus :

- du freinage dans les basse couches

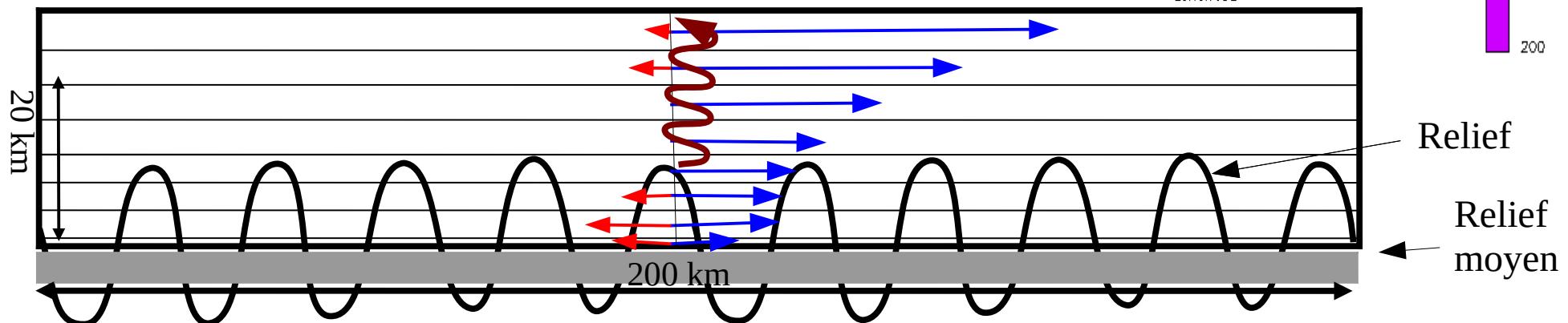
II. Les modèles de circulation générale

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.

$$\underline{DU}/Dt + (1/\rho) \underline{\text{grad}} p - g + 2 \Omega \wedge \underline{U} = \underline{F}$$

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



Dans les modèles actuels, on rend compte en plus :

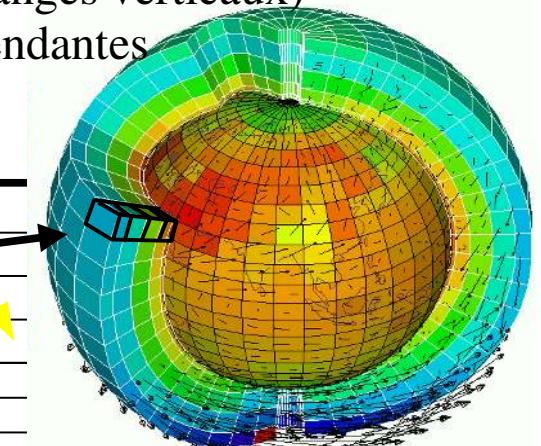
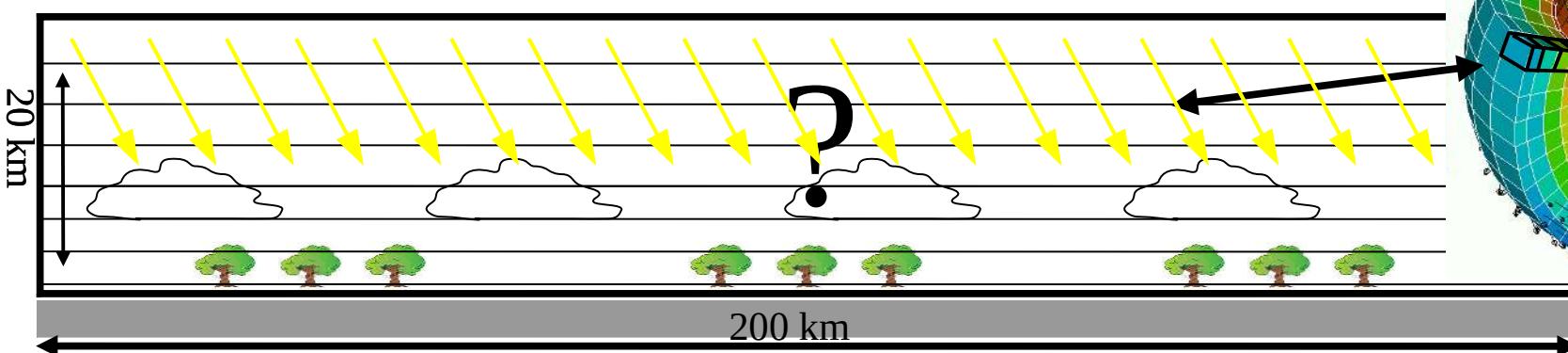
- du freinage dans les basse couches
- de l'injection d'ondes (de gravité) dans l'atmosphère → freinage plus haut dans l'atmosphère
- de l'effet de détournement du relief
- d'un effet de détournement lié à la compression verticale de la vorticité au dessus des reliefs
- de l'effet de la stabilité de l'atmosphère (franchissement plus facile dans une atmosphère moins stratifiée)

