

Momodélisation 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

Pour 2 : <http://www.lmd.jussieu.fr/~hourdin/PEDAGO/cours.pdf>, chapitre 3

<http://www.lmd.jussieu.fr/~hourdin/these.pdf>, section 3.3

Pour 3 : <http://www.lmd.jussieu.fr/~hourdin/HDR/habil.pdf>, sec 2.2.2 et ch 3

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

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. Modèles parmi les modèles

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 Lorenz qui a mis en évidence la nature chaotique de la circulation atmosphérique, modèles 1D d'équilibre radiatifs, etc ...)
- **Modélisation tri-dimensionnelle réaliste.**

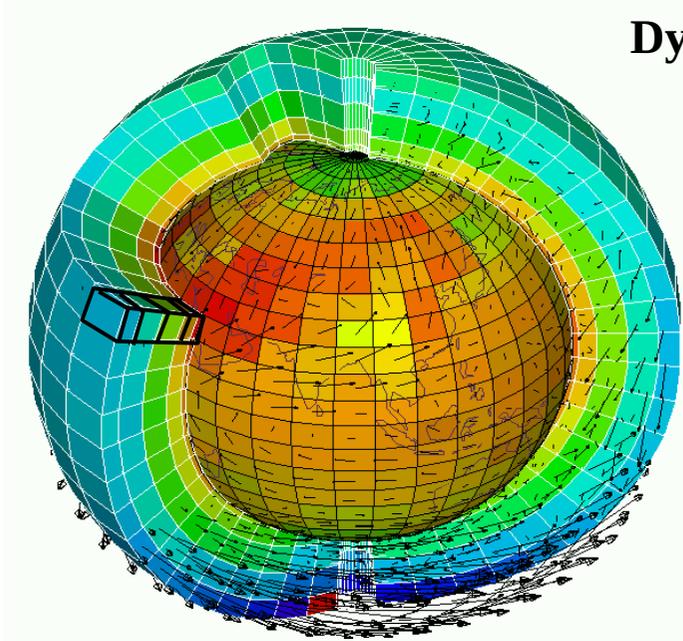
Modélisation 3D (celle dont on va parler ici) : Modèles de circulation générale

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

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

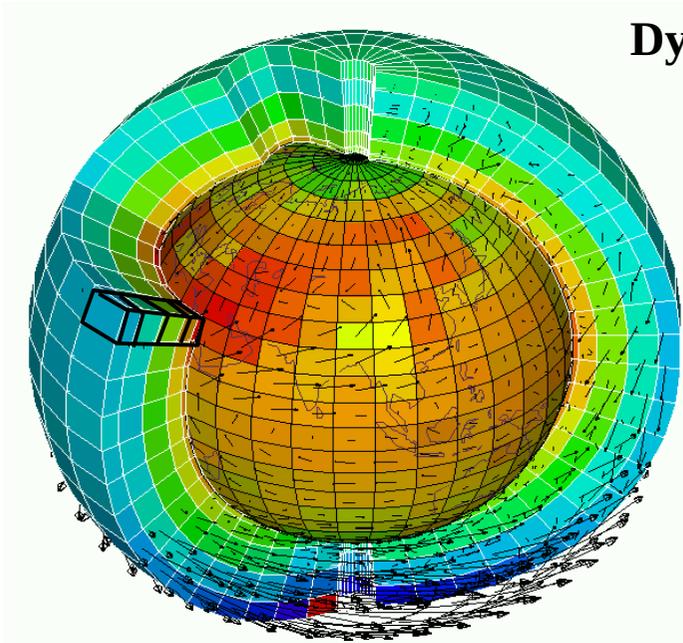
Résolu jusqu'à une certaine échelle :

→ typiquement qq 100 km pour les modèles globaux de climat

→ quelques centaines 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
 $D\underline{U}/Dt + (1/\rho) \operatorname{grad}p - g + 2 \underline{\Omega} \wedge \underline{U} = \underline{E}$
- 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 :

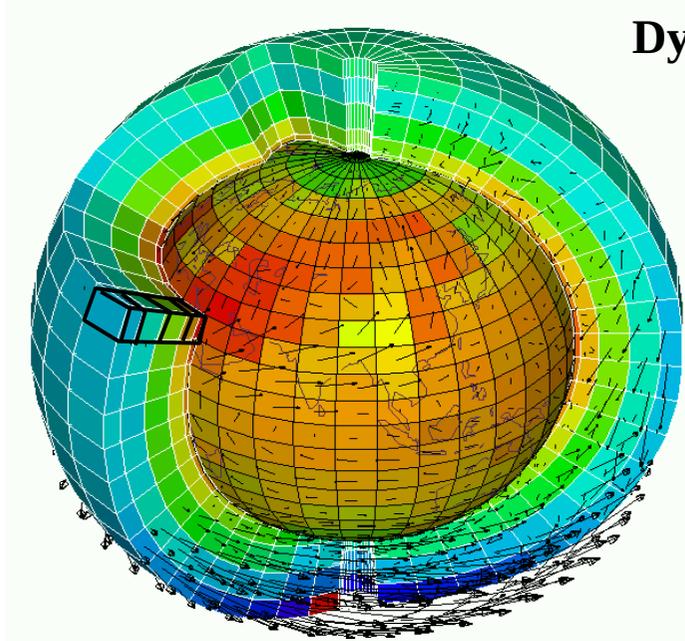
→ typiquement qq 100 km pour les modèles globaux de climat

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



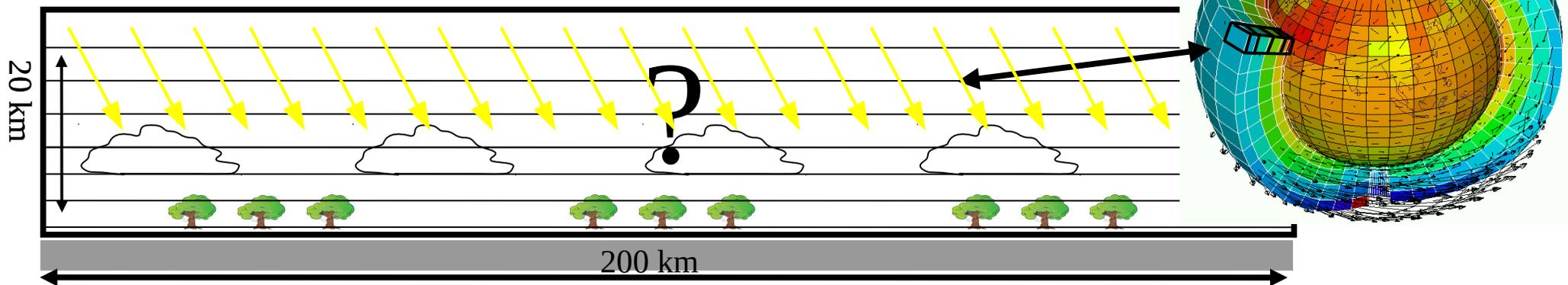
II. Les modèles de circulation générale

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
 $D\underline{U}/Dt + (1/\rho) \operatorname{grad}p - g + 2 \underline{\Omega} \wedge \underline{U} = \underline{E}$
- Conservation des composants secondaires
 $Dq/Dt = Sq$

Dans une colonne du modèle ...

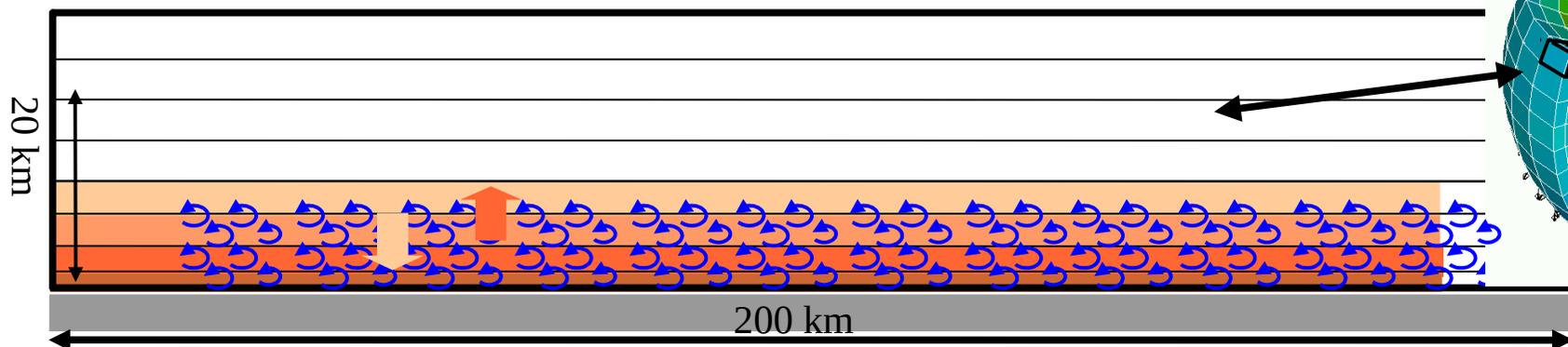


Objet des paramétrisations : rendre compte de l'effet des processus non résolus par ces équations

→ 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.

