

Simulations multi-modèles pour l'anticipation des changements climatiques : enjeux et pratique

Frédéric Hourdin (Laboratoire de Météorologie Dynamique)

hourdin@lmd.jussieu.fr

**Sébastien Denvil, Marie-Alice Foujols, Jean-Louis Dufresne, V. Balaji
+ pole modélisation de l'Institut Pierre Simon Laplace**

I. Les modèles de climat

- Construction
- Utilisation

II. Enjeu des simulations d'ensembles

- Sensibilité à la « physique » atmosphérique
- Sensibilité à l'état initial
- Sensibilité aux paramètres de « tuning »

IV. Le projet CMIP5 et les projections du changement climatique

- Réalisation de simulations coordonnées
- Distribution de données

I. Les modèles de climat

→ Construction

→ Utilisation

II. Enjeu des simulations d'ensembles

→ Sensibilité à la « physique » atmosphérique

→ Sensibilité à l'état initial

→ Sensibilité aux paramètres de « tuning »

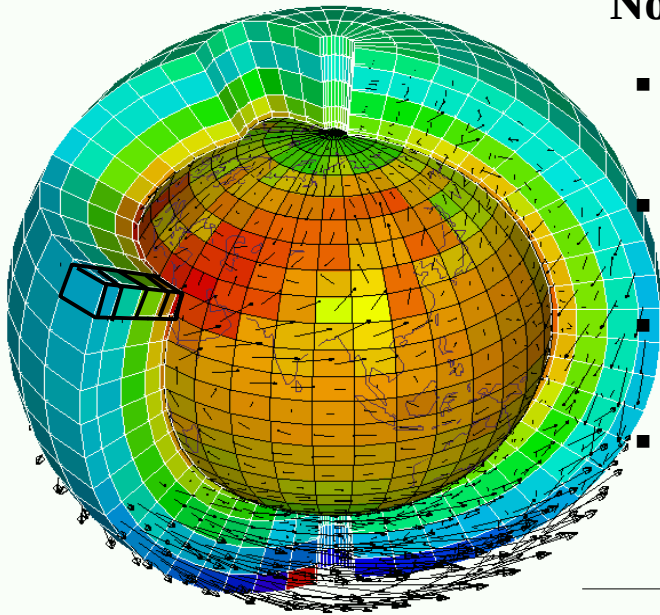
IV. Le projet CMIP5 et les projections du changement climatique

→ Réalisation de simulations coordonnées

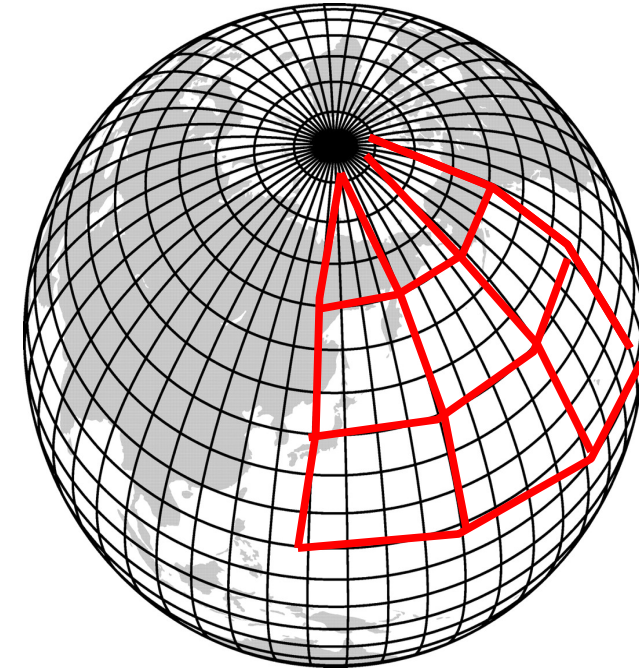
→ Distribution de données

I. Modèles de circulation générale = Noyau dynamique +

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



Version simplifiée : Equations primitives de la météorologie

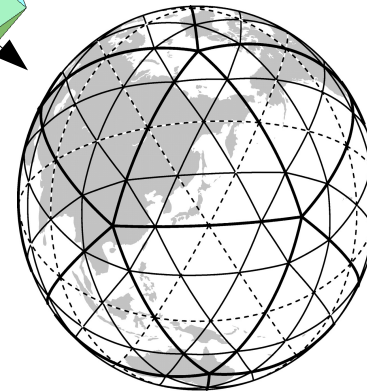
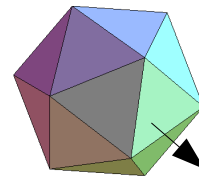
→ Approximation de couche mince