II. Les modèles de circulation générale



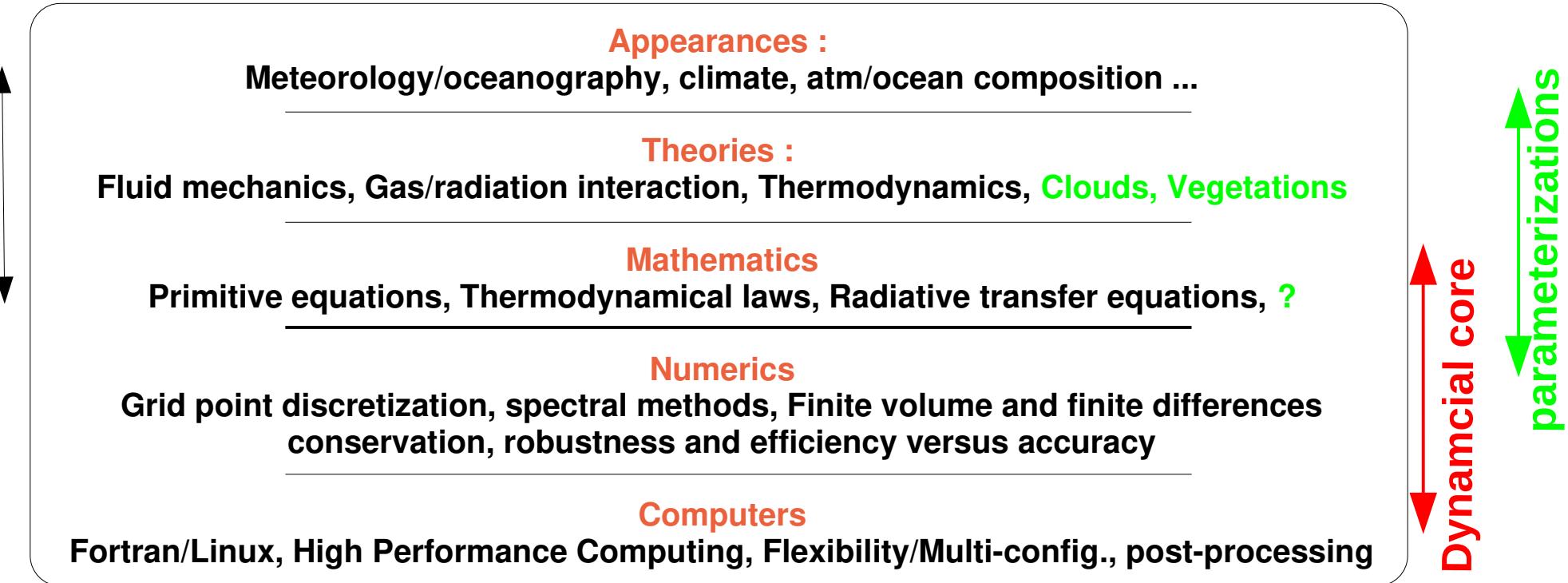
- Calcul de l'**effet collectif des processus non résolus sur les variables d'état explicites (\underline{U} , θ , q)** du modèle global
- **description physique approchée** du comportement collectif des processus
- qui fait intervenir des **variables internes aux paramétrisations** (caractéristiques 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 → **variables internes** → E , Q , Sq → \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)
 - Equations uni-dimensionnelles en z (échanges verticaux)
 - Colonnes atmosphériques indépendantes

Dans une colonne du modèle ...



II. Les modèles de circulation générale

Before computers



Dynamical core :

Well established physics and equations. Work on approximations, numerics, HPC

Parameterizations :

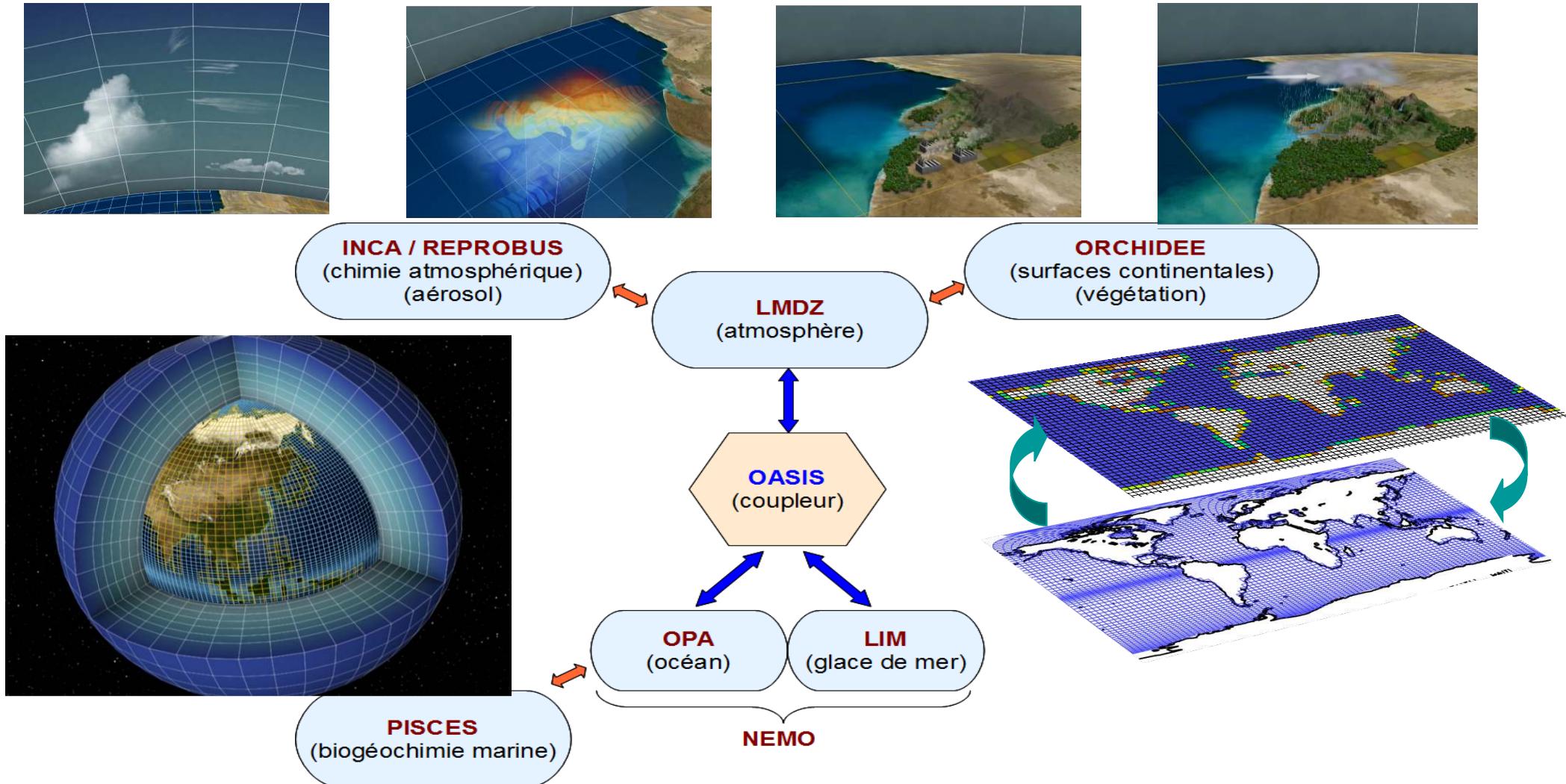
Based on combinations of theories, heuristic approaches, and conservation laws.
Many ways possible. Strong diversity across models

General comments :

- Modeling concerns all the layers. Lot of expert knowledge required and shared.
- Be aware of the layer in which you are working, or at which transition between layers.¹²
- Do not forget that your goal is to explain things in the first layer

II. Les modèles de circulation générale

Le modèle couplé "Système Terre" de l'IPSL



Des modèles développés

- au fil du temps (dizaines d'années)
- équipes (5-10 équipes de 5-20 personnes) autour d'un même modèle de climat.
- Avec un aller retour constant entre développement et évaluation.

