

# 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/2017/>

hourdin@lmd.jussieu.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 de la modélisation numérique

**Before computers**



**Appearances**

**Theories (physique/chimie/biologie ...)**

**Mathematics**

**Numerics**

**Computers**

# I. Modèles parmi les modèles

## Les 5 couches de la modélisation numérique Les modèles Océan/Atmosphère

Before computers



### Appearances :

Meteorology/oceanography, climate, atm/ocean composition ...

---

### Theories :

Fluid mechanics, Gas/radiation interaction, Thermodynamics, Chemistry

---

### Mathematics

Primitive equations, Thermodynamical laws, Radiative transfer equations

---

### Numerics

Grid point discretization, spectral methods, Finite volume and finite differences  
conservation, robustness and efficiency, rather than accuracy

---

### Computers

Fortran/Linux, High Performance Computing, Flexibility/Multi-config., post-processing

# 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 chaos, modèles 1D d'équilibre radiatifs, etc ...)
- **Modélisation tri-dimensionnelle réaliste.**

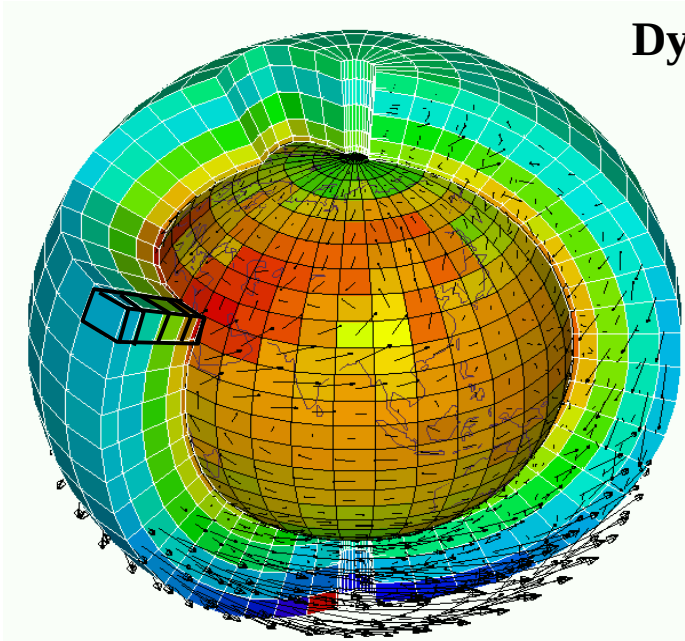
## Modélisation 3D (celle dont on va parler ici) : Modèles de circulation générale

- 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. 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  
 $D\theta / Dt = Q / C_p (p_0/p)^\kappa$
- 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  
 $Dq/Dt = Sq$

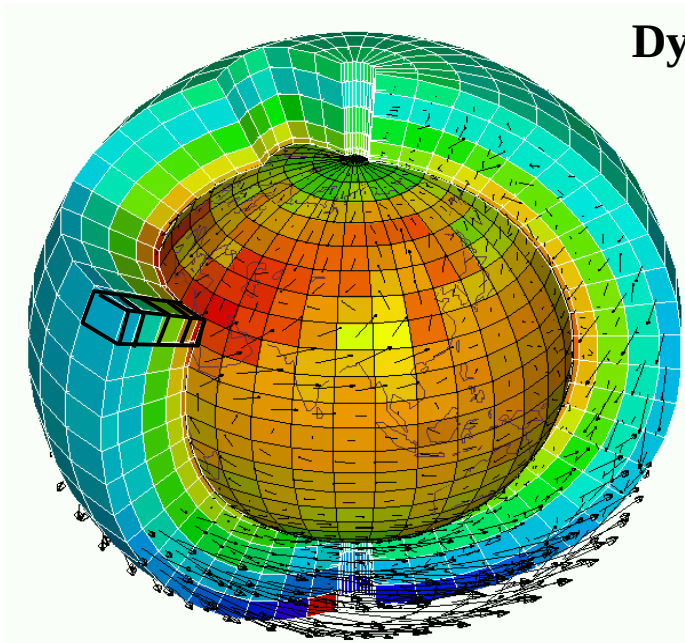
Passage au monde numérique : modèles en points de grille et modèles spectraux.

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

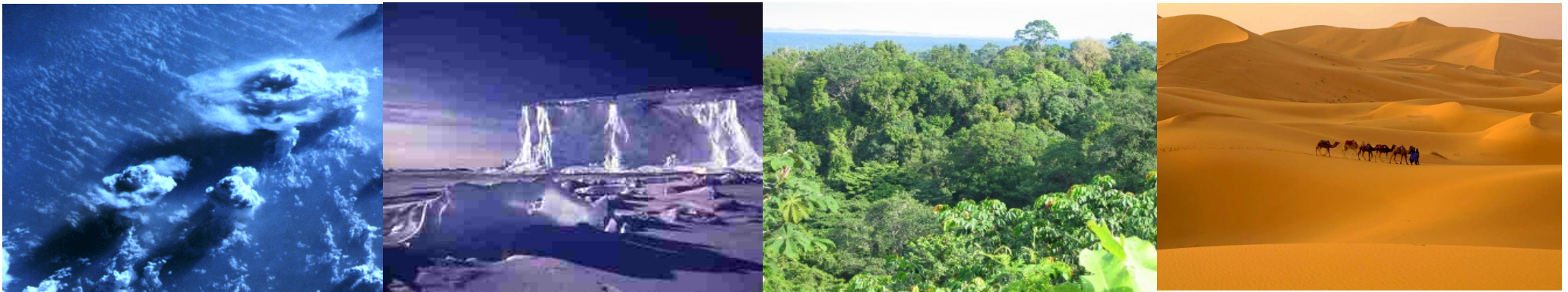
- Conservation de la masse  
 $D\rho/Dt + \rho \operatorname{div}\underline{U} = 0$
- Conservation de la température potentielle  
 $D\theta / Dt = Q / Cp (p_0/p)^\kappa$
- Conservation de la quantité de mouvement  
 $D\underline{U}/Dt + (1/\rho) \operatorname{grad}p - g + 2 \underline{\Omega} \wedge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

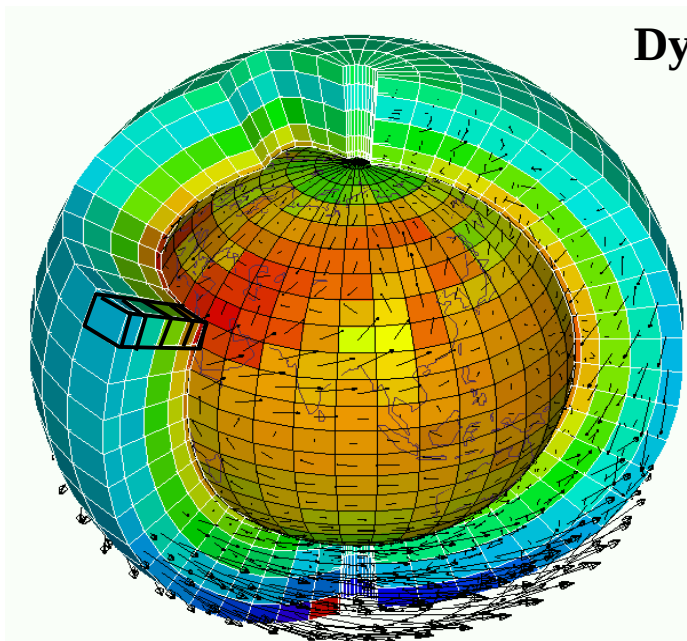
→ typiquement qq 100 km pour les modèles globaux de climat

→ quelques dizaines de m à qq km pour des modèles régionaux ou des études de processus.



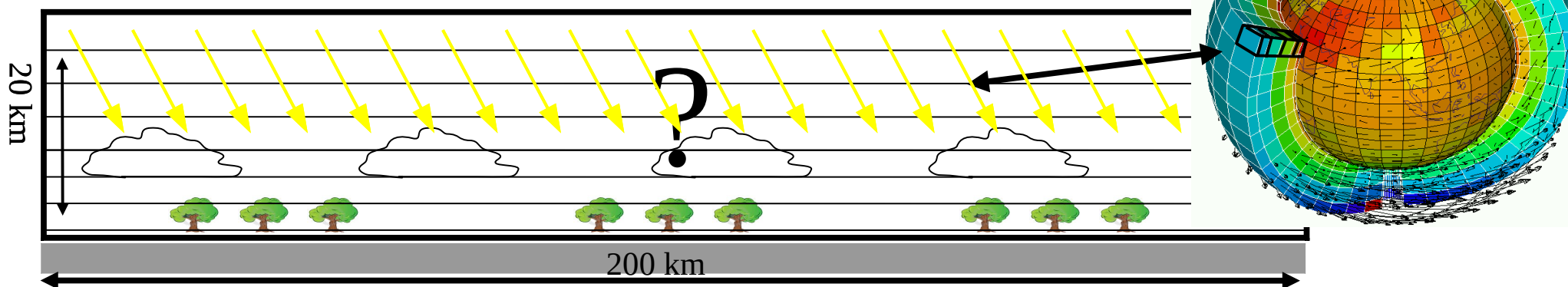
## II. Les modèles de circulation générale

### Dynamique des fluides : 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  
 $Dq/Dt = Sq$

Dans une colonne du modèle ...

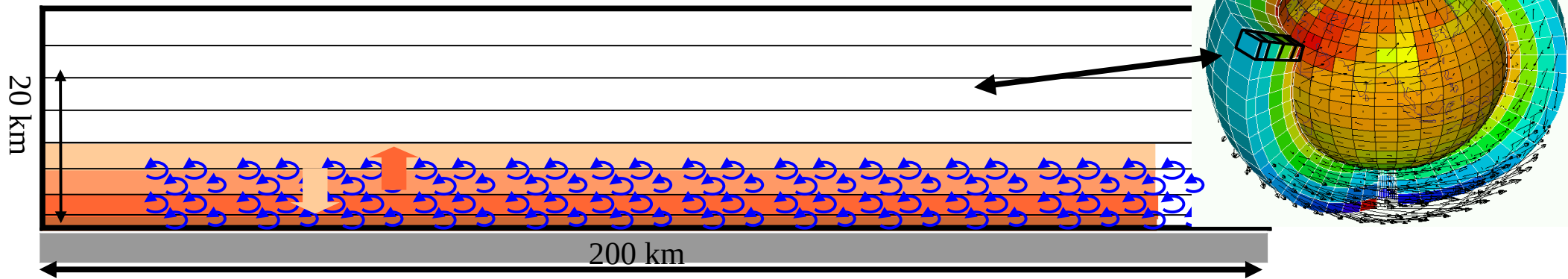


Objet des paramétrisations : rendre compte de l'effet des processus non résolus par ces équations

→ Termes « sources » additionnels dans les équations.