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

→ 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 ...

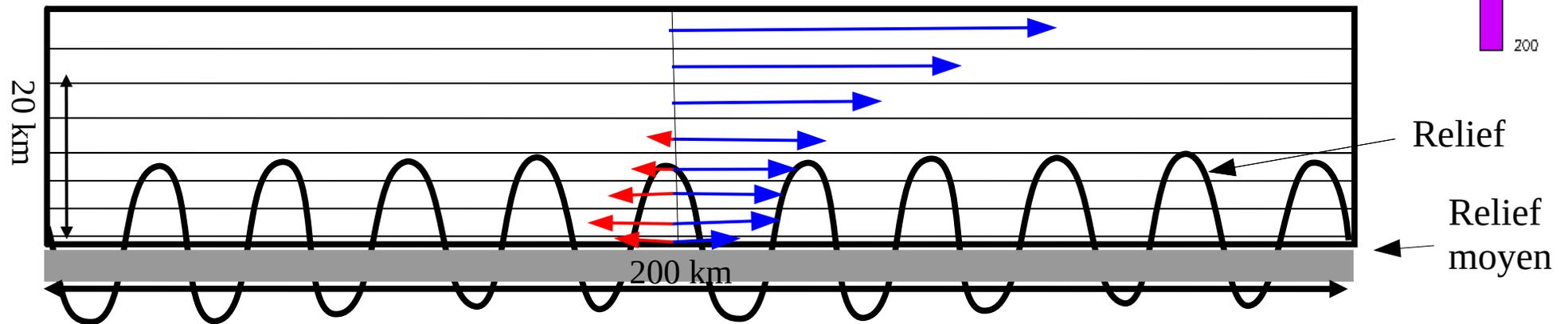
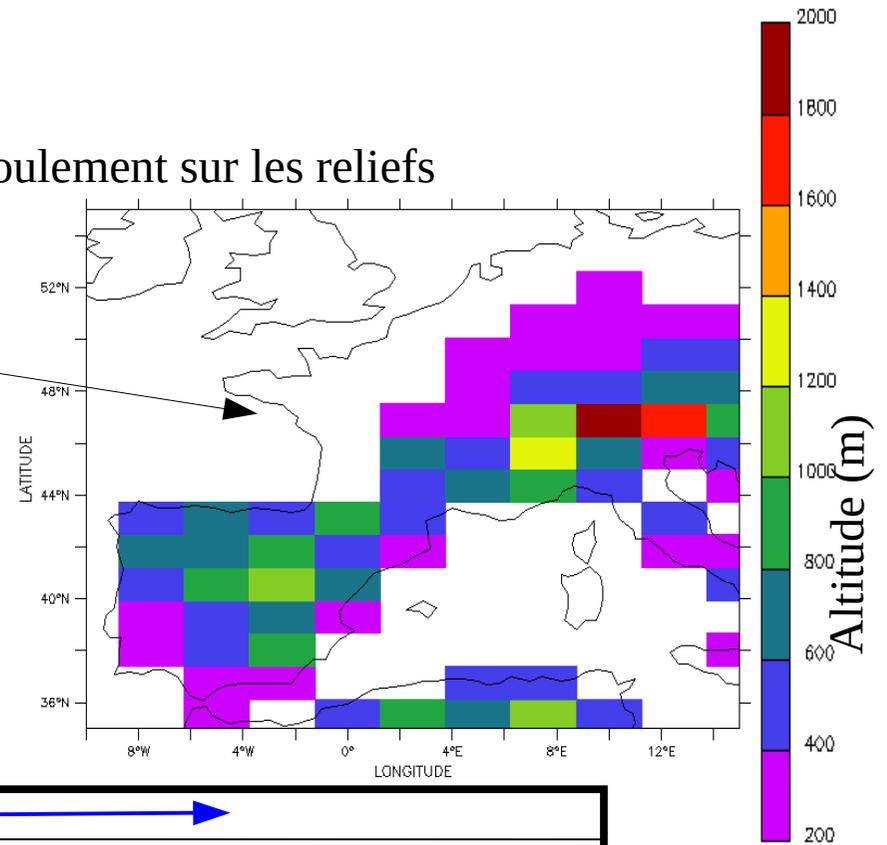
II. Les modèles de circulation générale

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

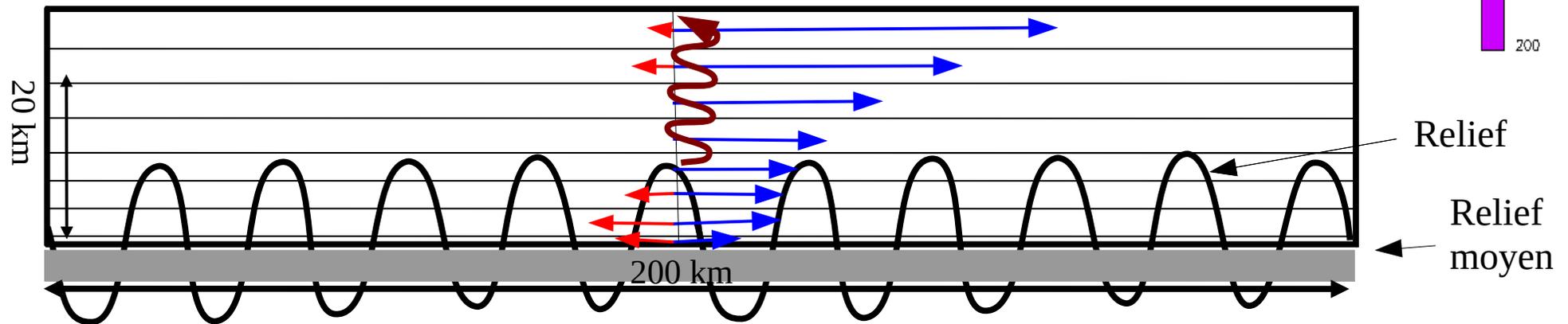
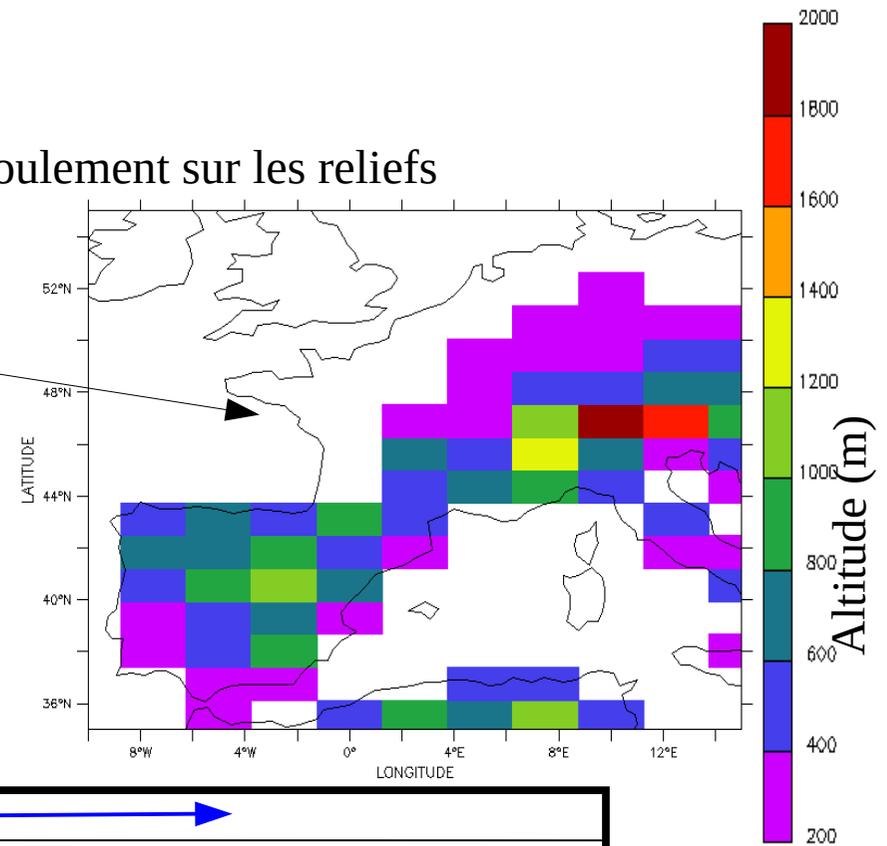
II. Les modèles de circulation générale

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} , 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, ...)