→ Approximation hydrostatique

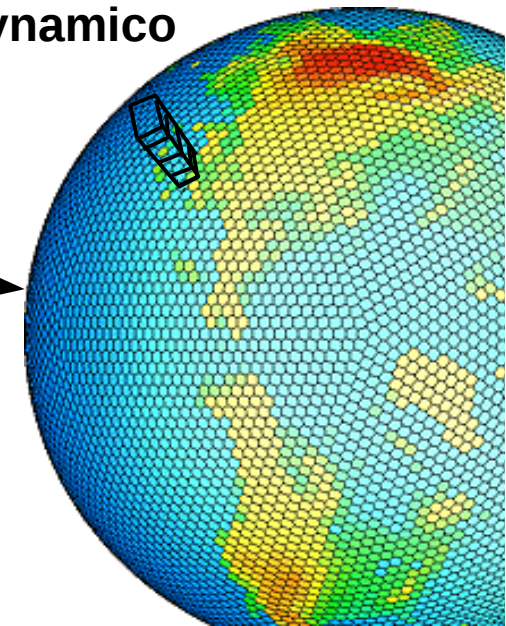
Equations mathématiques continues

Différences finies, volumes finis, éléments finis

Renouveau sur le développement des coeurs
dynamique poussé par la parallélisation