## II. Les modèles de circulation générale

Dans une colonne du modèle ...



Paramétrisation de la turbulence



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

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

→ 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 ...



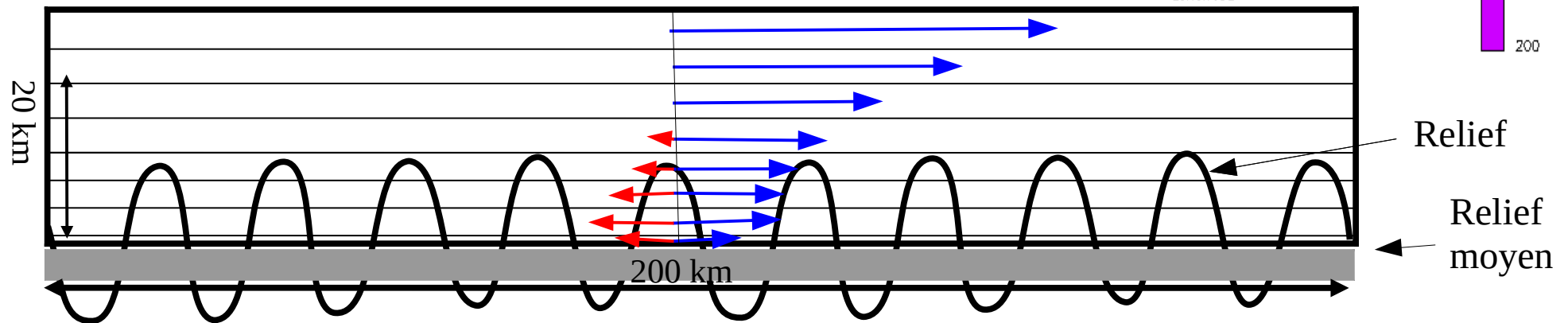
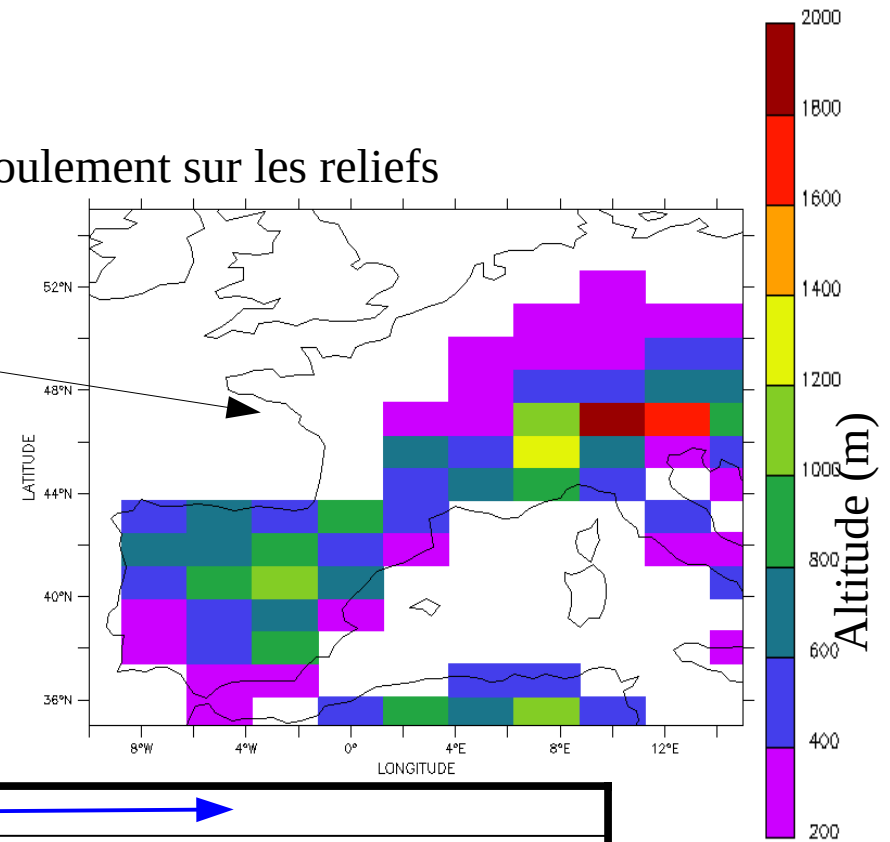
## II. Les modèles de circulation générale

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.

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

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



Dans les modèles actuels, on rend compte en plus :

- du freinage dans les basse couches

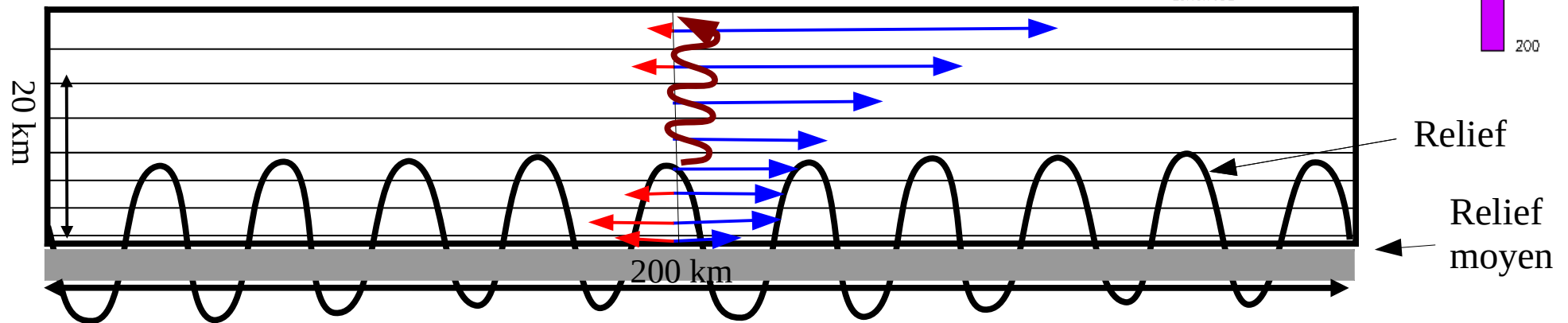
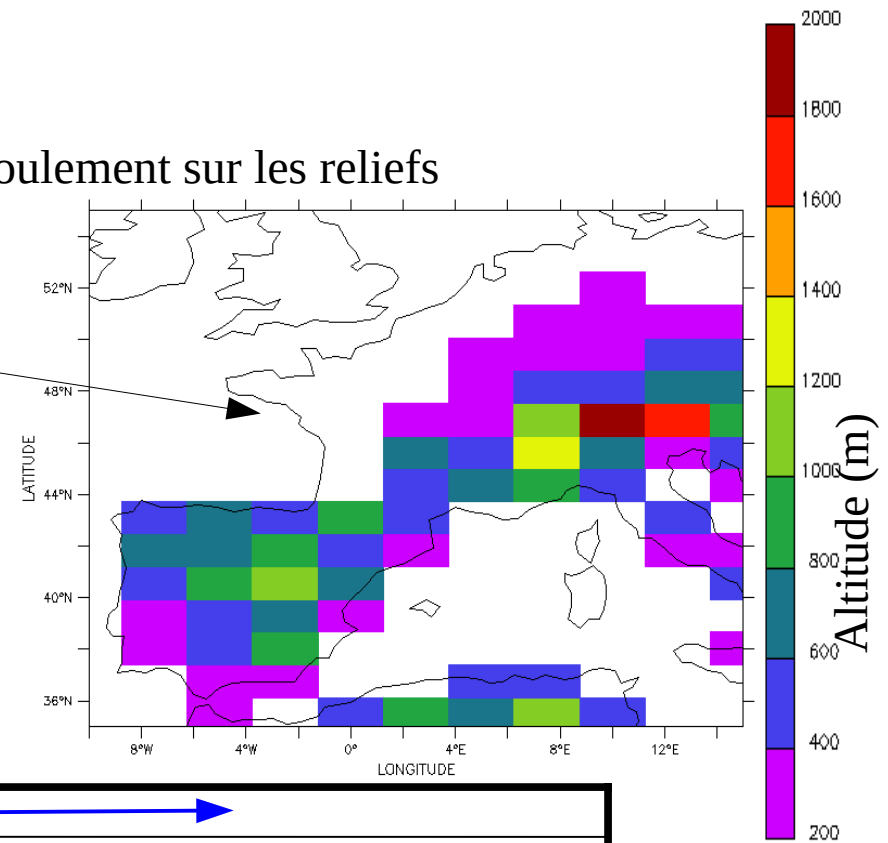
## II. Les modèles de circulation générale

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.

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

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



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

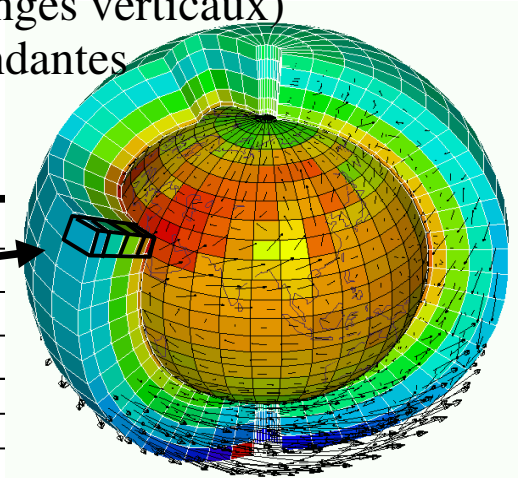
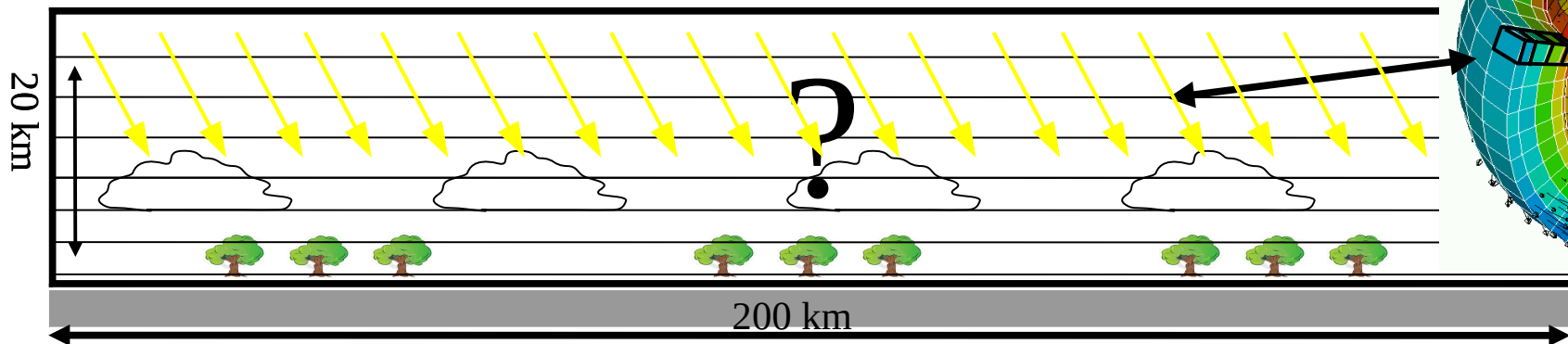
- du freinage dans les basse couches
- de l'injection d'ondes (de gravité) dans l'atmosphère → freinage plus haut dans l'atmosphère
- de l'effet de détournement du relief
- d'un effet de de détournement lié à la compression verticale de la vorticité au dessus des reliefs
- de l'effet de la stabilité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