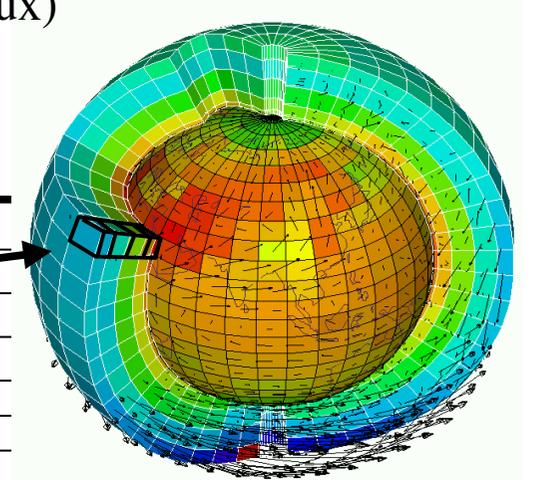
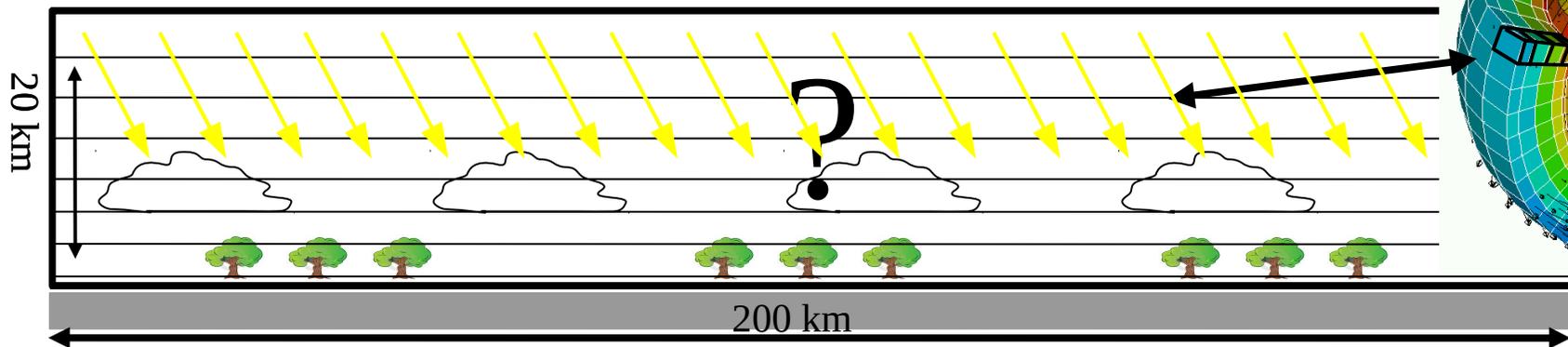
- dérivation d'**équations** reliant ces variables internes aux variables d'état

\underline{U} , θ , q à l'instant t → **variables internes** → \underline{E} , \underline{Q} , Sq → \underline{U} , θ , q à $t+\delta t$

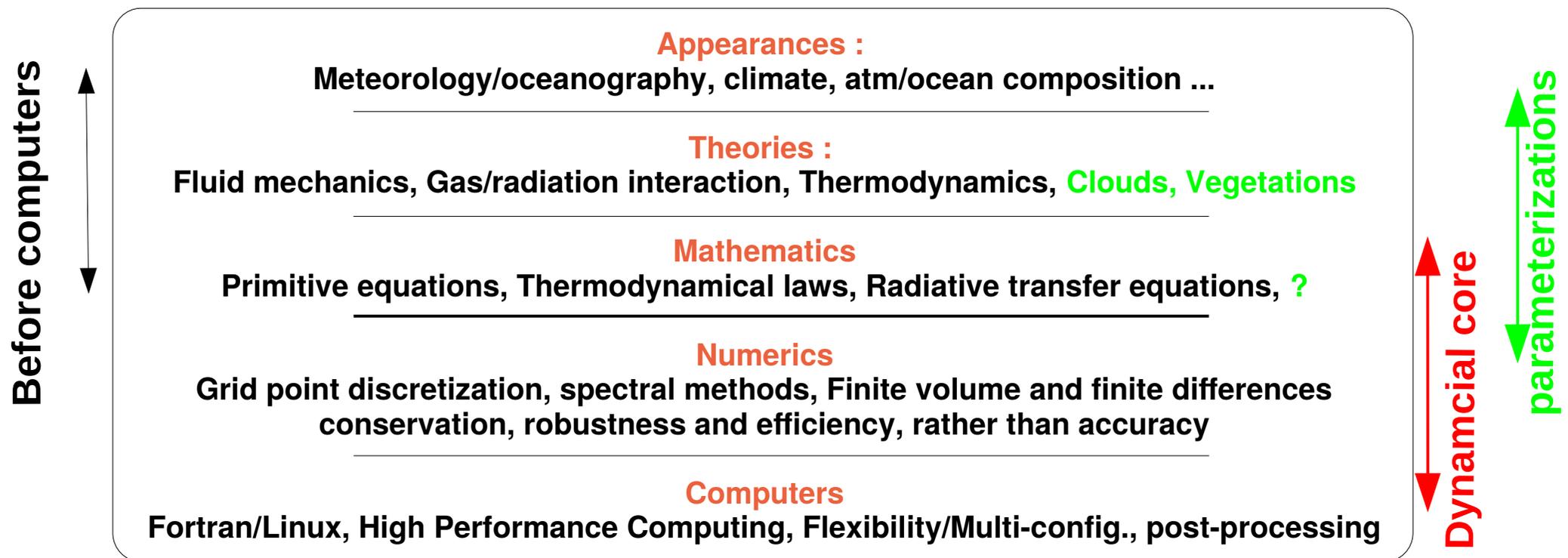


- **hypothèses d'homogénéité** (statistique) horizontale des processus représentés (comme dans l'hypothèse plan parallèle du transfert radiatif)
 - Equations uni-dimensionnelles en z (échanges verticaux)
 - Colonnes atmosphériques indépendantes

Dans une colonne du modèle ...



II. Les modèles de circulation générale



Dynamical core :

Well established equations. Work on approximations, numerics, HPC

Parameterizations :

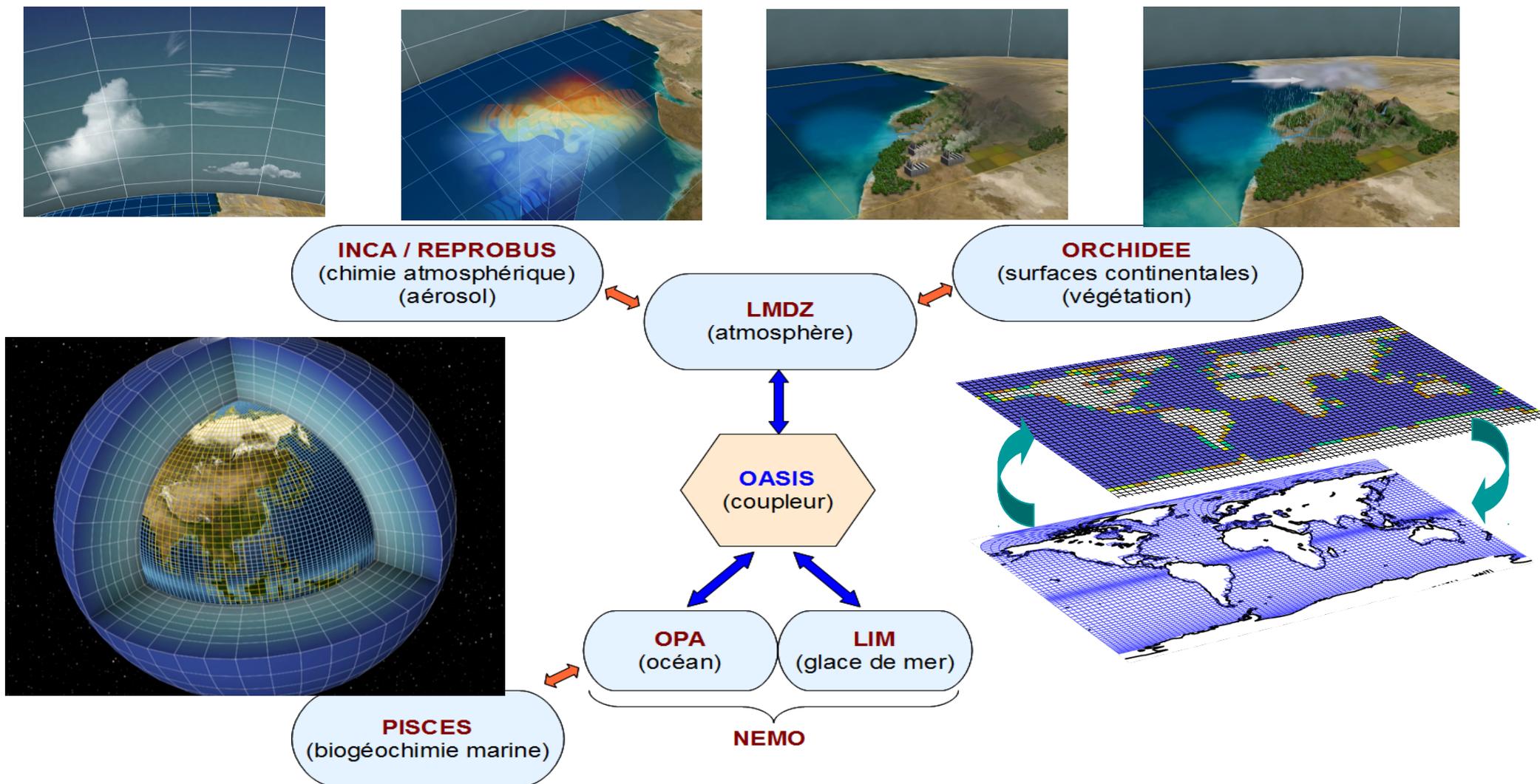
Based on combinations of theories, heuristic approaches, and conservation laws. Many ways possible. Strong diversity across models