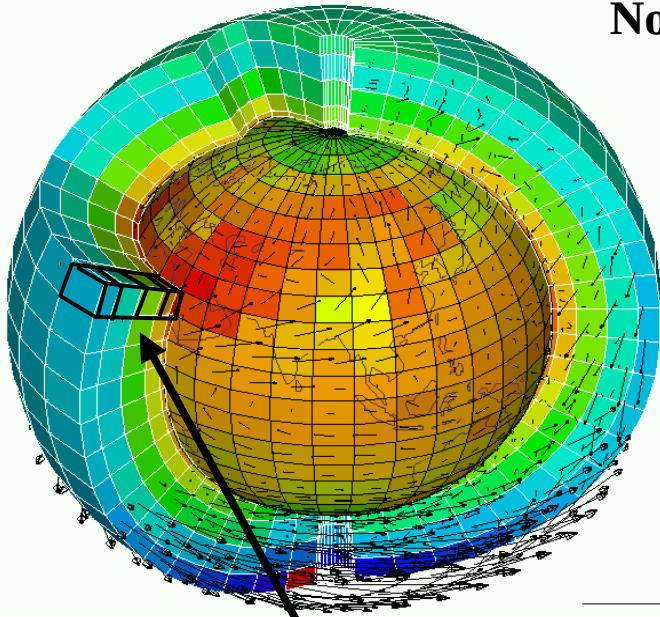


Dynamico

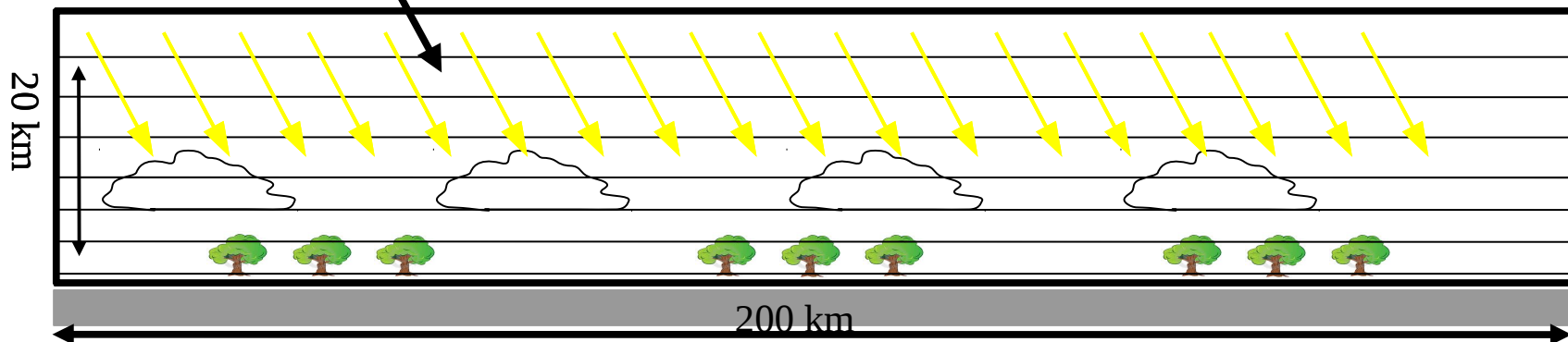


I. Modèles de circulation générale = Noyau dynamique + paramétrisations physiques

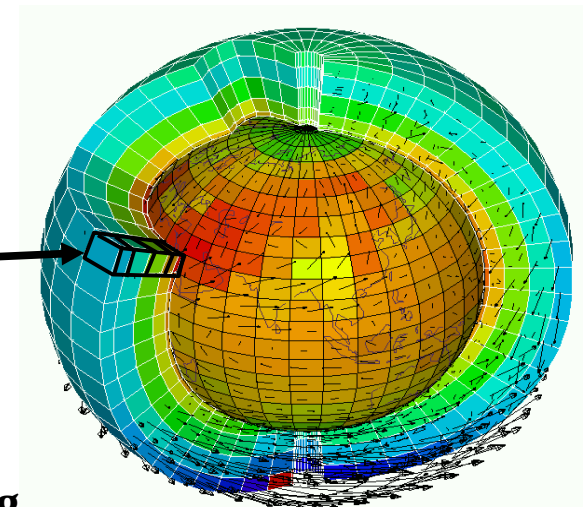