## II. Les modèles de circulation générale

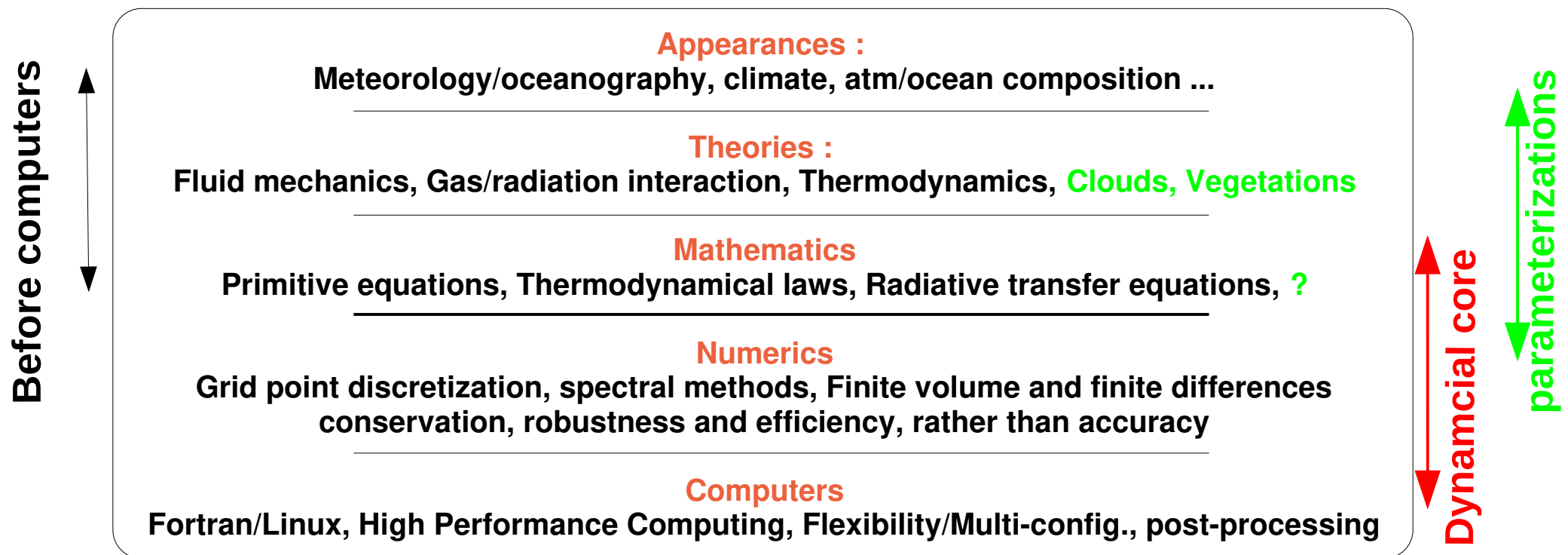


- Calcul de l'effet collectif des processus non résolus sur les variables d'état explicites ( $\underline{U}$ ,  $\theta$ ,  $q$ ) du modèle global
- description physique approchée du comportement collectif des processus
- qui fait intervenir des variables internes aux paramétrisations (caractéristiques des nuages, écart-type de la distribution sous-maille d'une variable, ...)
- dérivation d'équations reliant ces variables internes aux variables d'état  $\underline{U}$ ,  $\theta$ ,  $q$  à l'instant  $t \rightarrow$  variables internes  $\rightarrow \underline{E}$ ,  $Q$ ,  $Sq \rightarrow \underline{U}$ ,  $\theta$ ,  $q$  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 ...



## II. Les modèles de circulation générale



### **Dynamical core :**

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

### **Parameterizations :**

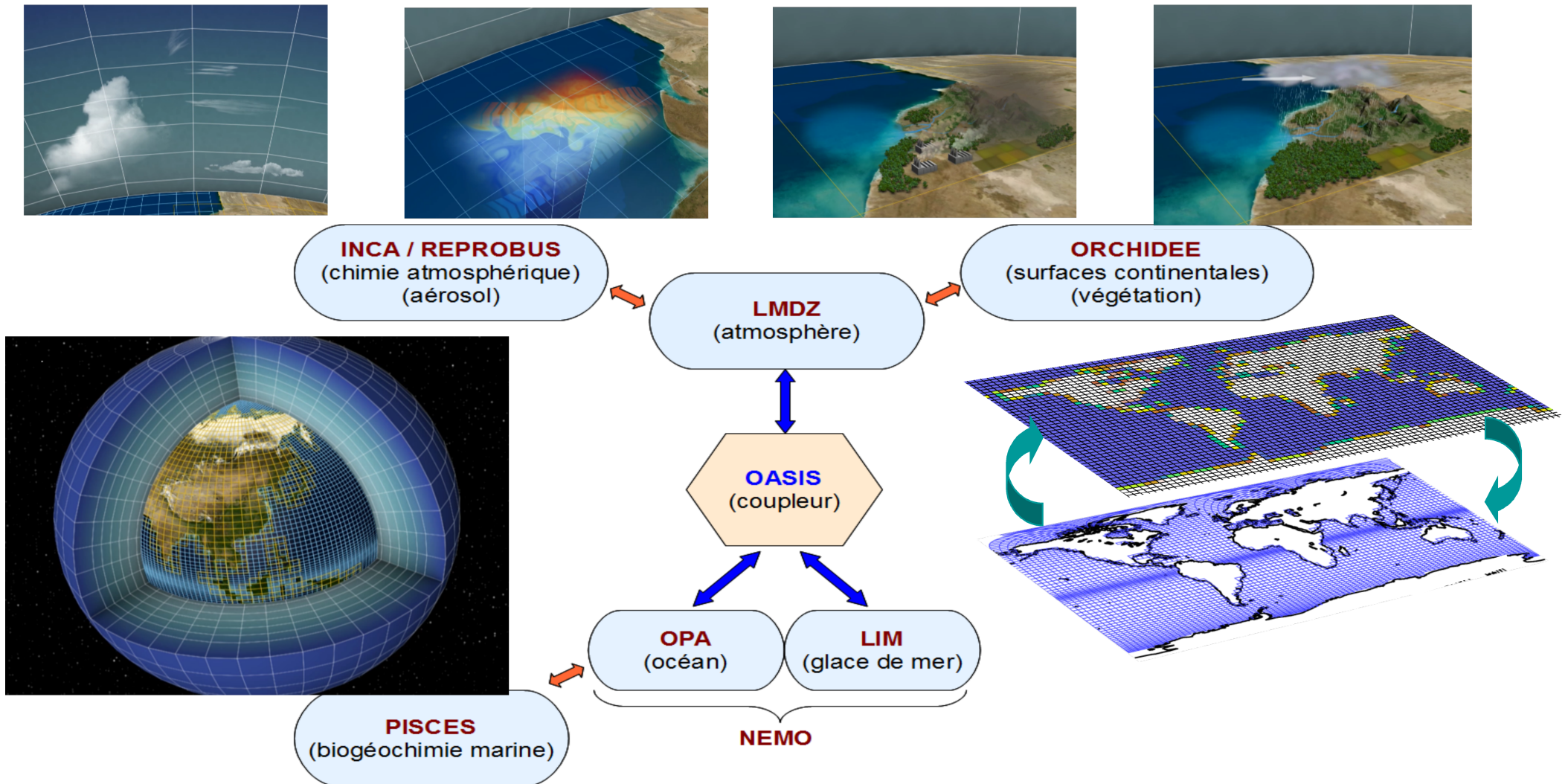
Based on combinations of theories, heuristic approaches, and conservation laws. Many ways possible. Strong diversity across models

### **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.<sup>12</sup>
- 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

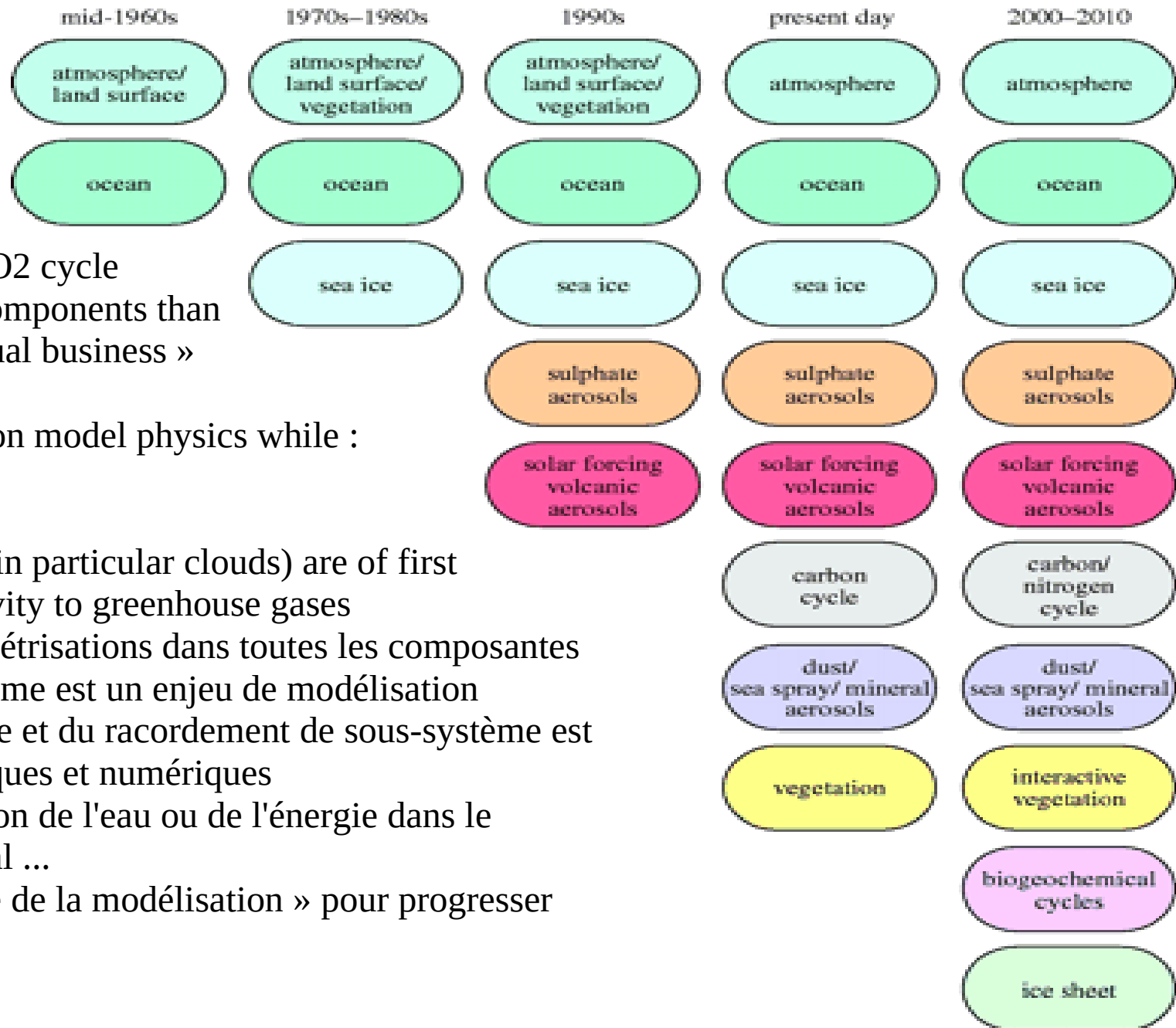
Motivated by long term climate variations and CO2 cycle  
Easier to promote new components than improvements of « as usual business »