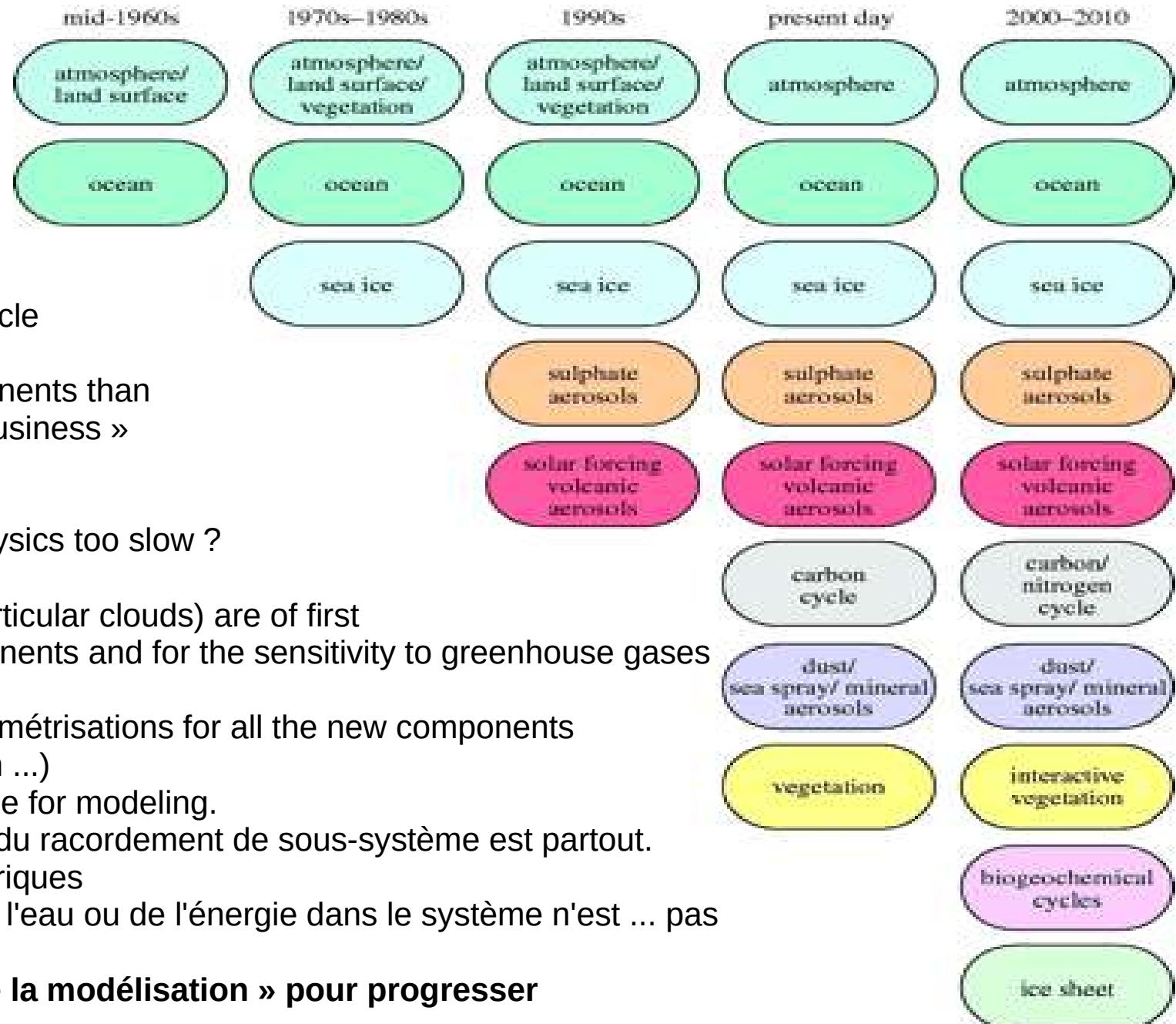
Philosophie générale (Définie par Charney en 1950) :

- travailler avec des modèles incomplets et imparfaits et les améliorer pas à pas.

II. Les modèles de circulation générale

1980 – 2010 Priority given to model complexification

From General Circulation Model → Coupeld Global Climate model → Earth System Models



Motivated by long term
climate variations and CO₂ cycle

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

But :

- improvement on model physics too slow ?
- strong biases persist
- atmospheric physics (in particular clouds) are of first order for climate other components and for the sensitivity to greenhouse gases
- Importance of physics paramétrisations for all the new components (radiation, rainfall, evaporation ...)
- Coupling itself is a challenge for modeling.

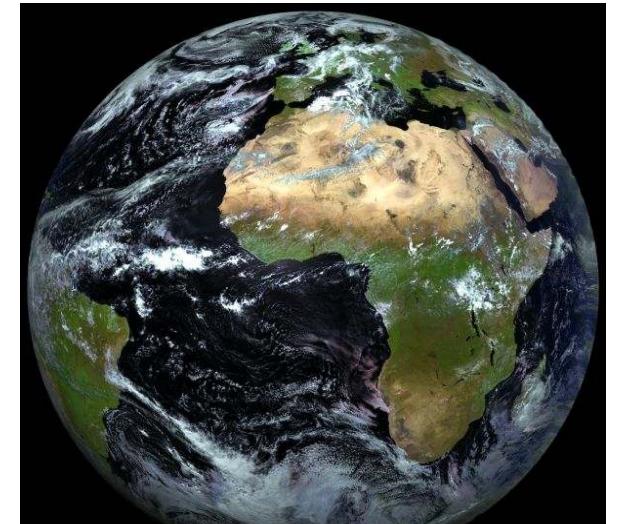
La question du découpage et du raccordement de sous-système est partout.

Questions physiques et numériques

- Garantir la conservation de l'eau ou de l'énergie dans le système n'est ... pas trivial ...
- **Besoin d'une « culture de la modélisation » pour progresser**