General comments :

- Modeling concerns all the layers. Lot of expertises required and shared.
- Be aware of the layer in which you are working, or at which transition between layers¹³
- 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 »

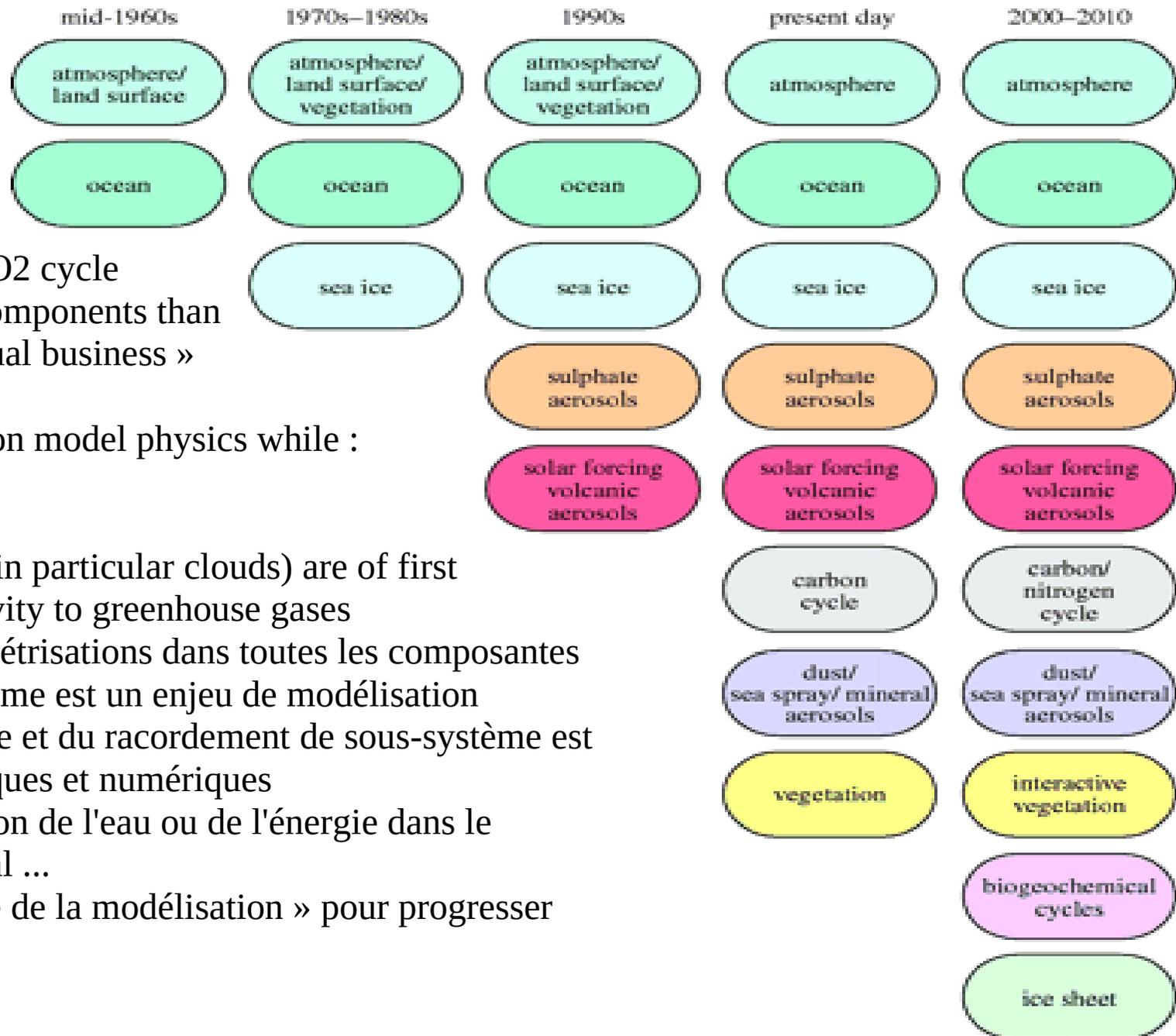
Not much improvement on model physics while :

- 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

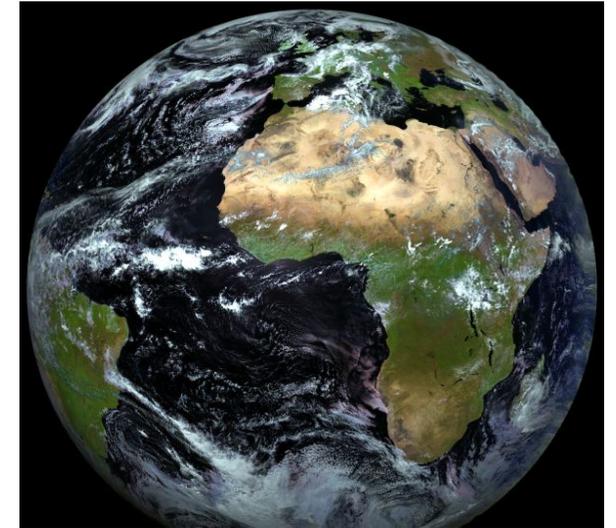
→ Garantir la conservation de l'eau ou de l'énergie dans le système n'est ... pas trivial ...