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
- Importance des paramétrisations dans toutes les composantes
- Le couplage en lui même est un enjeu de modélisation

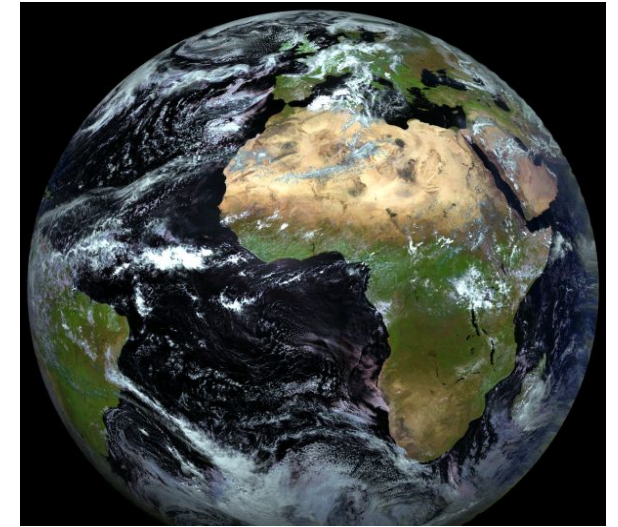
La question du découpage et du raccordement de sous-système est partout. Questions physiques et numériques

- 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 météosat



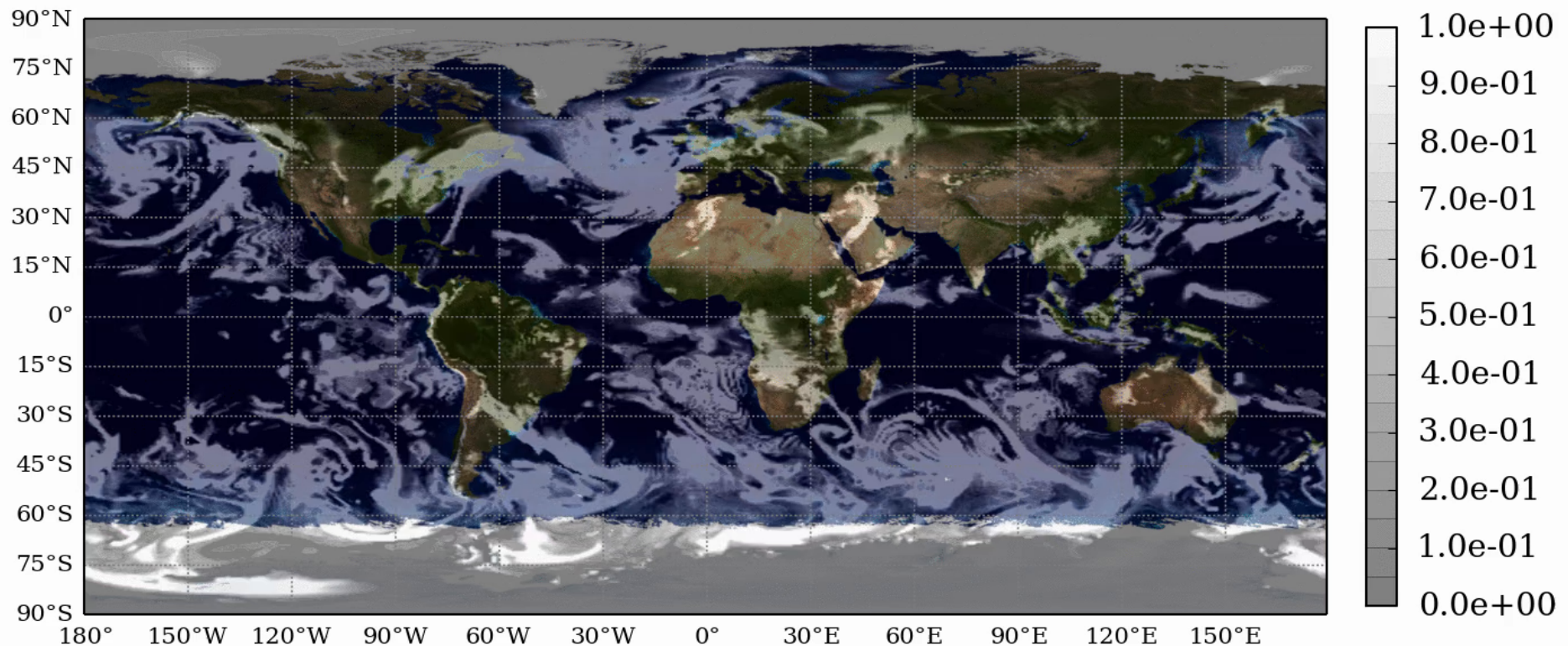
## Simulation des nuages sur un mois

Avec le modèle LMDZ, résolution horizontale 50km

Modèles de climat = modèles de prévisions météo

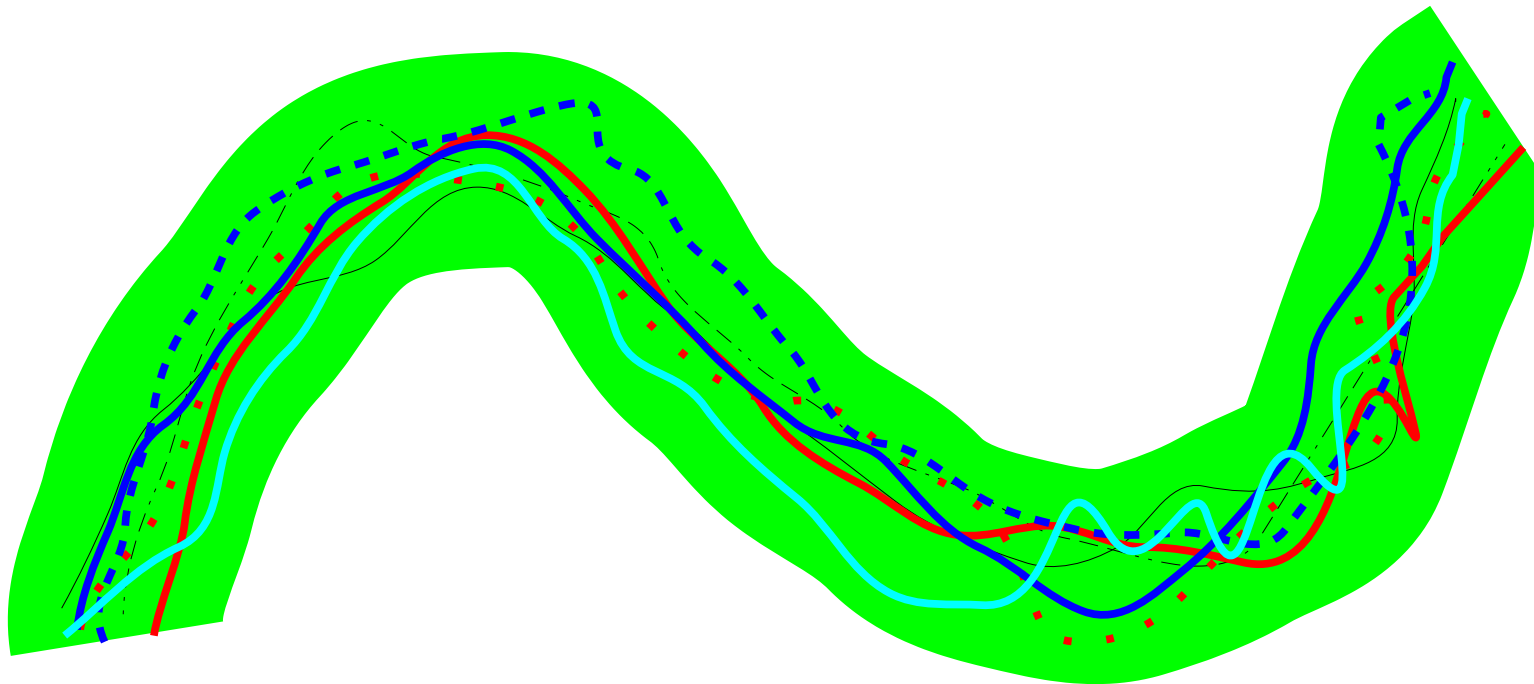
**Prévision** : 15 jours, état de départ réaliste, déterministe