III. Les modèles et leurs utilisations

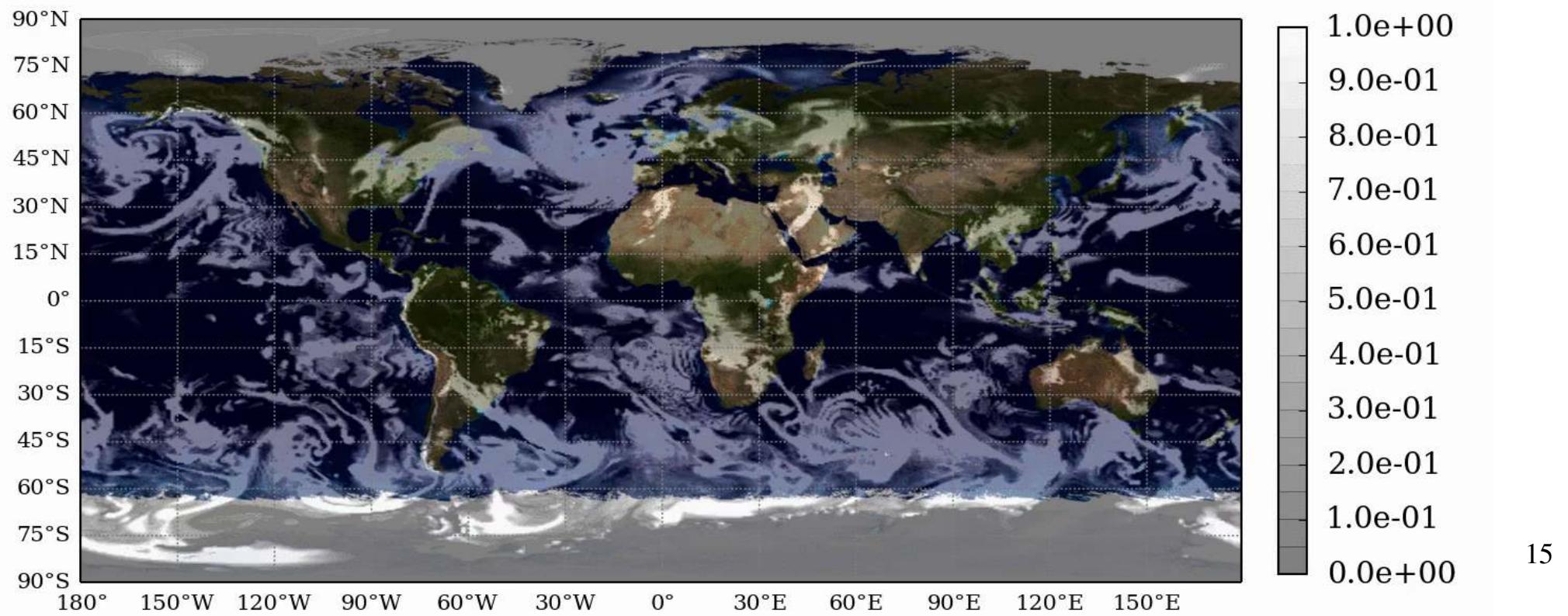
Image méteosat



Simulation des nuages sur un mois

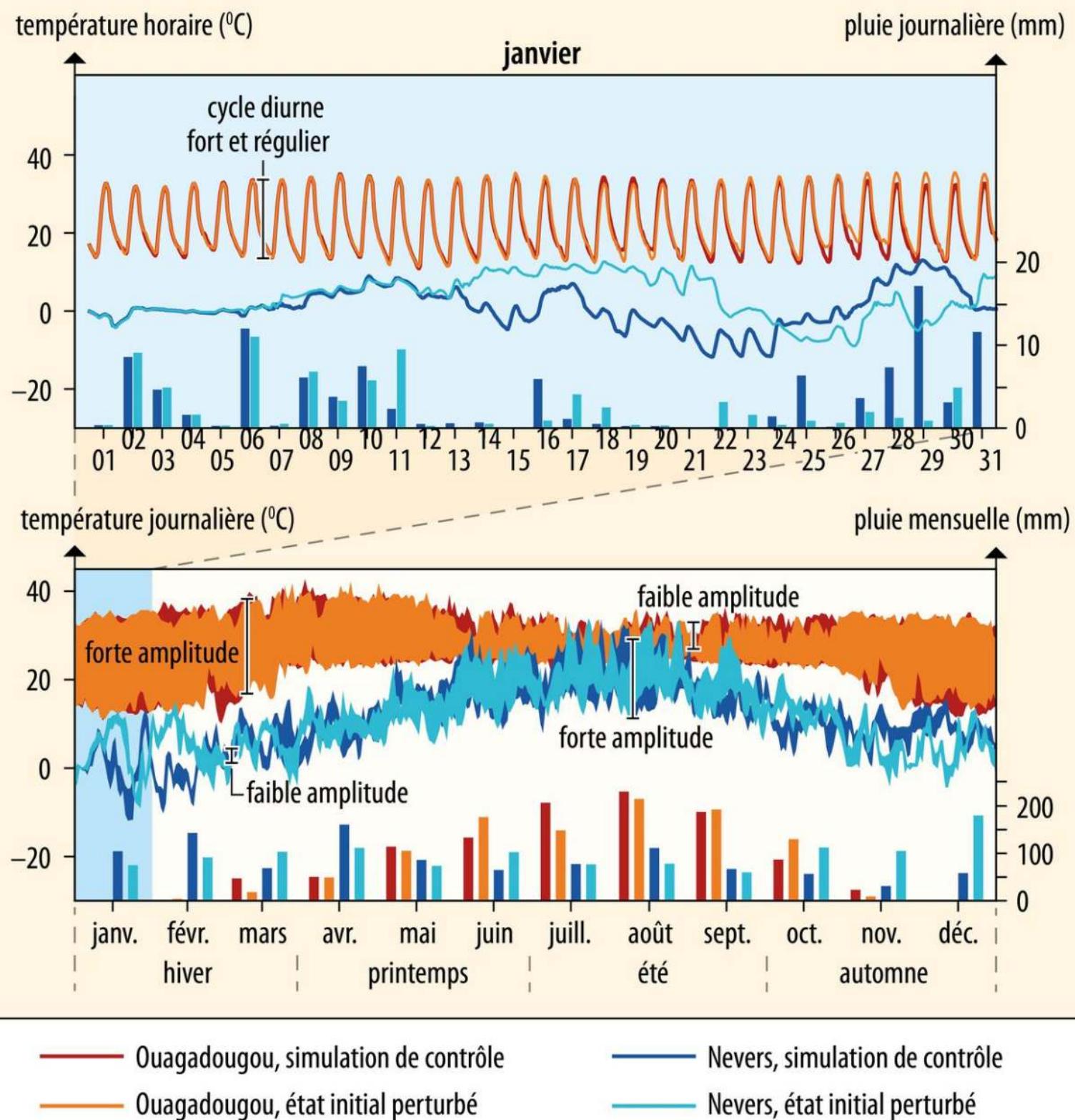
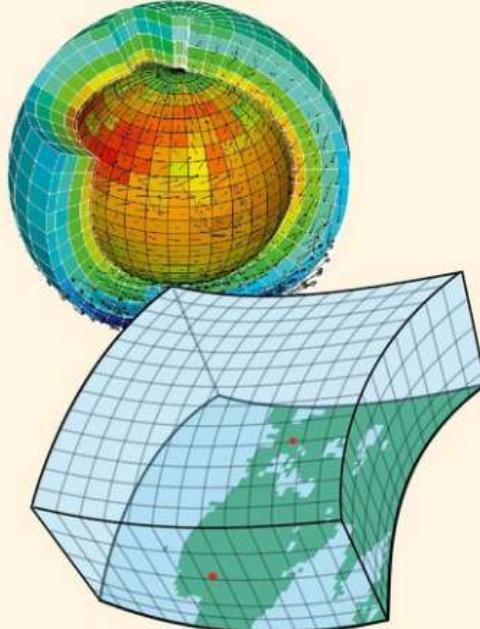
Avec le modèle LMDZ, résolution horizontale 50km