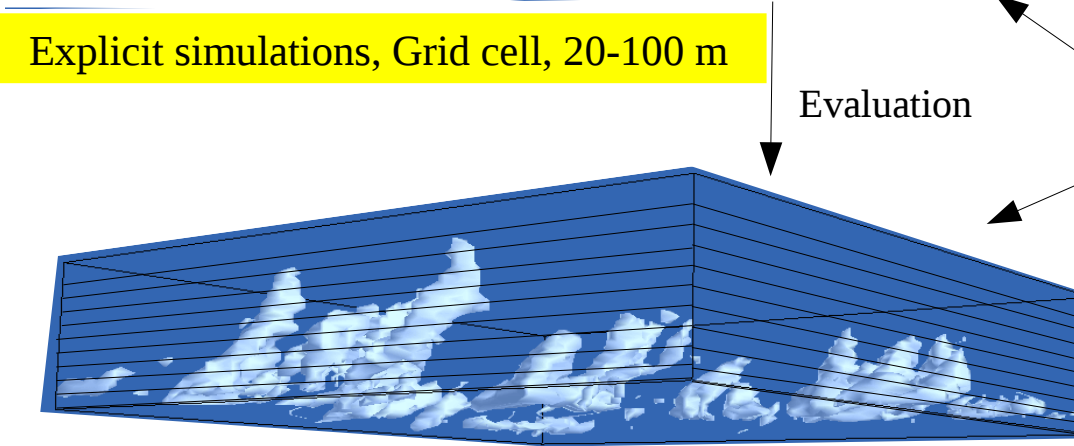
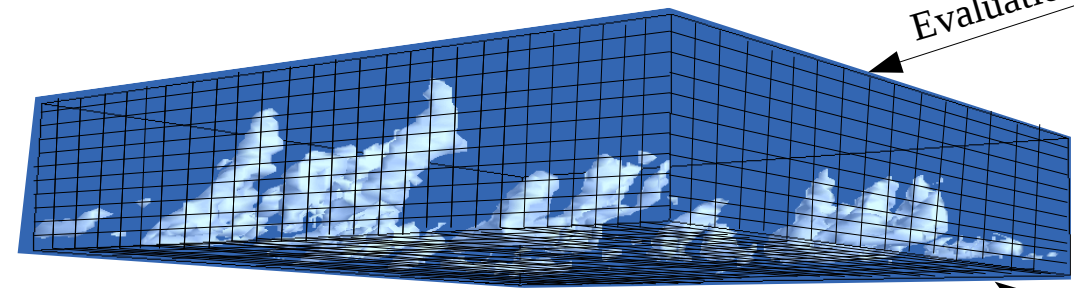
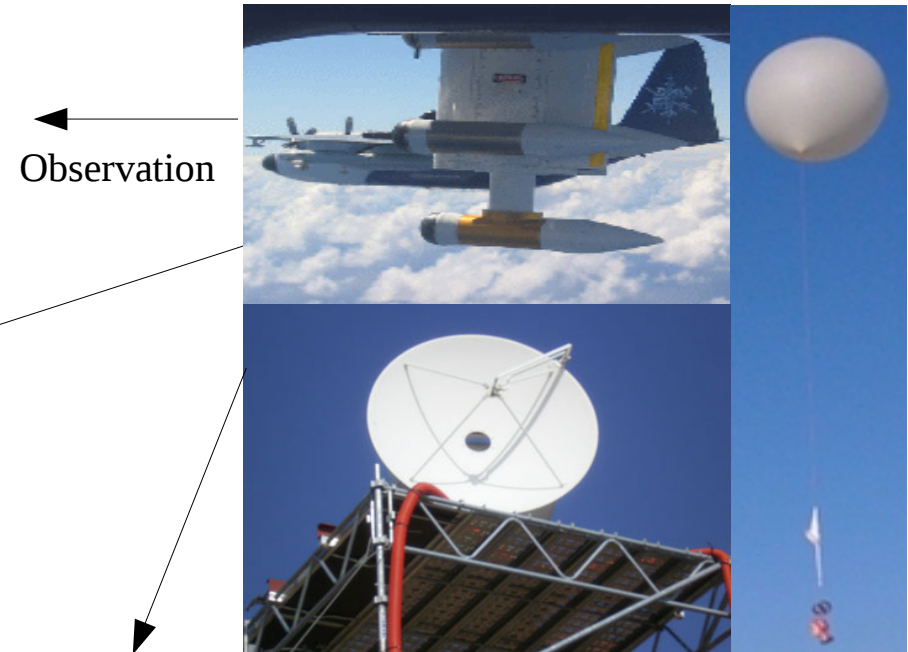
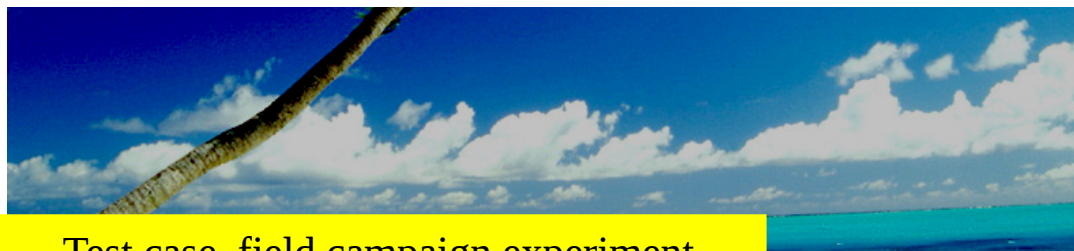
Noyau dynamique : équations de bases discrétisées sur la sphère