**Climat** : siècles, départ quelconque, analyse statistique



### III. Les modèles et leurs utilisations

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



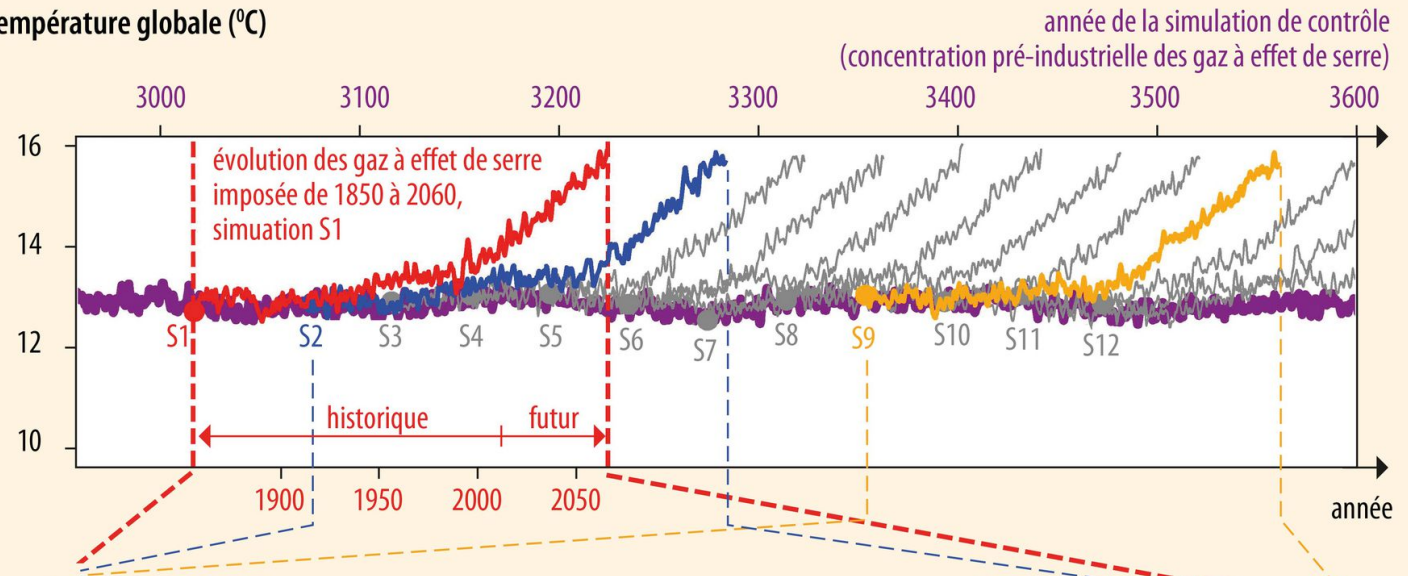


# Projections climatiques

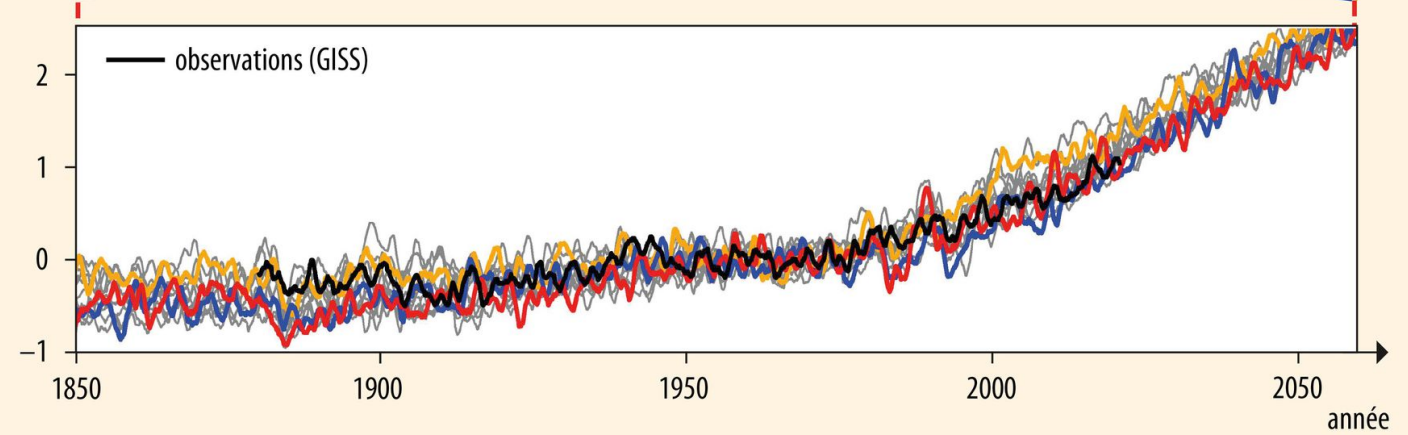
## Modèle couplé de l'IPSL

Tiré de Hourdin et Guillemot, Universalis  
Disponible sur <https://www.lmd.jussieu.fr/~hourdin/PEDAGO/>

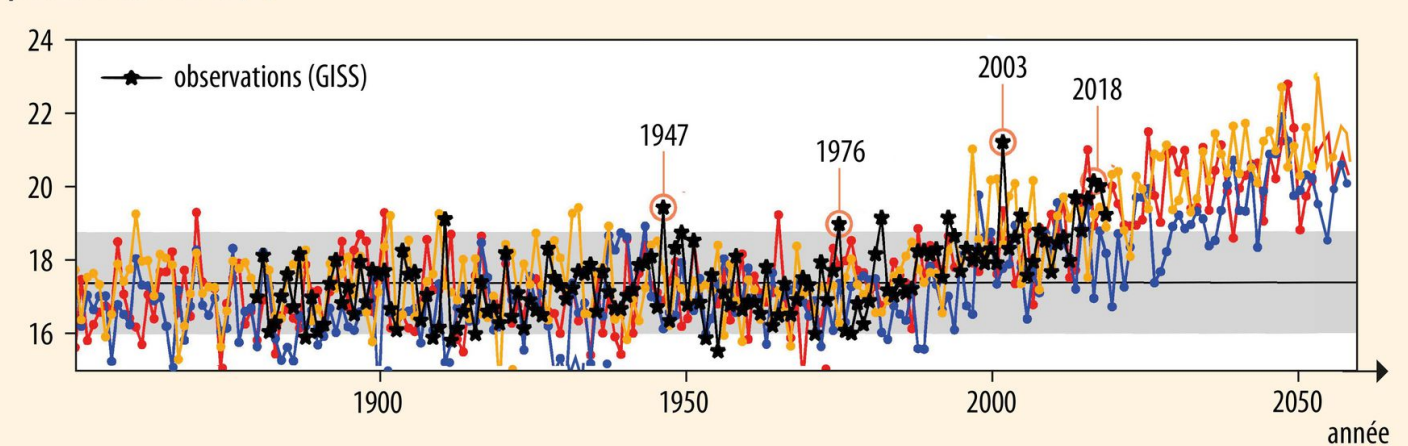
température globale (°C)



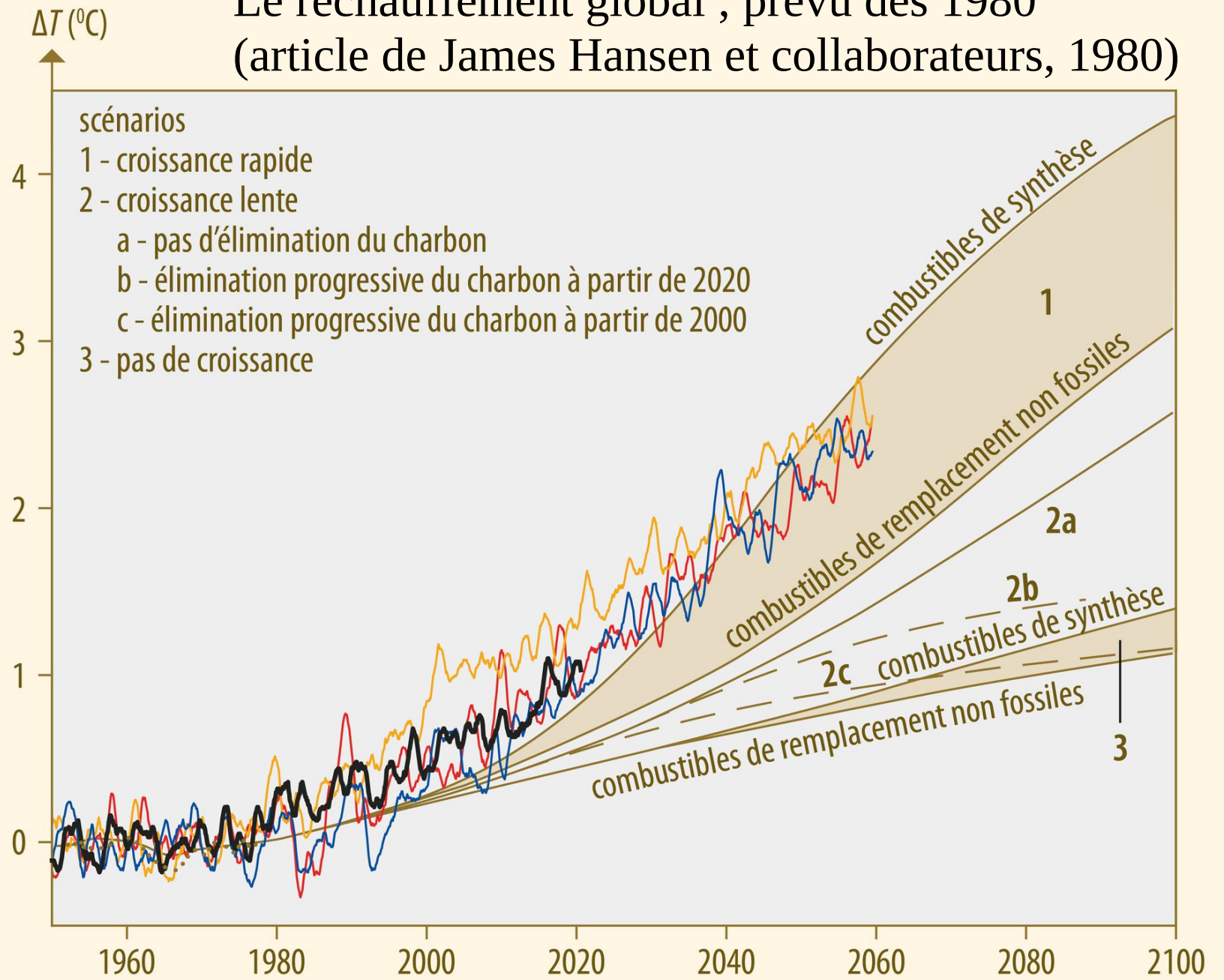
anomalie globale (°C)



température été France (°C)