Modèles de climat = modèles de prévisions météo



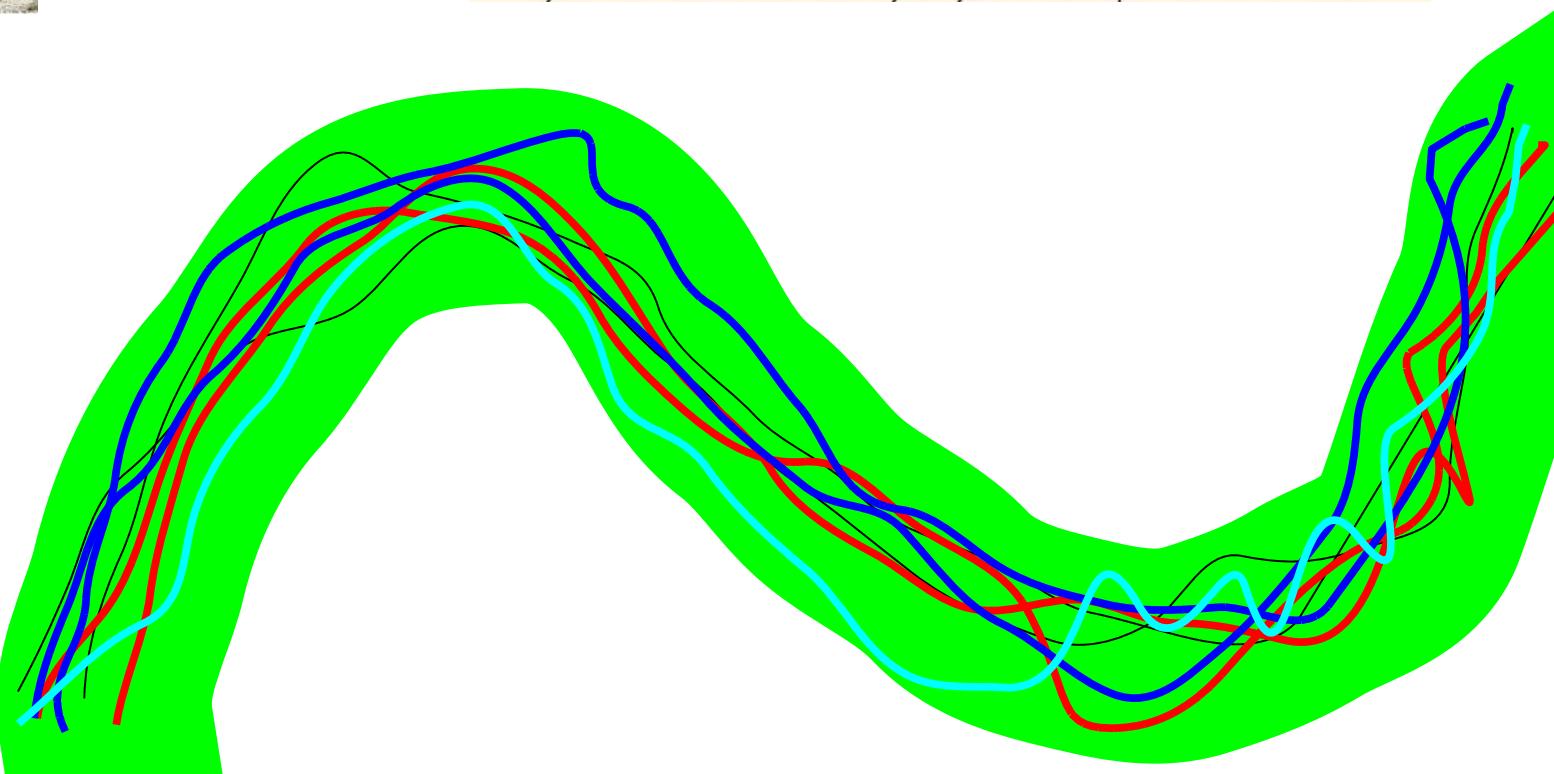
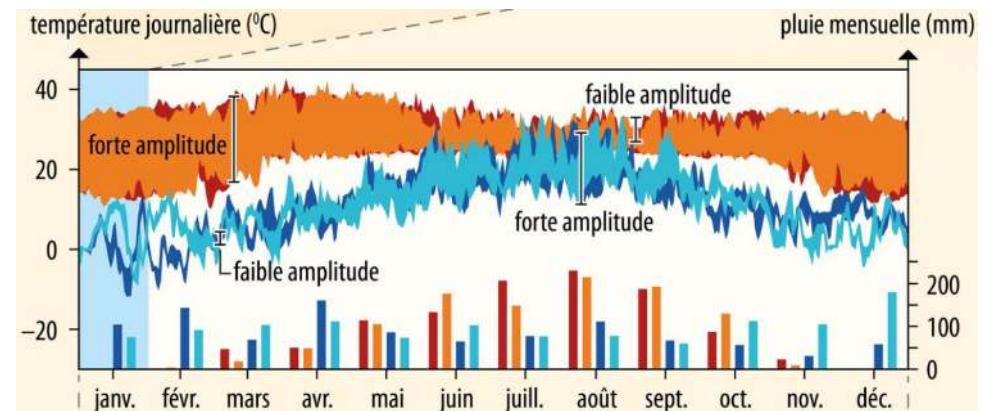
Expérience type Lorenz avec le modèle du LMD

Perturbation de 0.1°C des températures initiales.