- 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
 $Dq/Dt = Sq$

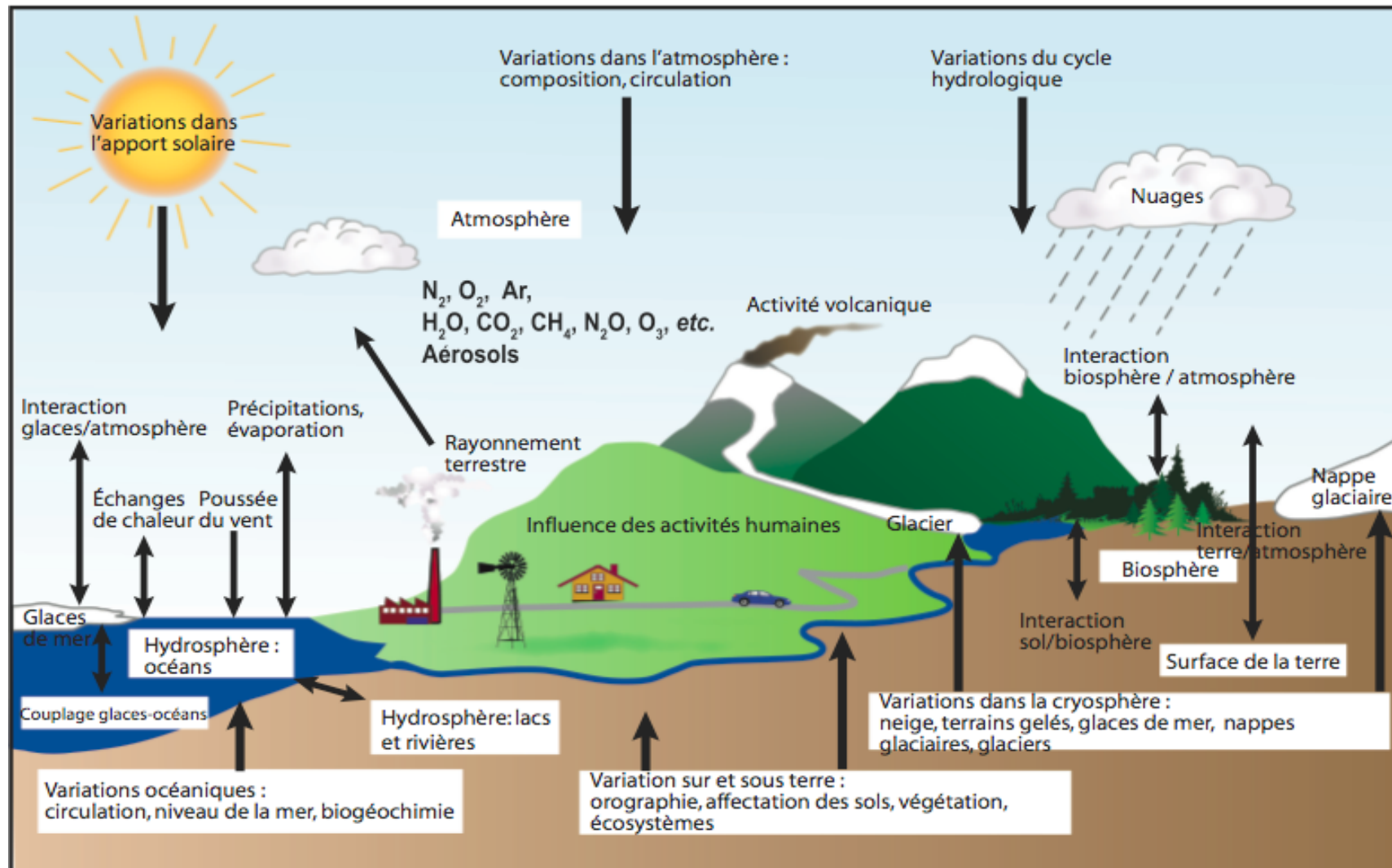


I.2 Cloud process studies and the use of high resolution explicit models

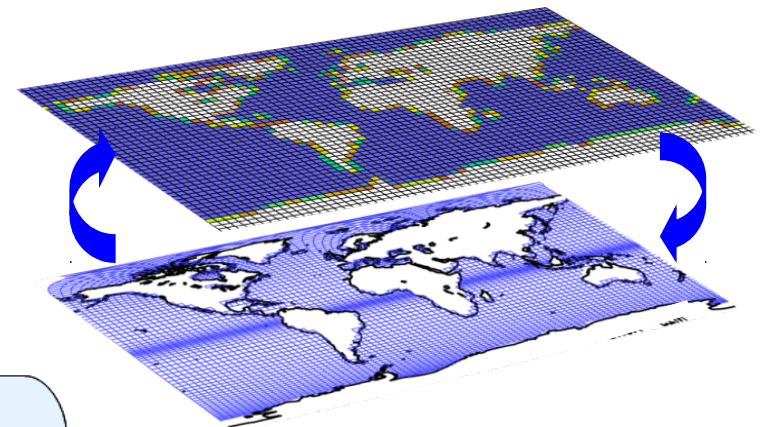
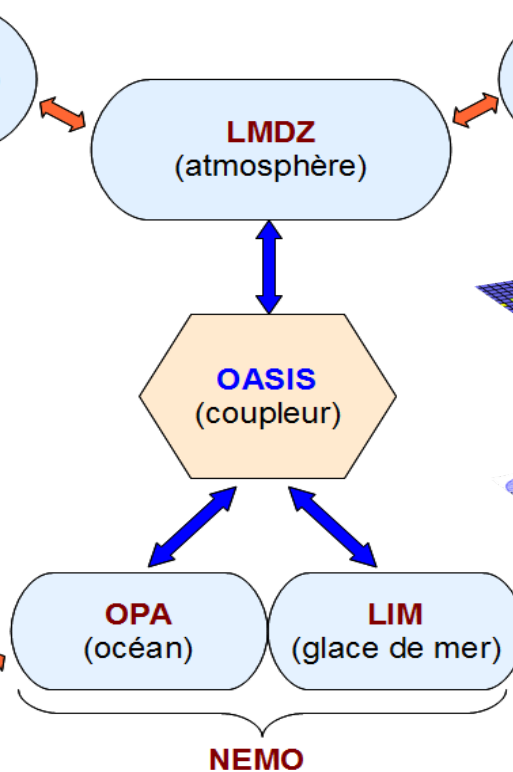