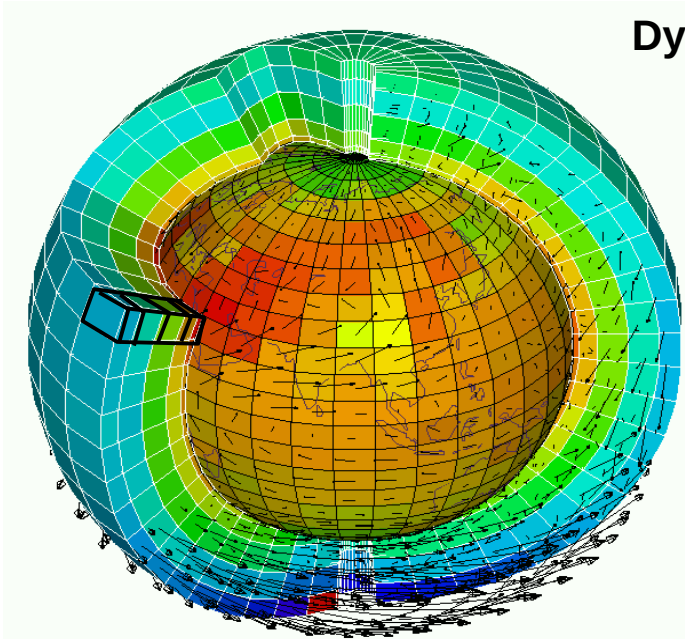
# Le réchauffement global ; prévu dès 1980 (article de James Hansen et collaborateurs, 1980)



— observations (GISS)

— simulations

# Donner les bases sur pour ne pas utiliser les modèles comme des boites 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  
 $D\theta / Dt = Q / C_p (p_0/p)^\kappa$
- 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  
 $Dq/Dt = S_q$

+

Paramétrisations physiques :  $Q, \underline{F}, S_q$

+

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

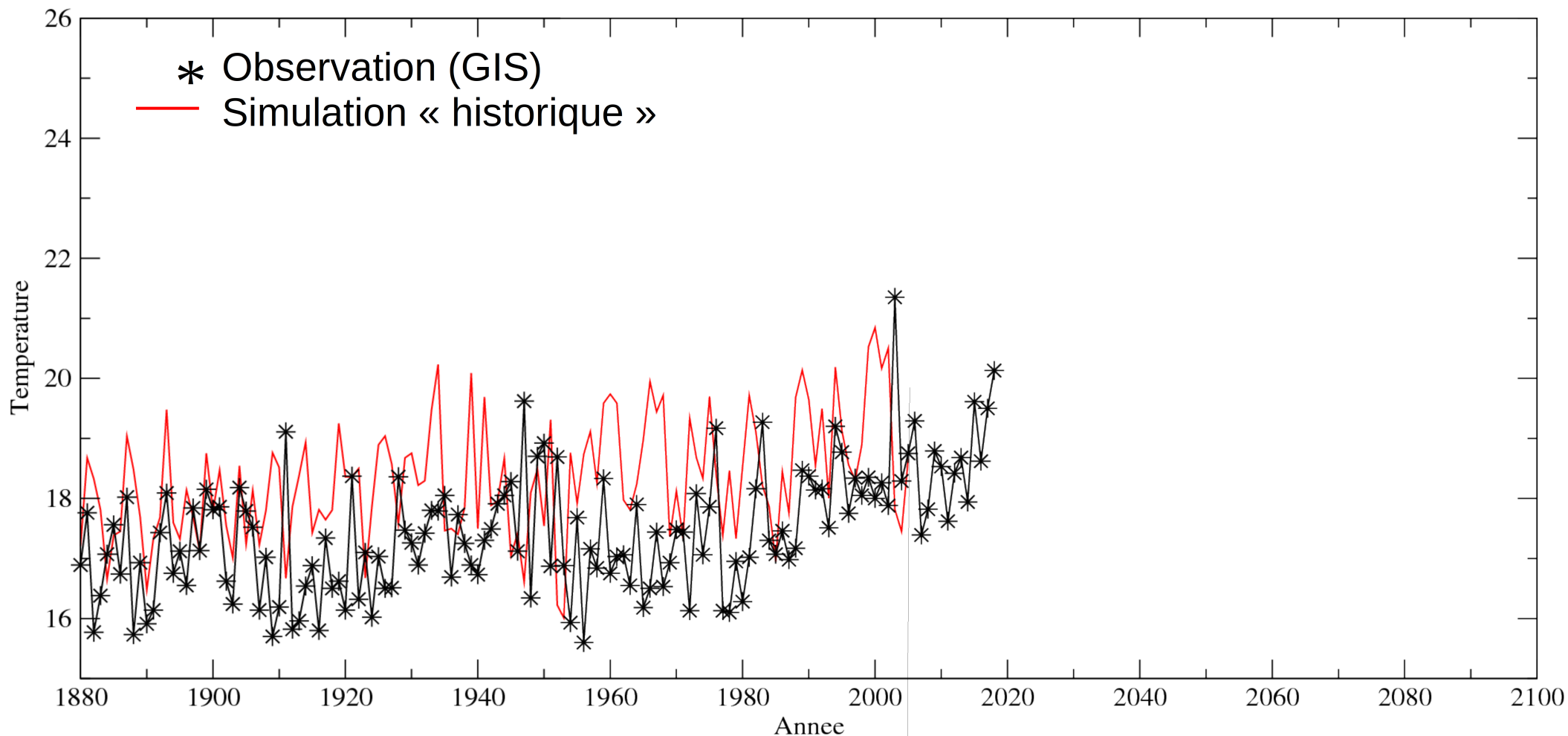
**Aujourd'hui :**

1/ Coordonnées sphériques

2/ Advection/conservation :  $Dq/Dt = 0$

# Exemple d'utilisation de simulations climatiques (modèle IPSL-CM5A)

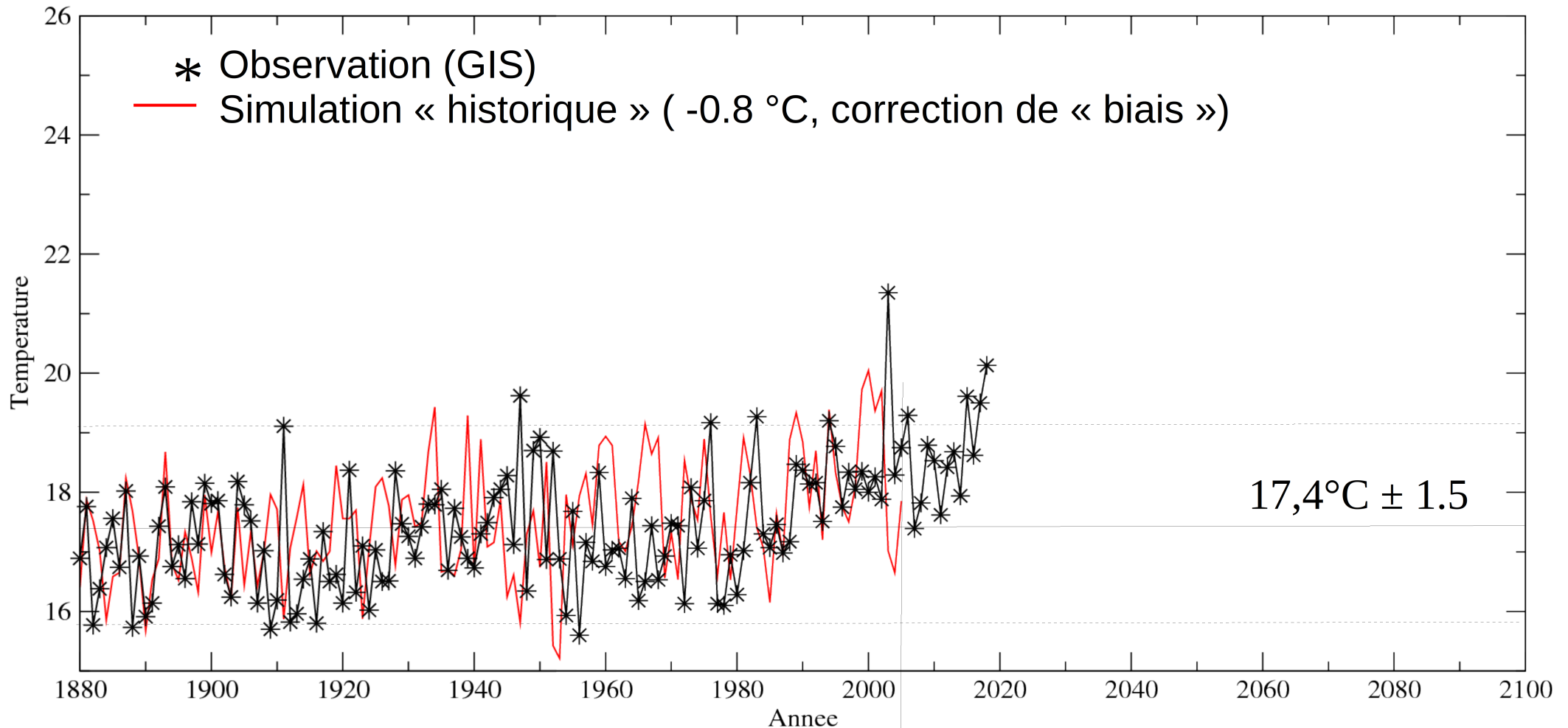
Températures estivales France (°C, Moyenne Juin-Juillet-Août)



**Reconstruction**

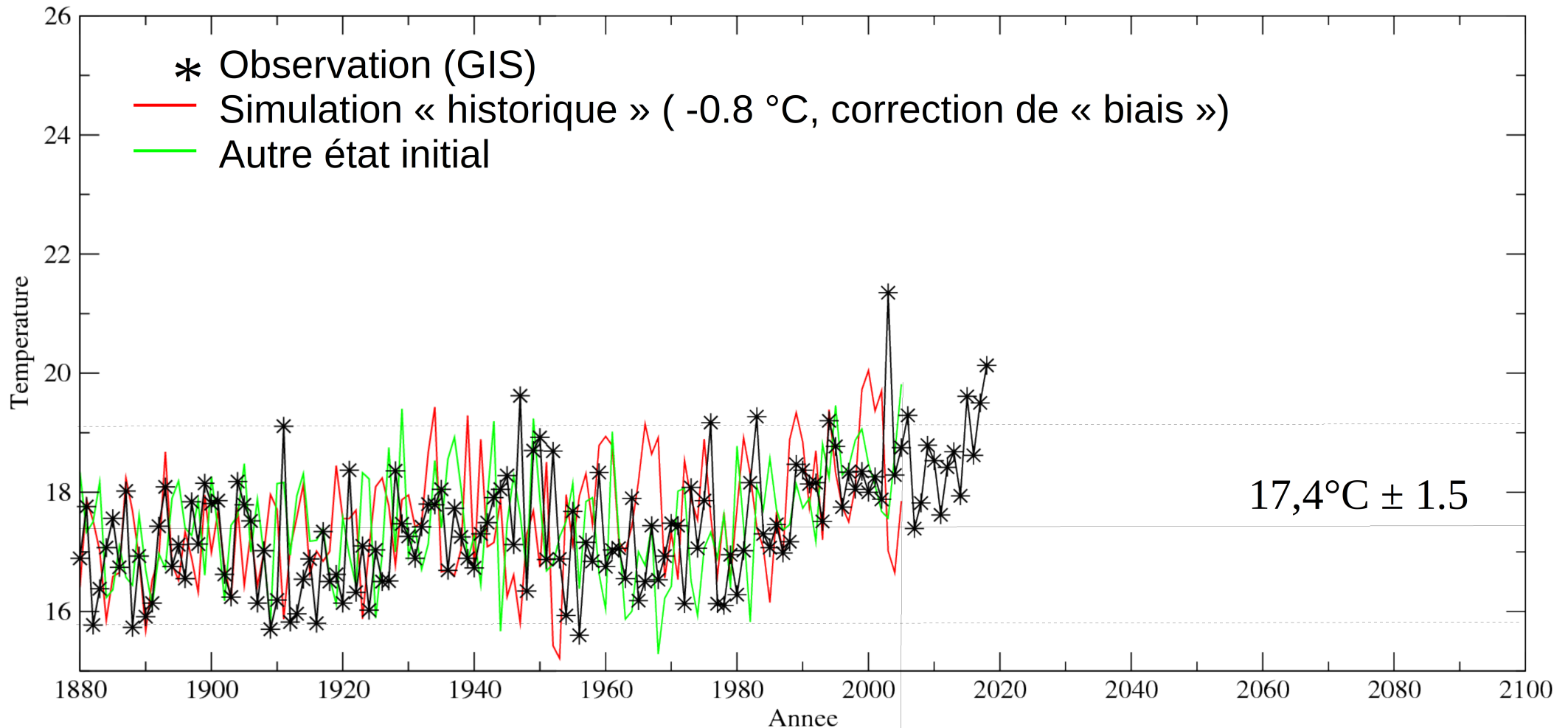
# Exemple d'utilisation de simulations climatiques (modèle IPSL-CM5A)