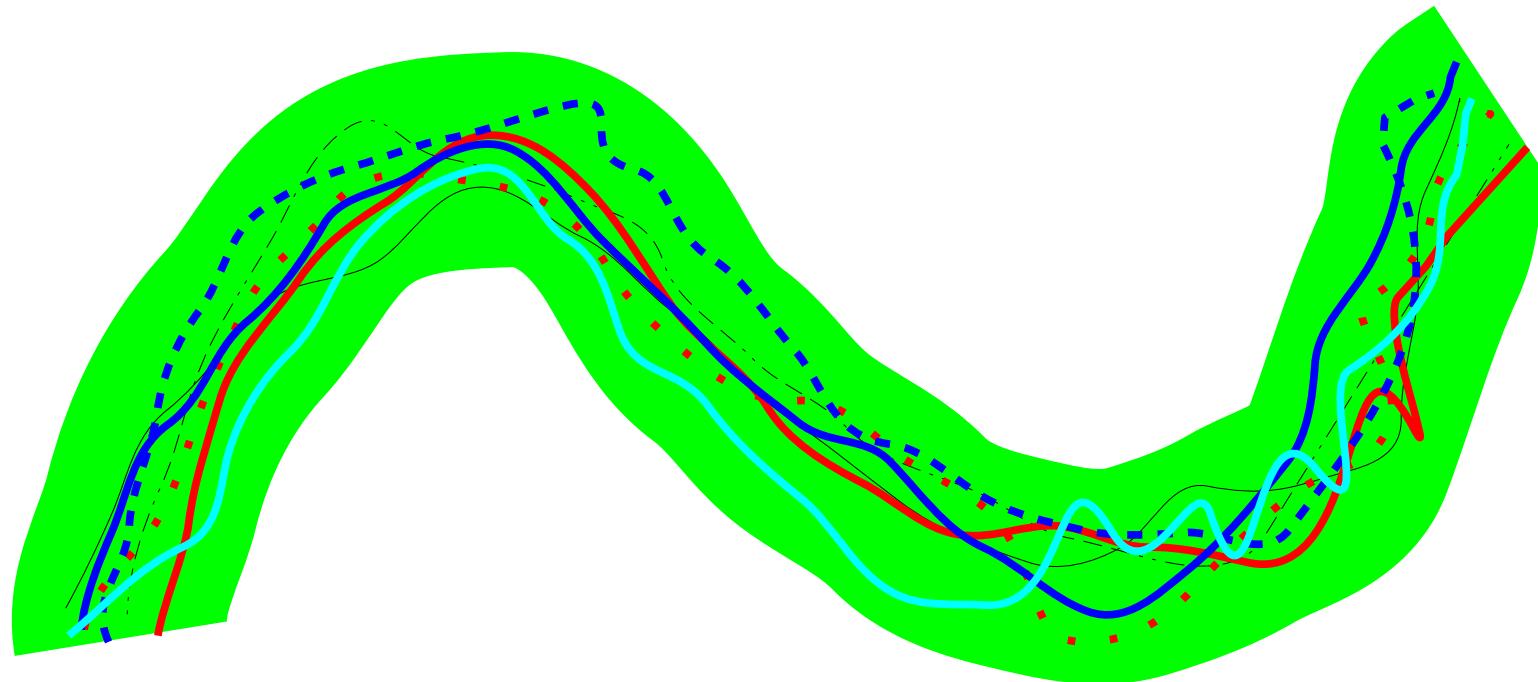
Comment prévoir le climat si on ne prévoit pas la météo à 15 jours ?

Personnes se promenant dans un chemin
ou ... billes lancées du haut d'un toboggan aquatique
ou ... évolution de la température à Paris sur 1 an



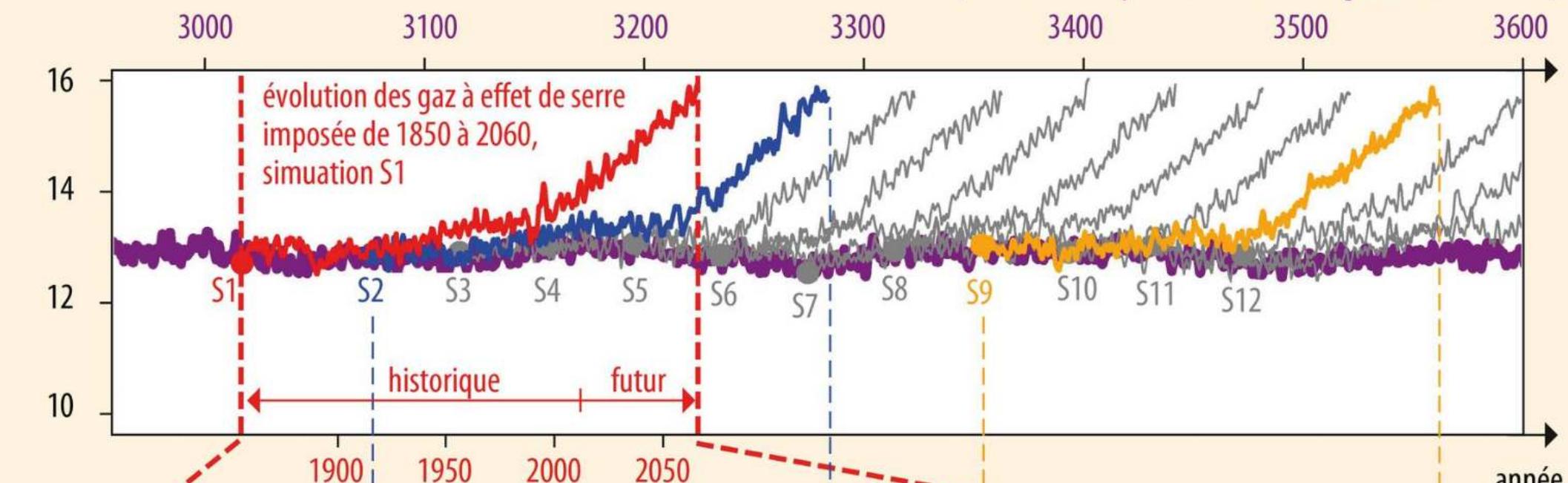
III. Les modèles et leurs utilisations

	Climate modeling	Numerical Weather Forecast
Models	Identical (more couplings)	Identical (higher resolution)
Initial state	any	“analysis” obtained from an “assimilation” of observations within a model.
Simulation length	decades to centuries	15 days (Seasonal forecast in between)
Prediction	statistical (ex : mean temperature, internal variability of precipitation, heat waves) Strange attractor = climate	deterministic (the weather tomorrow at a given location)



température globale ($^{\circ}\text{C}$)

année de la simulation de contrôle
(concentration pré-industrielle des gaz à effet de serre)



anomalie globale ($^{\circ}\text{C}$)