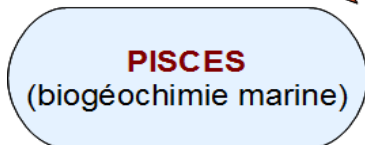
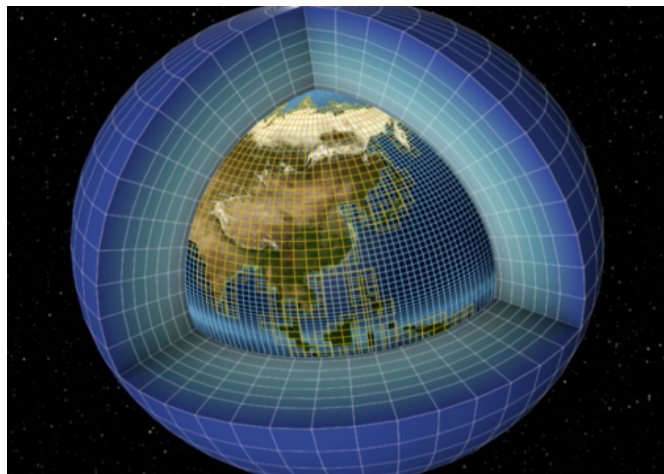
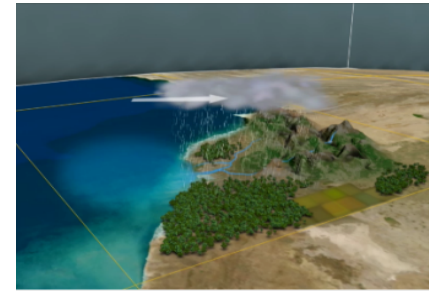
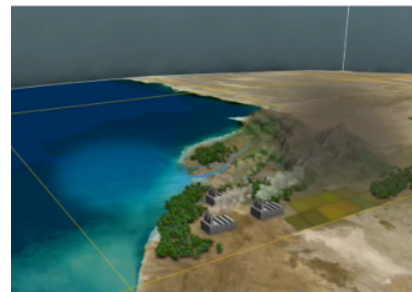
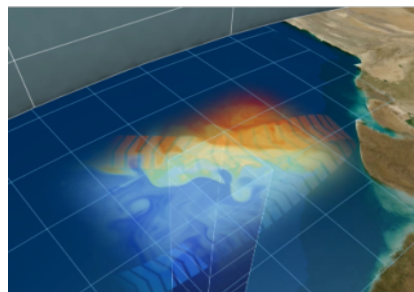
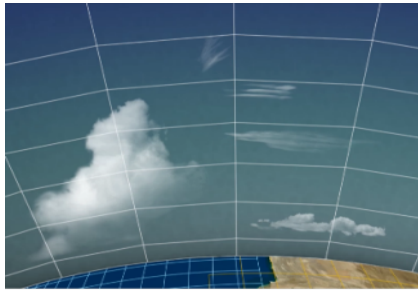