Températures estivales France (°C, Moyenne Juin-Juillet-Août)



# Exemple d'utilisation de simulations climatiques (modèle IPSL-CM5A)

Températures estivales France (°C, Moyenne Juin-Juillet-Août)

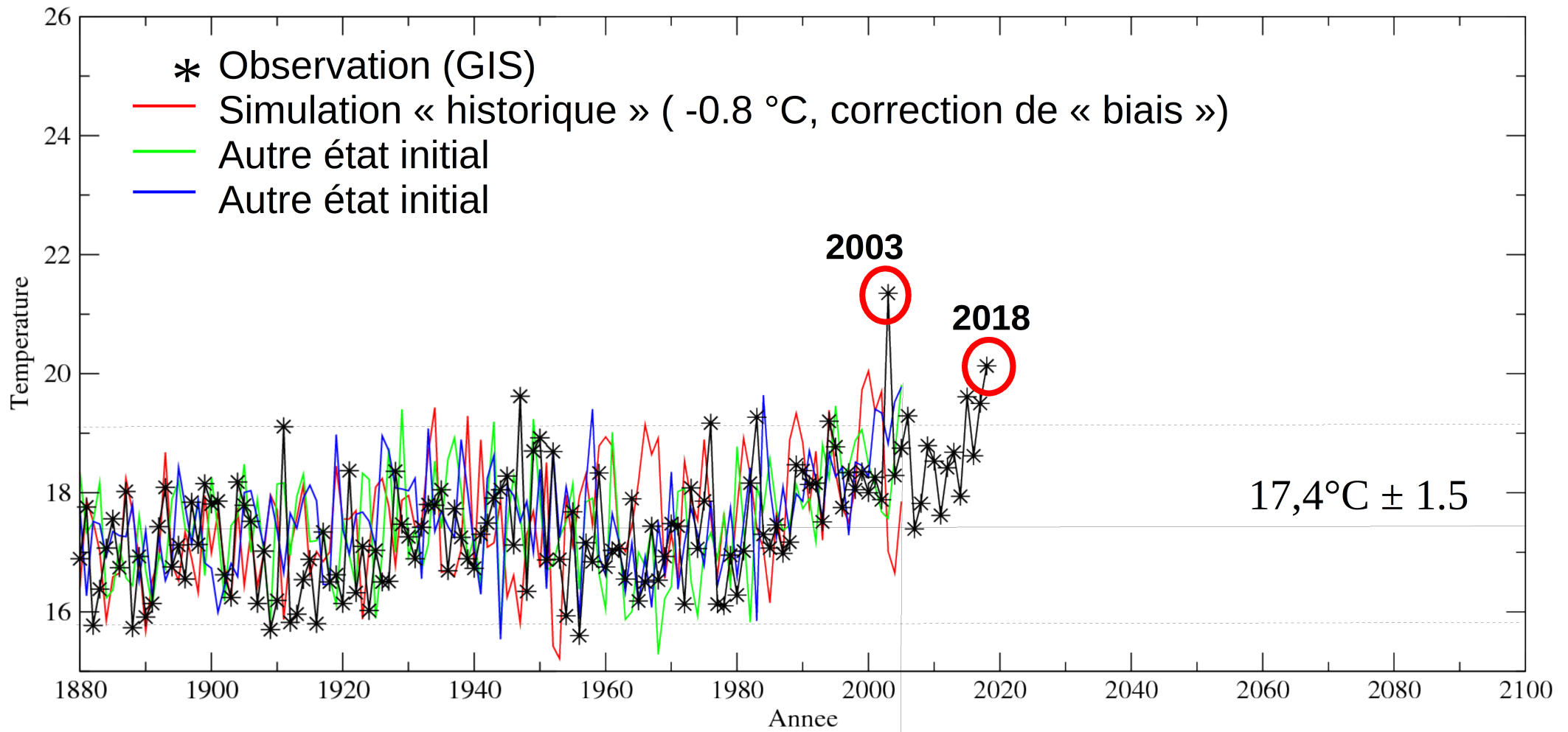


**Reconstruction**

17,4°C ± 1.5

# Exemple d'utilisation de simulations climatiques (modèle IPSL-CM5A)

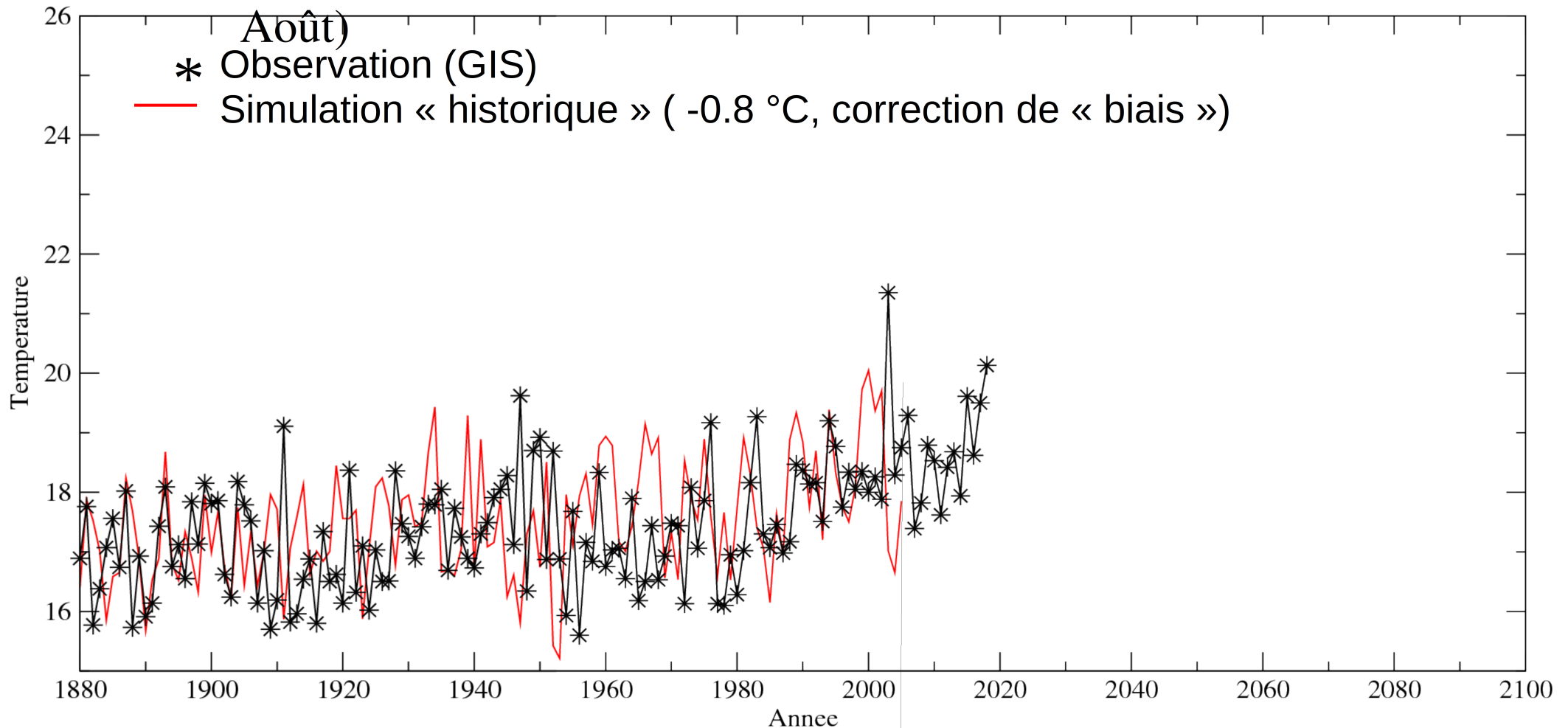
Températures estivales France (°C, Moyenne Juin-Juillet-Août)



**Reconstruction**

# Exemple d'utilisation de simulations climatiques (modèle IPSL-CM5A)

Températures estivales France (°C, Moyenne Juin-Juillet-  
Août)