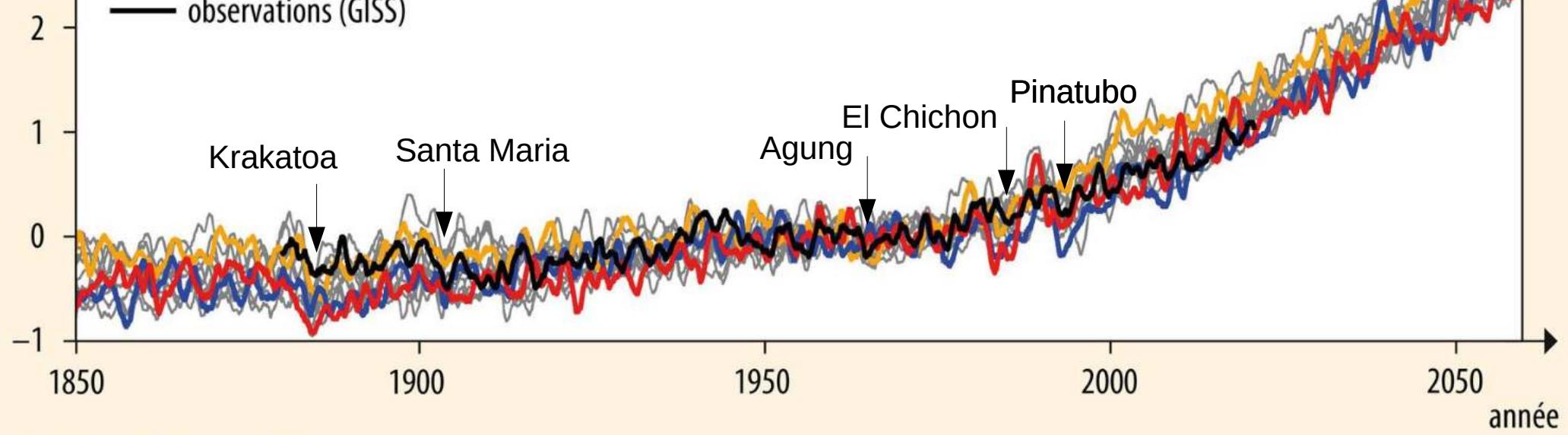
observations (GISS)

Krakatoa

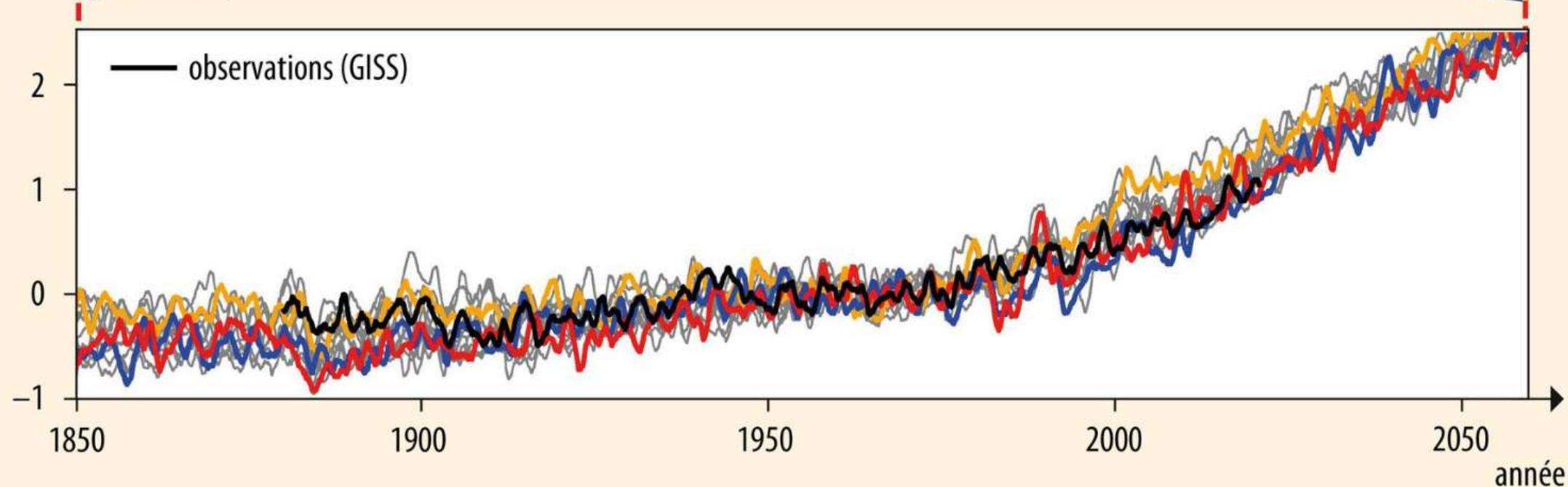
Santa Maria

Agung
El Chichon

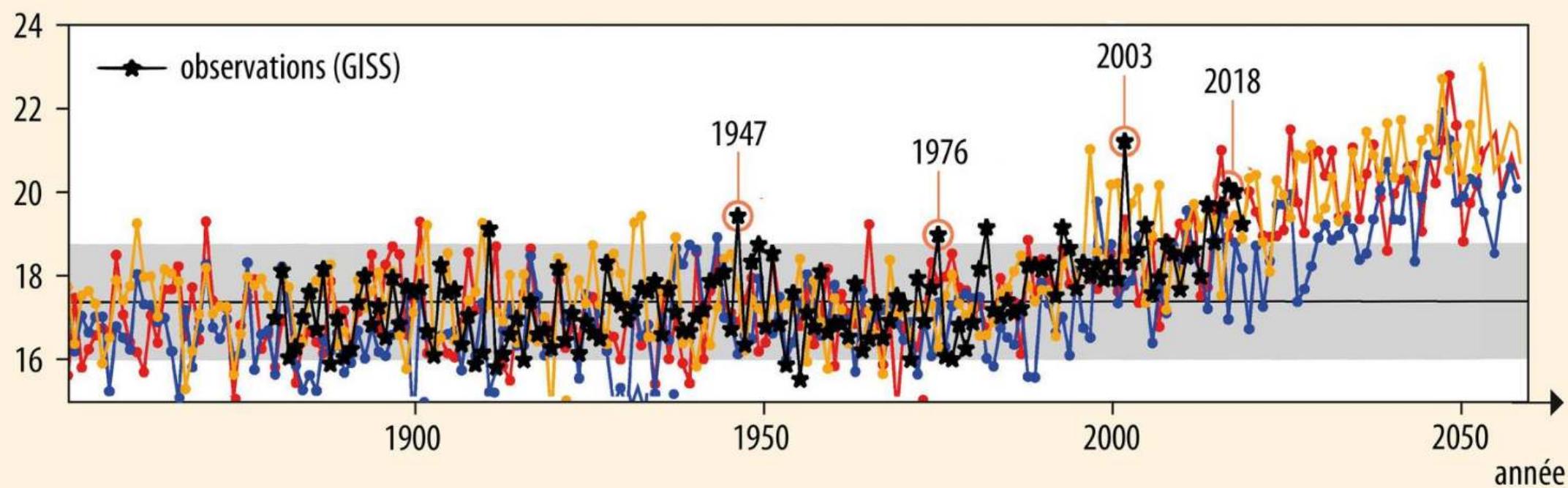
Pinatubo



anomalie globale ($^{\circ}\text{C}$)