→ Besoin d'une « culture de la modélisation » pour progresser



III. Les modèles et leurs utilisations

Image météosat



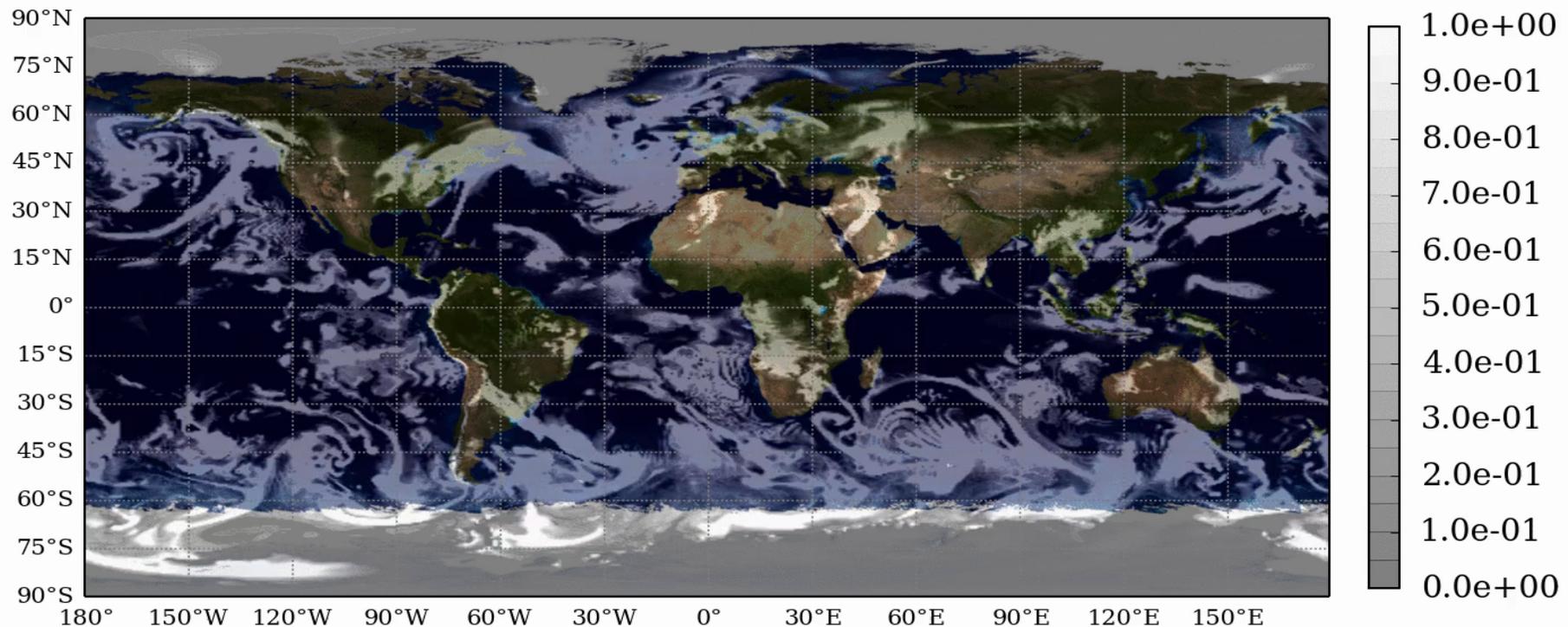
Simulation des nuages sur un mois

Avec le modèle LMDZ, résolution horizontale 50km

Modèles de climat = modèles de prévisions météo

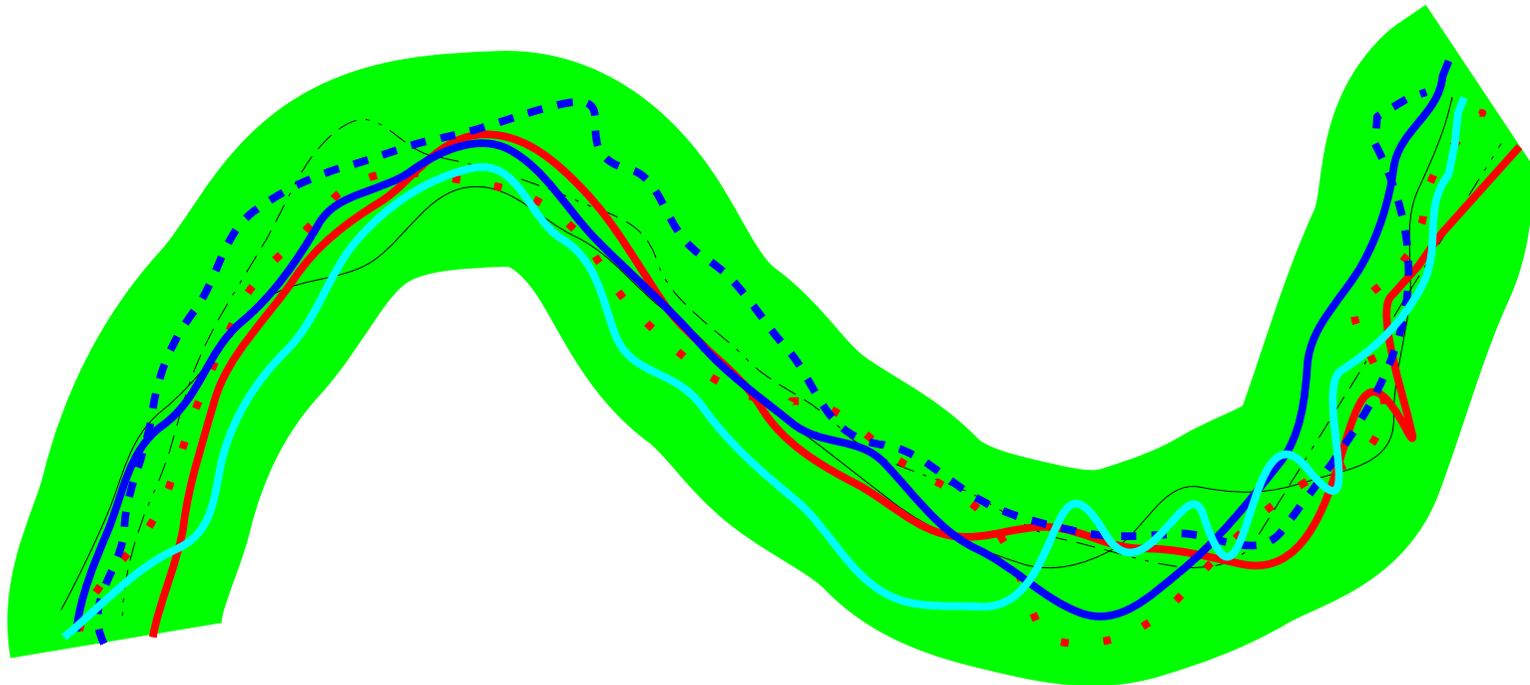
Prévision : 15 jours, état de départ réaliste, déterministe

Climat : siècles, départ quelconque, analyse statistique



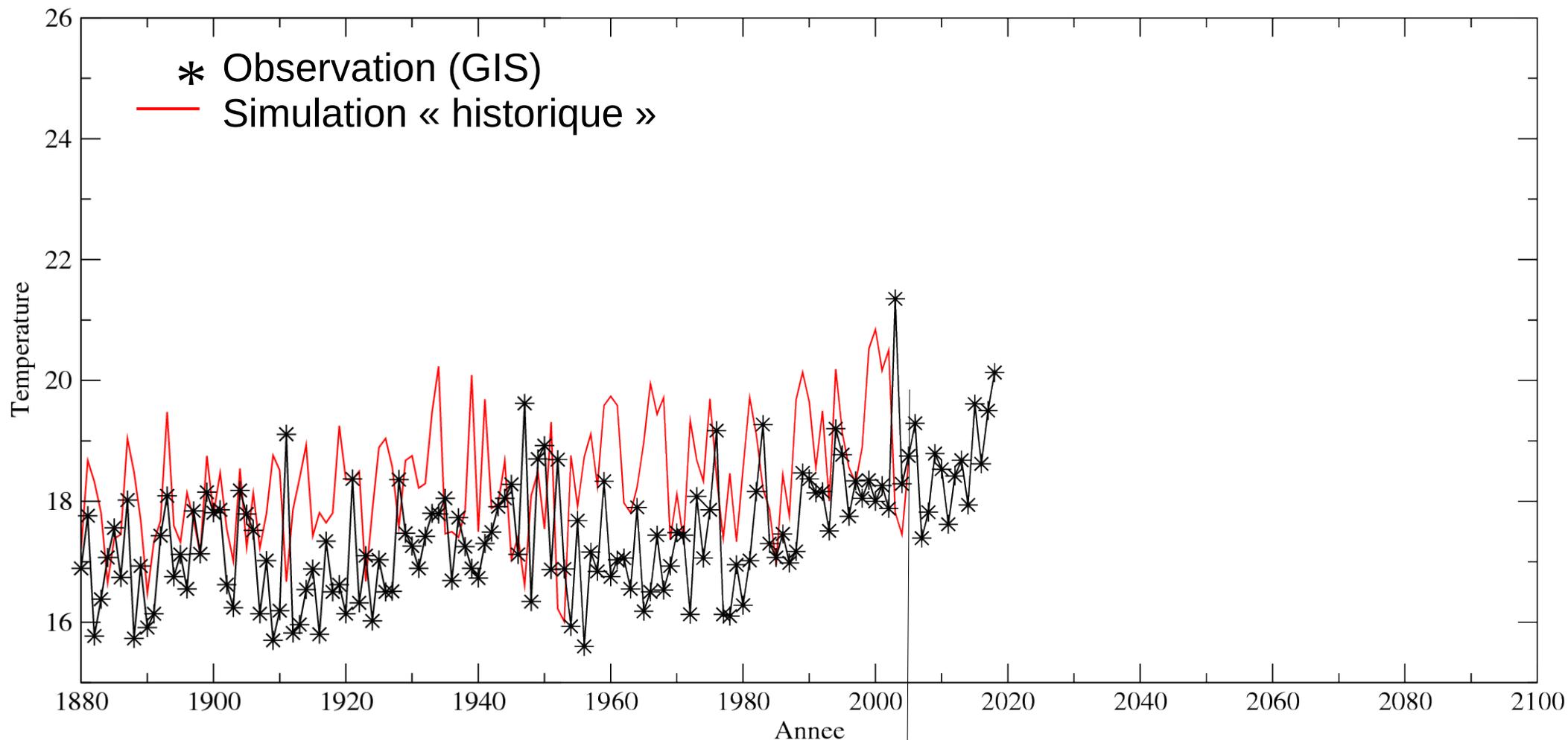
III. Les modèles et leurs utilisations

	Climate modeling	Numerical Weather Forecast
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)