- Parameterizations are evaluated against other models
- Can be done for realistic test cases but also with more idealized forcing (check the response of the parameterization to perturbations)

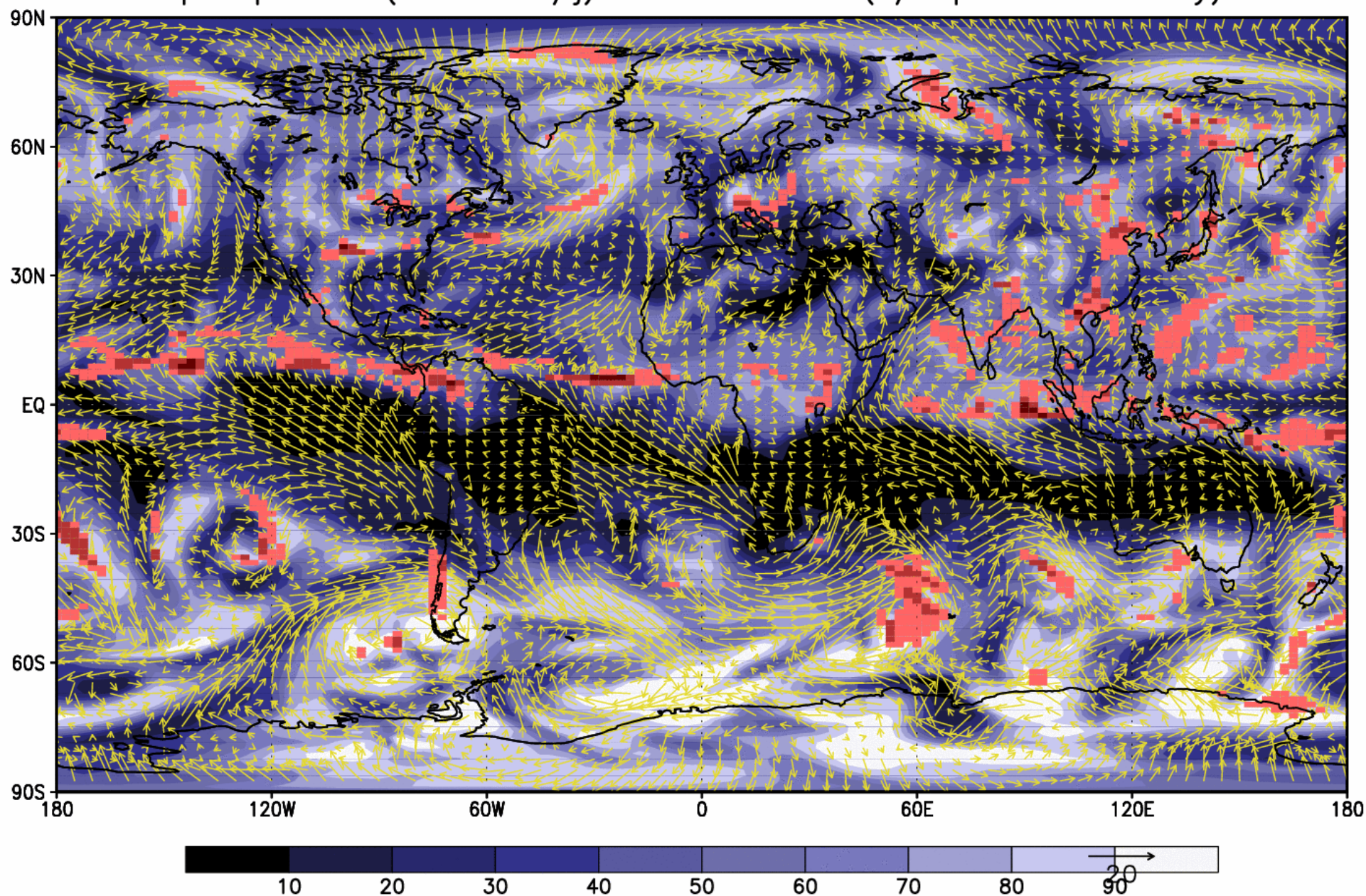
Le système climatique



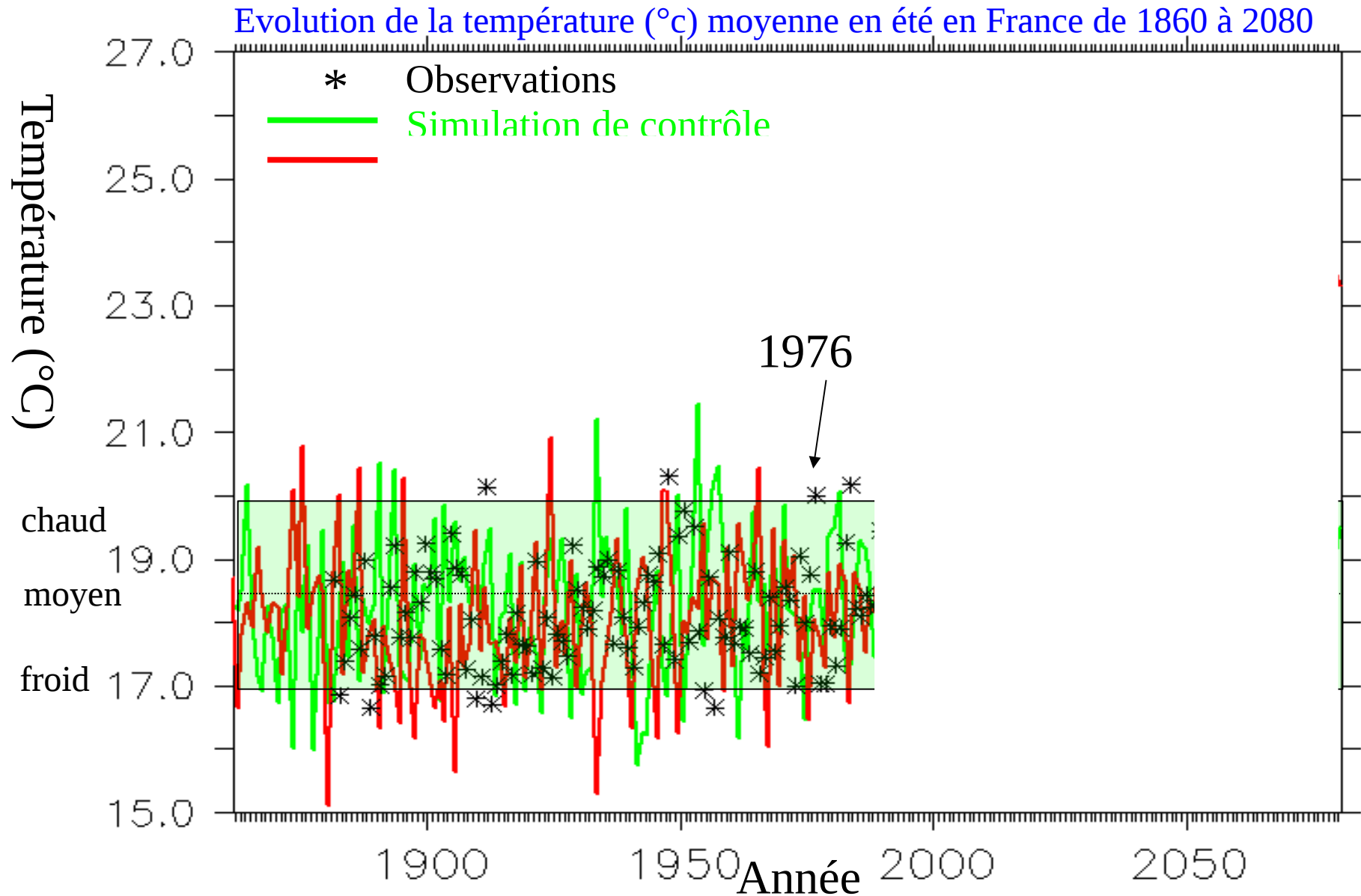
Le modèle de climat ou « du système terre » de l'IPSL = des modèles