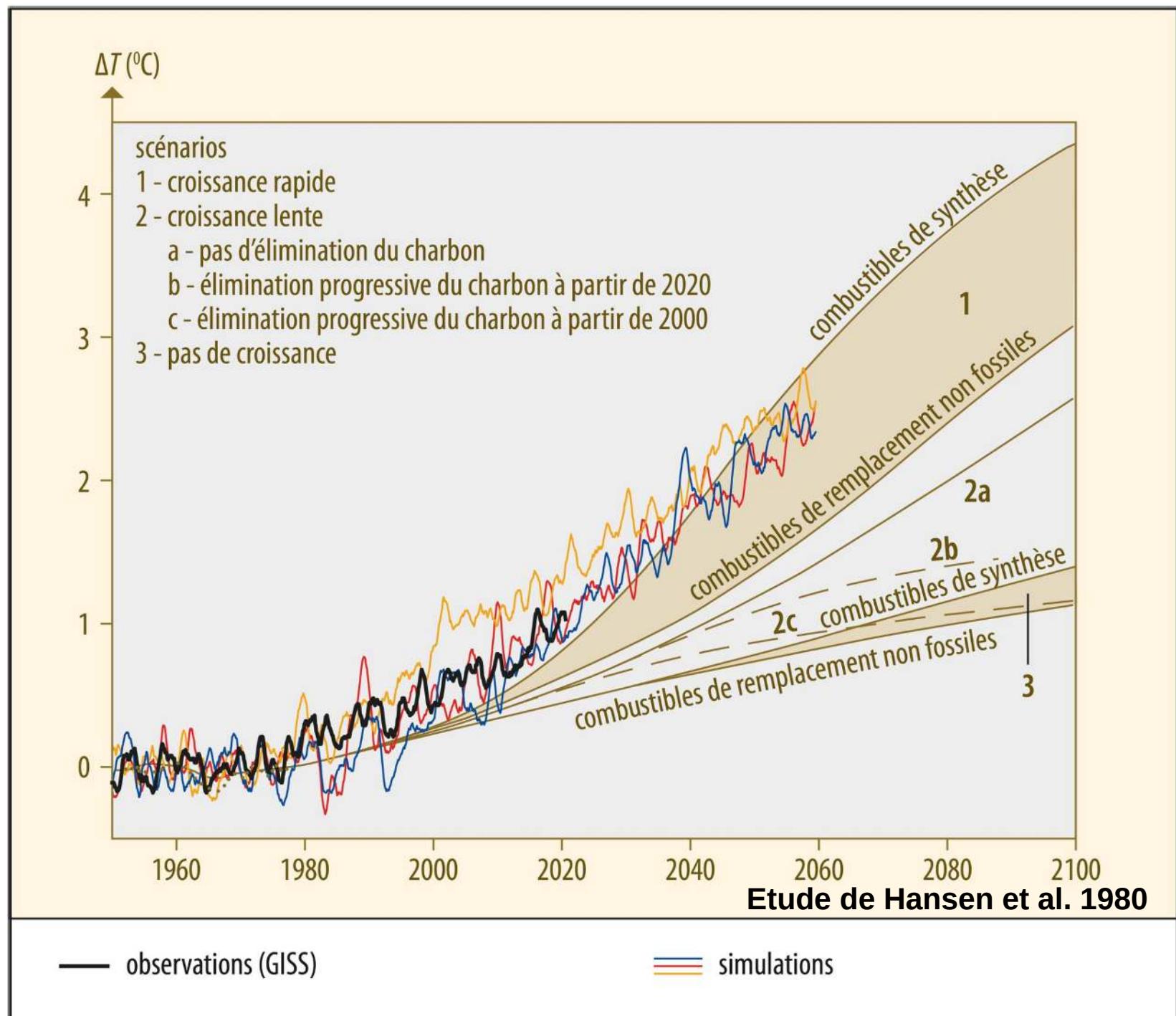


température été France ($^{\circ}\text{C}$)



III. Simulations du changement climatique

Les modèles prévoient dès 1980 l'évolution des températures



III. Simulations du changement climatique

modèles climatiques = modèles de prévisions du temps

Comment utilise-t-on des modèles

- 1) imparfaits**
- 2) incapables de prévoir la météorologie au-delà de 15 jours pour prévoir le changement climatique ?**

En sachant ce qu'il y a dans le modèle

En analysant statistiquement des simulations longues

En suivant rigoureusement des protocoles très précis

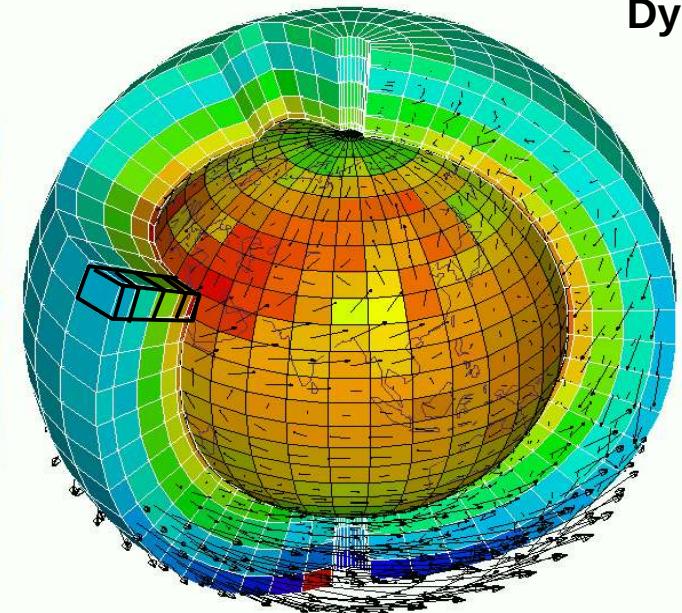
En vérifiant les capacités du modèle à reproduire le climat passé

Illustrations tirées de Hourdin et Guillemot, Universalis

Disponible sur

<https://www.lmd.jussieu.fr/~hourdin/PEDAGO/>

Donner les bases sur pour ne pas utiliser les modèles comme des boîtes noires



Dynamique des fluides : 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
$$D\theta / Dt = Q / Cp \ (p_0/p)^\kappa$$
- Conservation de la quantité de mouvement
$$D\underline{U}/Dt + (1/\rho) \operatorname{grad} p - g + 2 \ \underline{\Omega} \wedge \underline{U} = \underline{F}$$
- Conservation des composants secondaires
$$Dq/Dt = Sq$$

+

Paramétrisations physiques : Q, F, Sq

+

Couplages + HPC + calibration (tuning) + évaluation +
utilisation ...

Aujourd'hui :

- 1/ Coordonnées sphériques
- 2/ Advection/conservation : $Dq/Dt = 0$