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

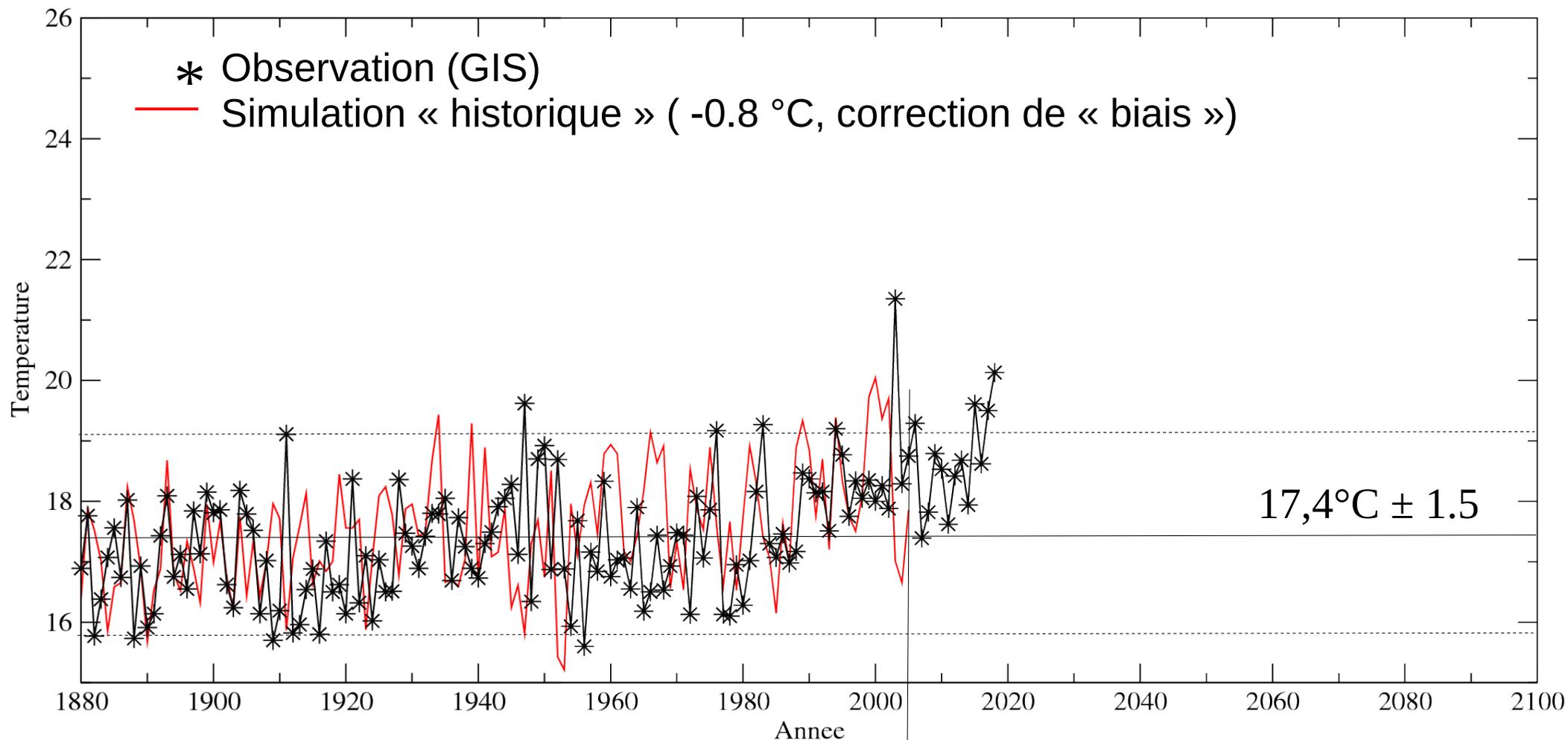
Températures estivales France (°C, Moyenne Juin-Juillet-Août)



Reconstruction

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

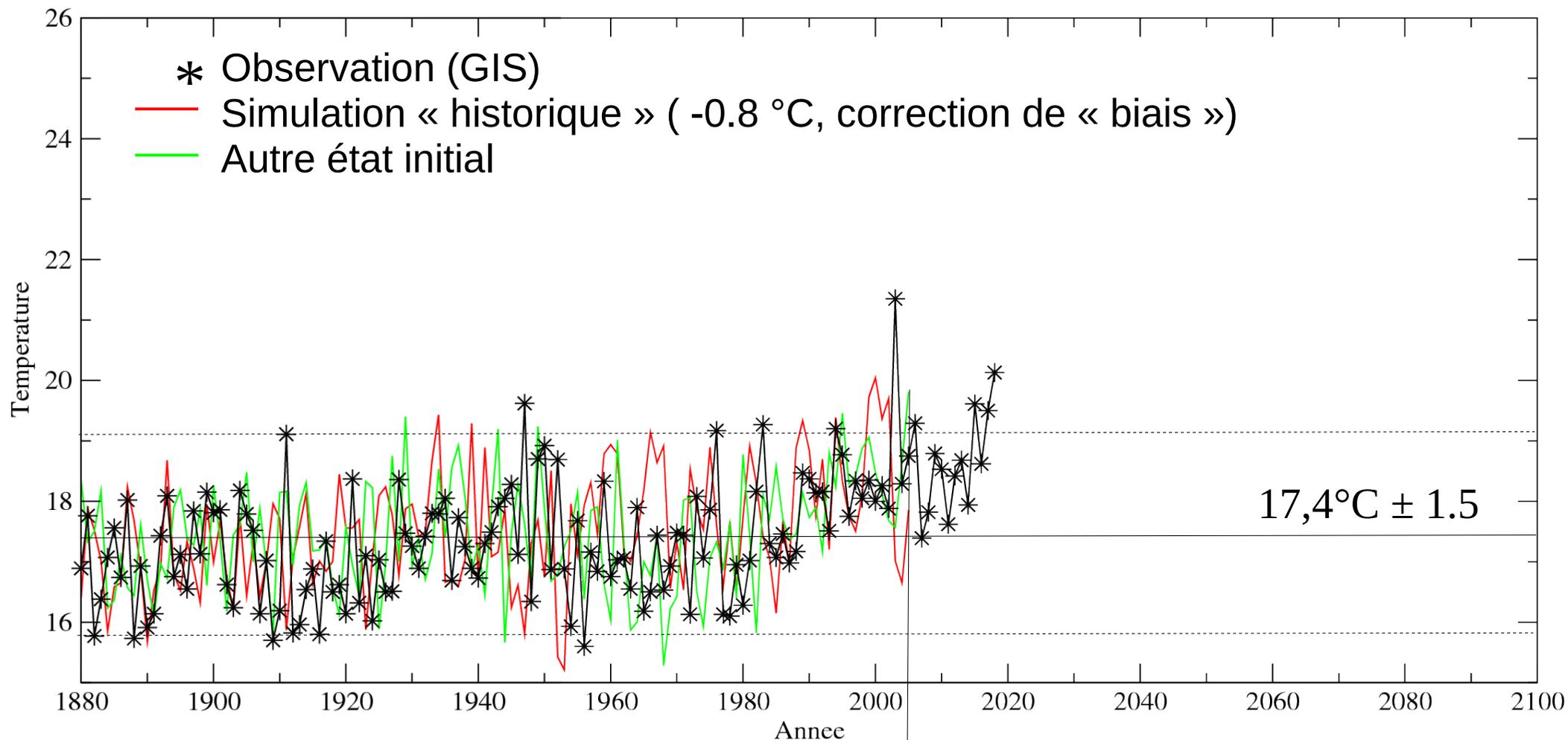
Températures estivales France (°C, Moyenne Juin-Juillet-Août)



Reconstruction

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

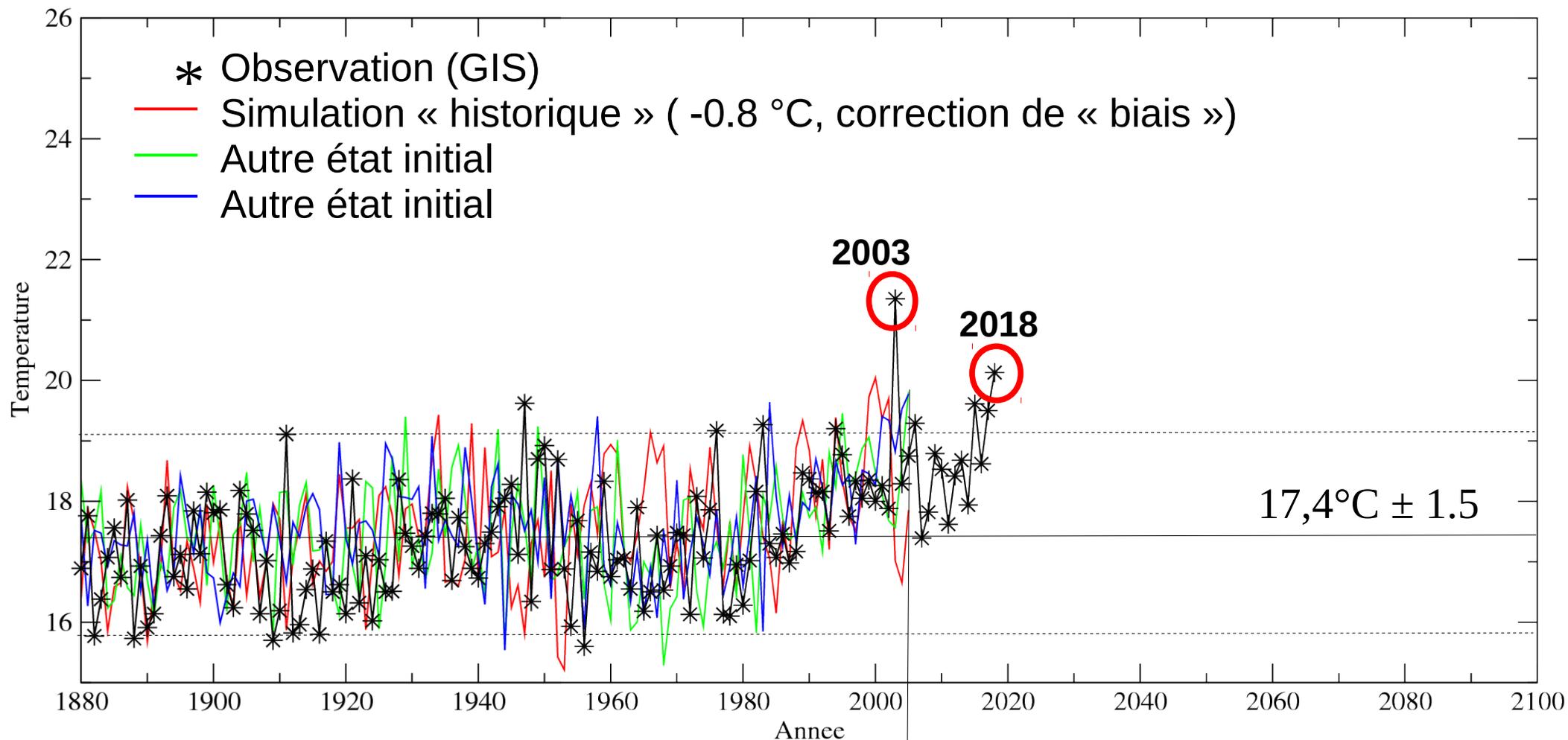
Températures estivales France (°C, Moyenne Juin-Juillet-Août)