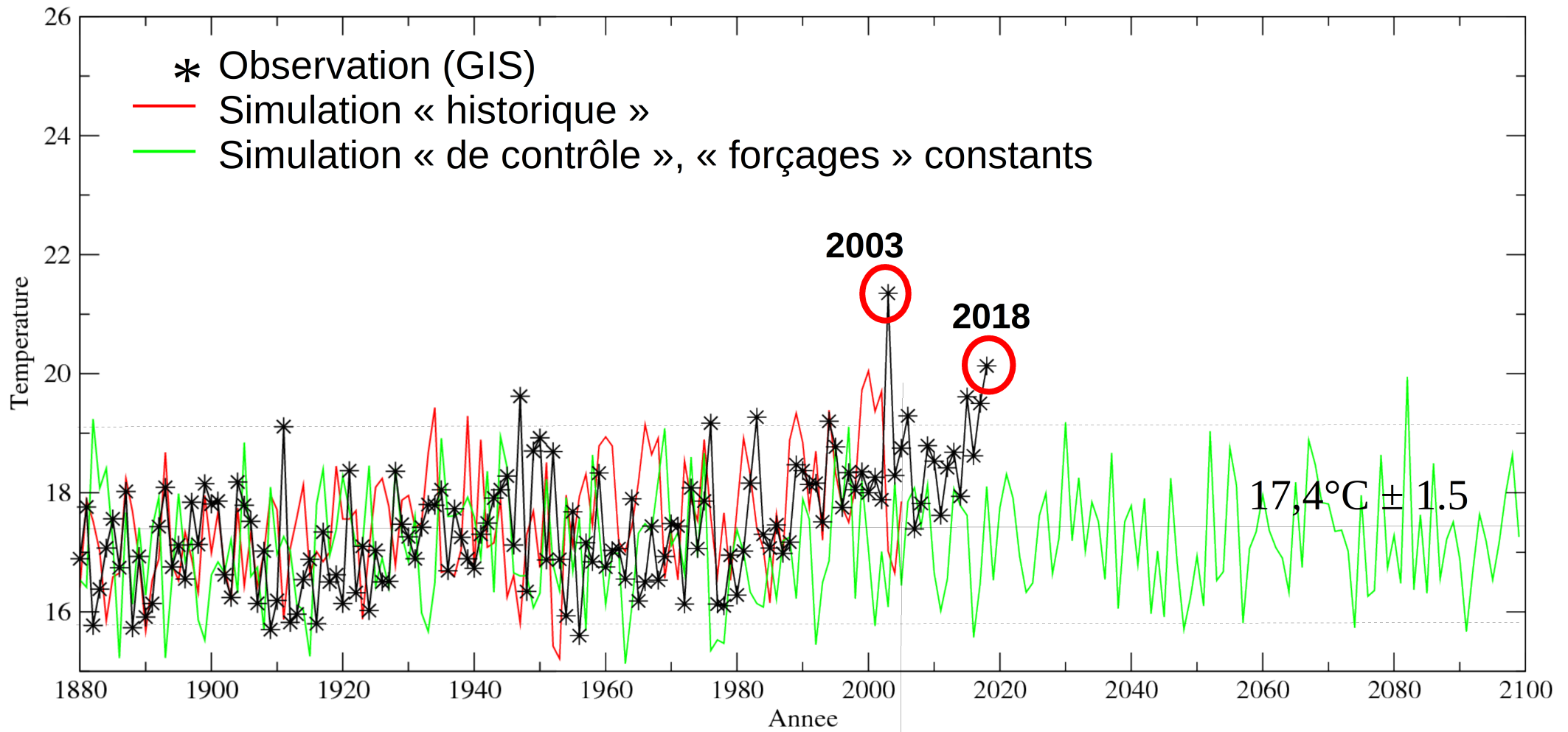


**Reconstruction**



# Exemple d'utilisation de simulations climatiques (modèle IPSL-CM5A)

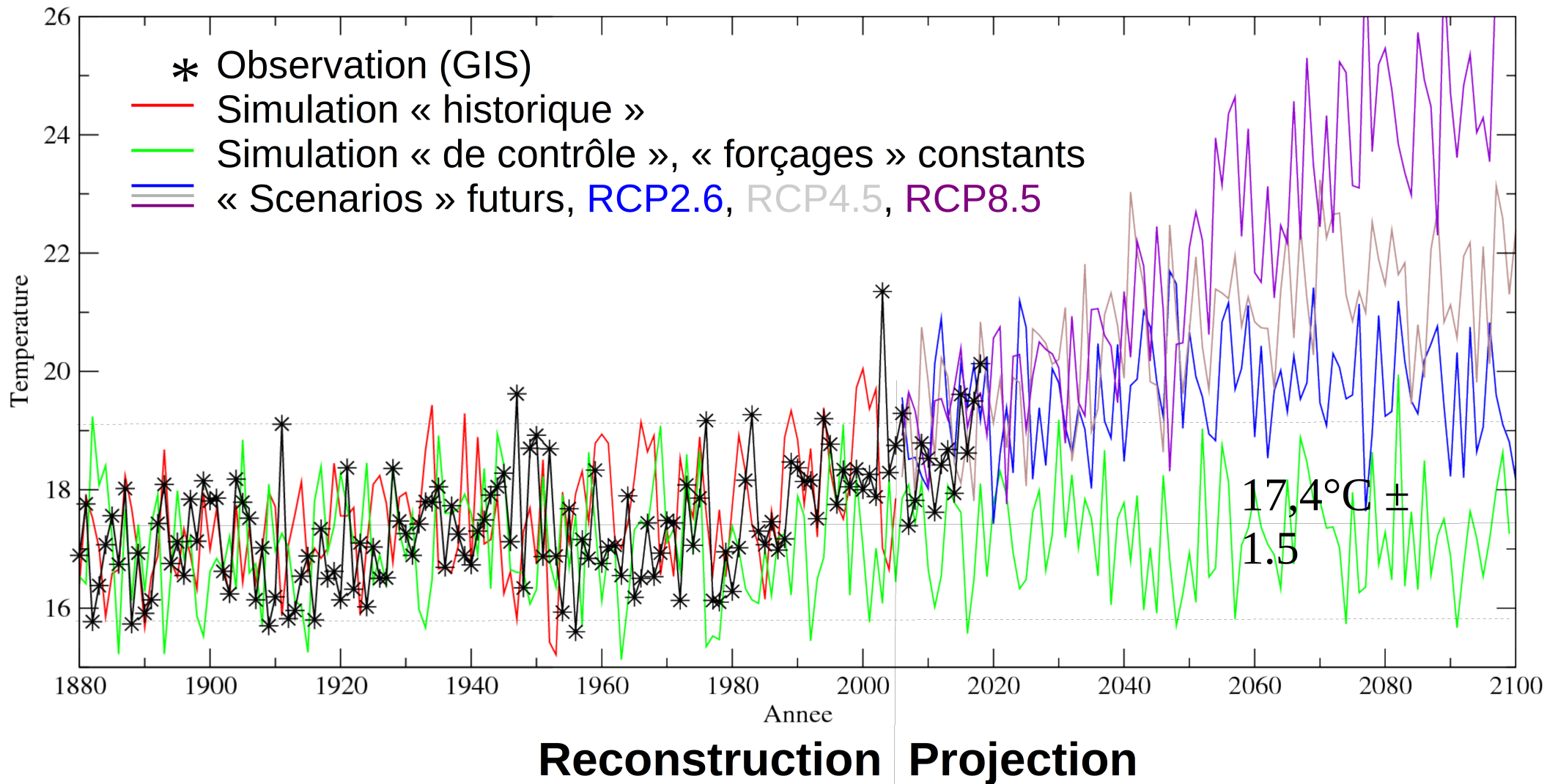
Températures estivales France (°C, Moyenne Juin-Juillet-Août)



**Reconstruction**

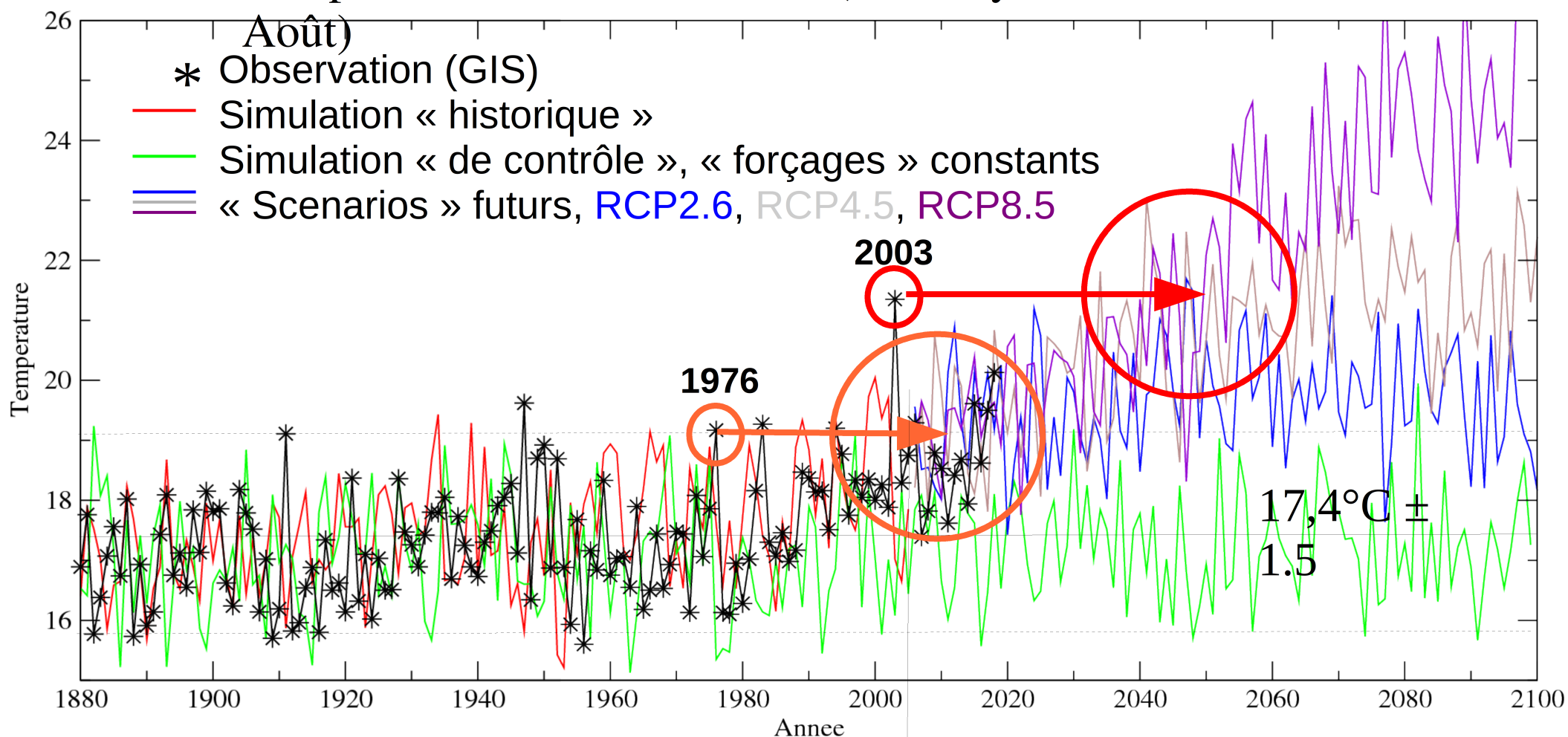
# Exemple d'utilisation de simulations climatiques (modèle IPSL-CM5A)

## Températures estivales France (°C, Moyenne Juin-Juillet-Août)



# Exemple d'utilisation de simulations climatiques (modèle IPSL-CM5A)

Températures estivales France (°C, Moyenne Juin-Juillet-



**Reconstruction** **Projection**