Reconstruction

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

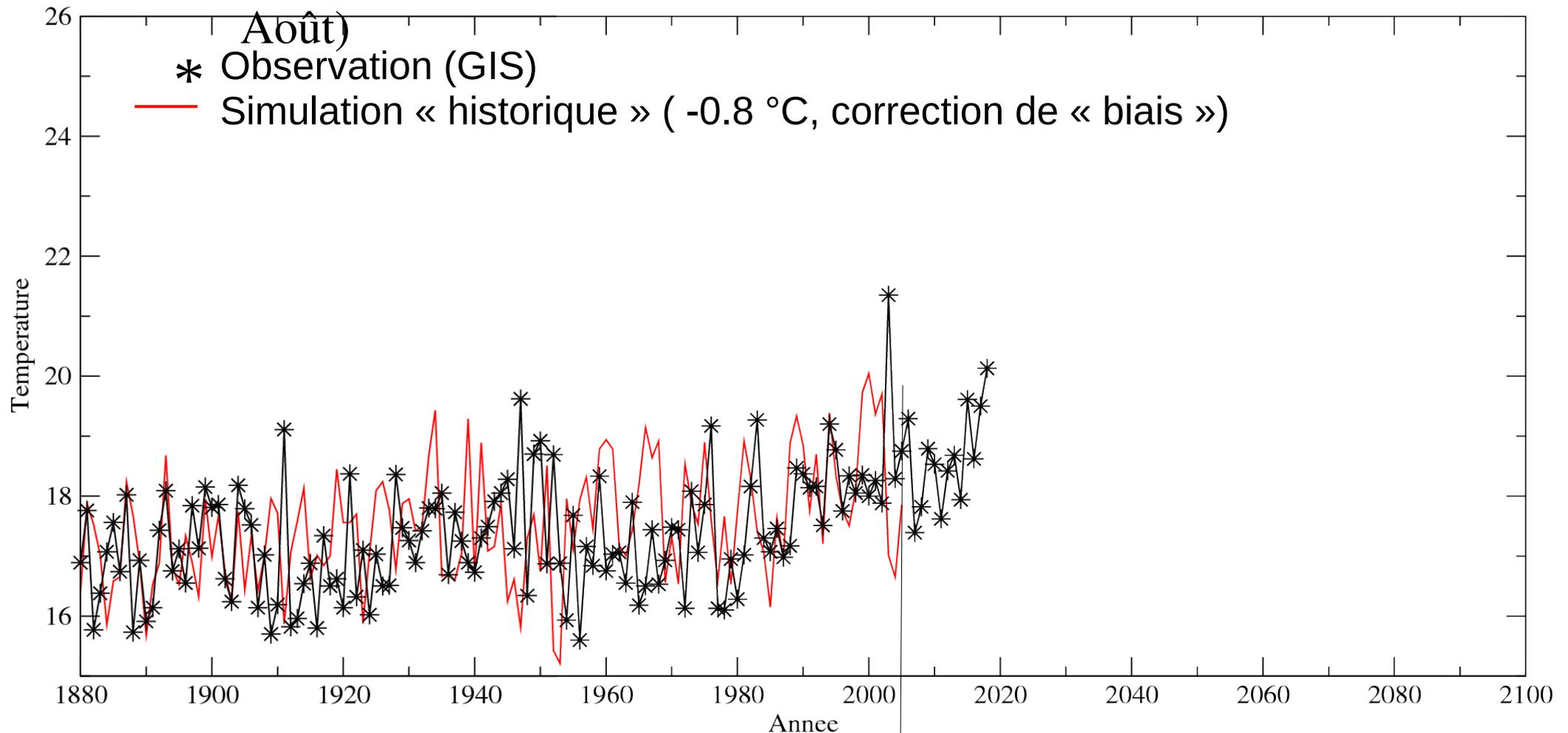
Températures estivales France (°C, Moyenne Juin-Juillet-Août)



Reconstruction

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

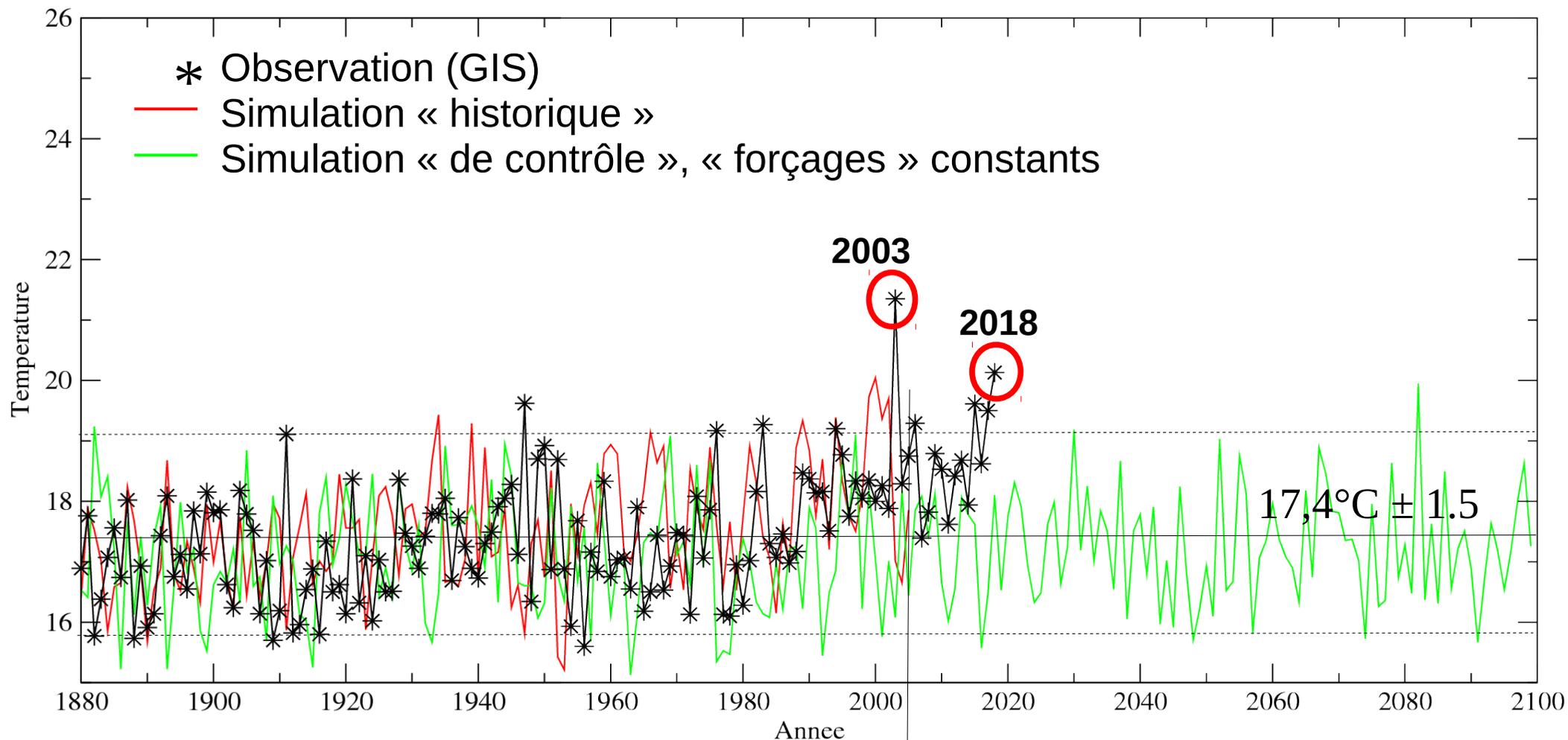
Températures estivales France (°C, Moyenne Juin-Juillet-



Reconstruction

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

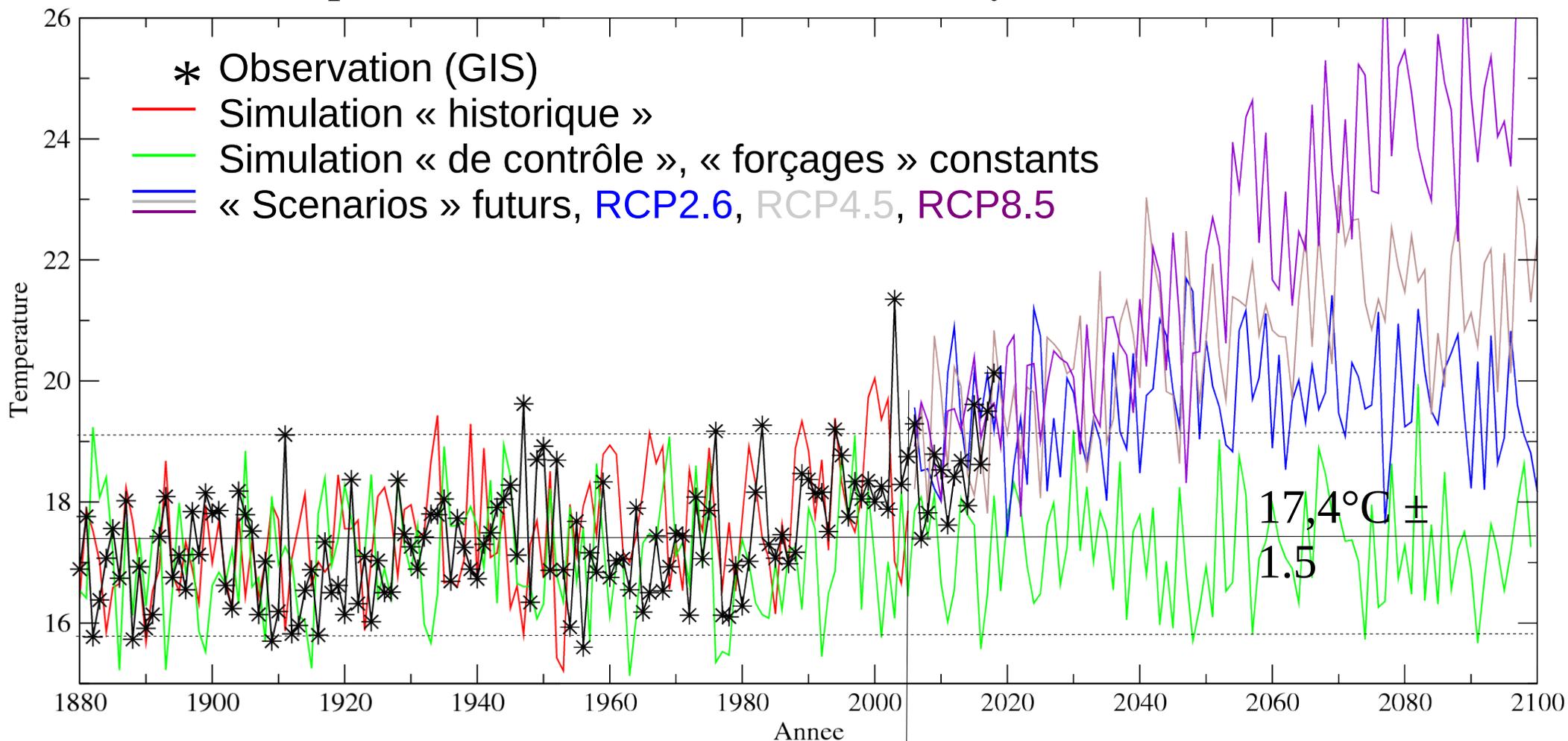
Températures estivales France (°C, Moyenne Juin-Juillet-Août)



Reconstruction

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

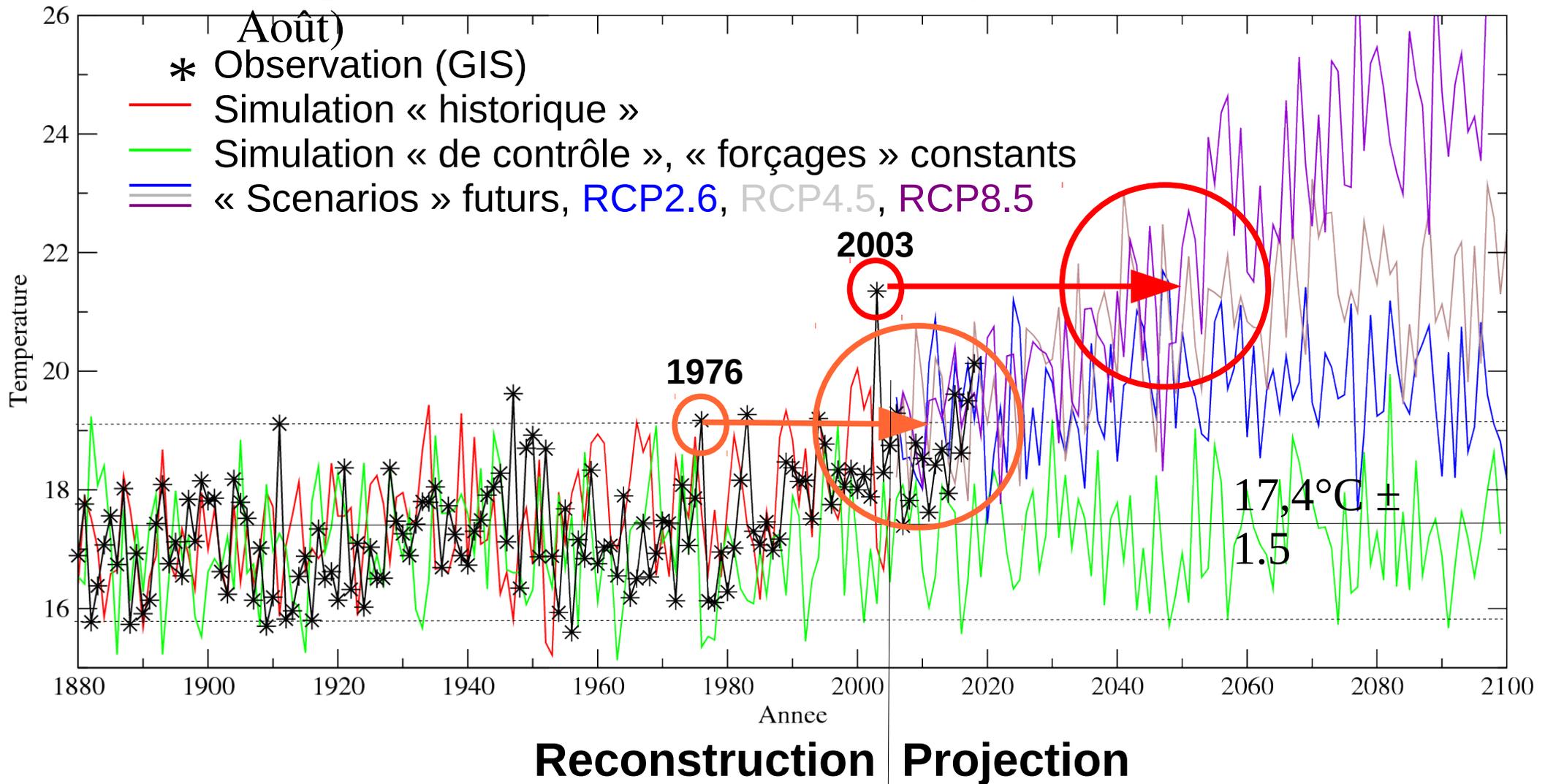
Températures estivales France (°C, Moyenne Juin-Juillet-Août)



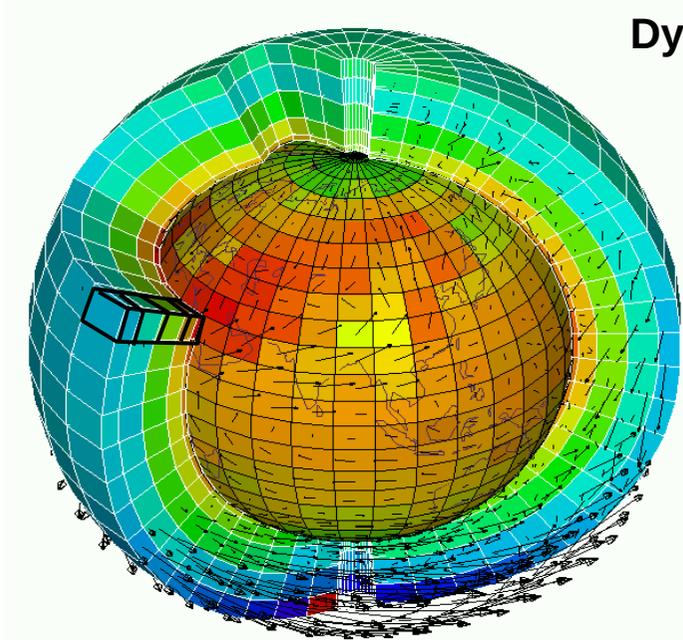
Reconstruction | **Projection**

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

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



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
 $D\theta / Dt = Q / Cp (p_0/p)^\kappa$
- 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, \underline{F}, Sq

+

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

Aujourd'hui :

1/ Coordonnées sphériques

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