2 Aout
humidite relative (500hPa, %)
precipitation (> 10 mm/j) et vent a 10m (1/2 points en x et y)



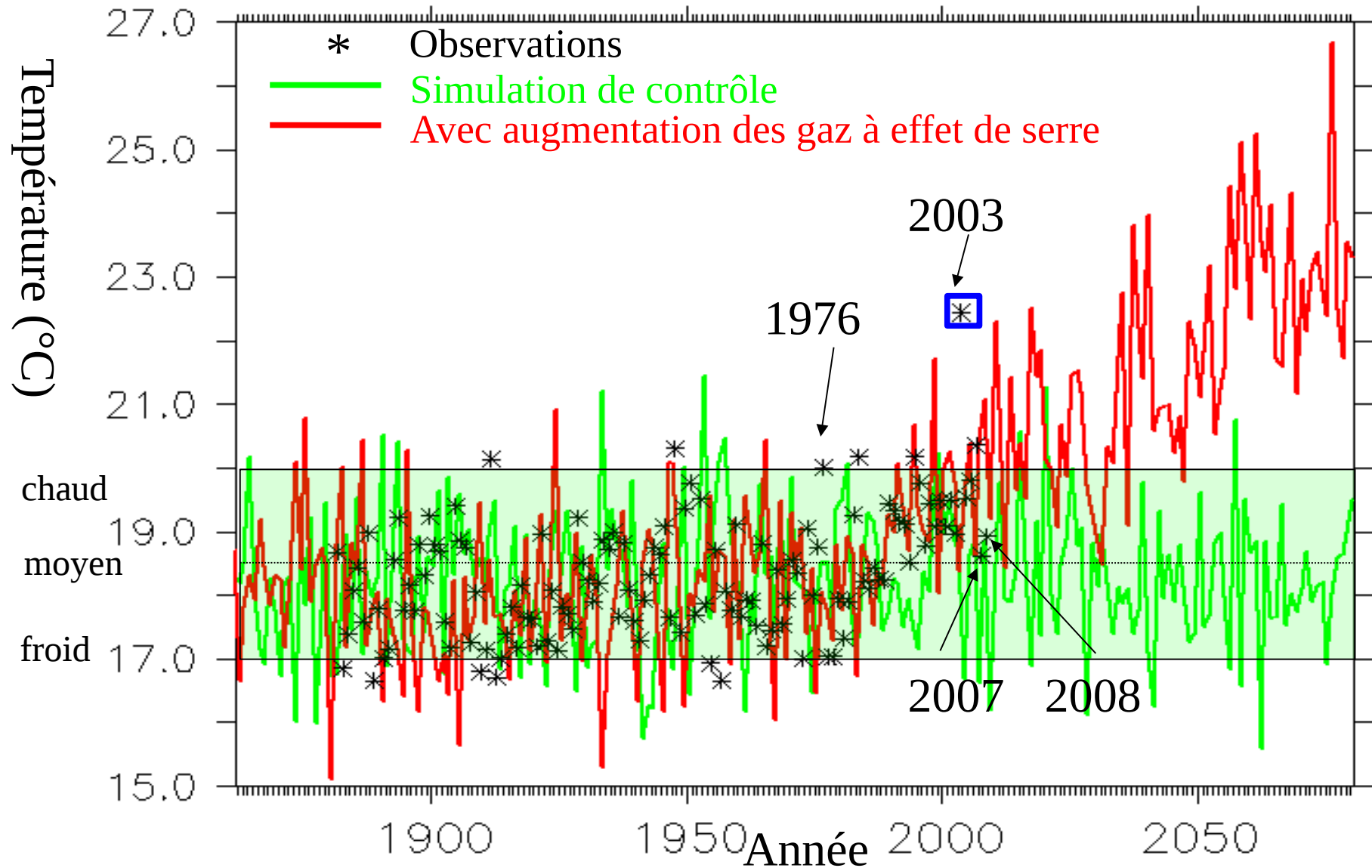
III. Utilisation climatique des modèles



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

III. Utilisation climatique des modèles

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



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

I. Les modèles de climat

- Construction
- Utilisation

II. Enjeu des simulations d'ensembles

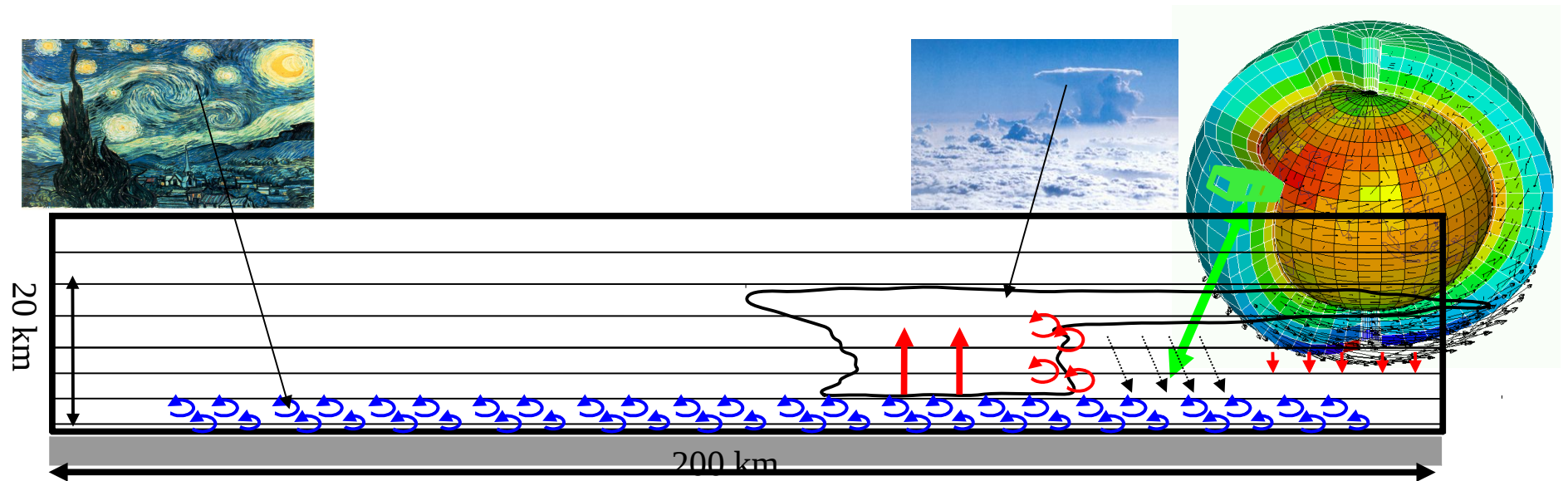
- Sensibilité à la « physique » atmosphérique
- Sensibilité à l'état initial
- Sensibilité aux paramètres de « tuning »

IV. Le projet CMIP5 et les projections du changement climatique

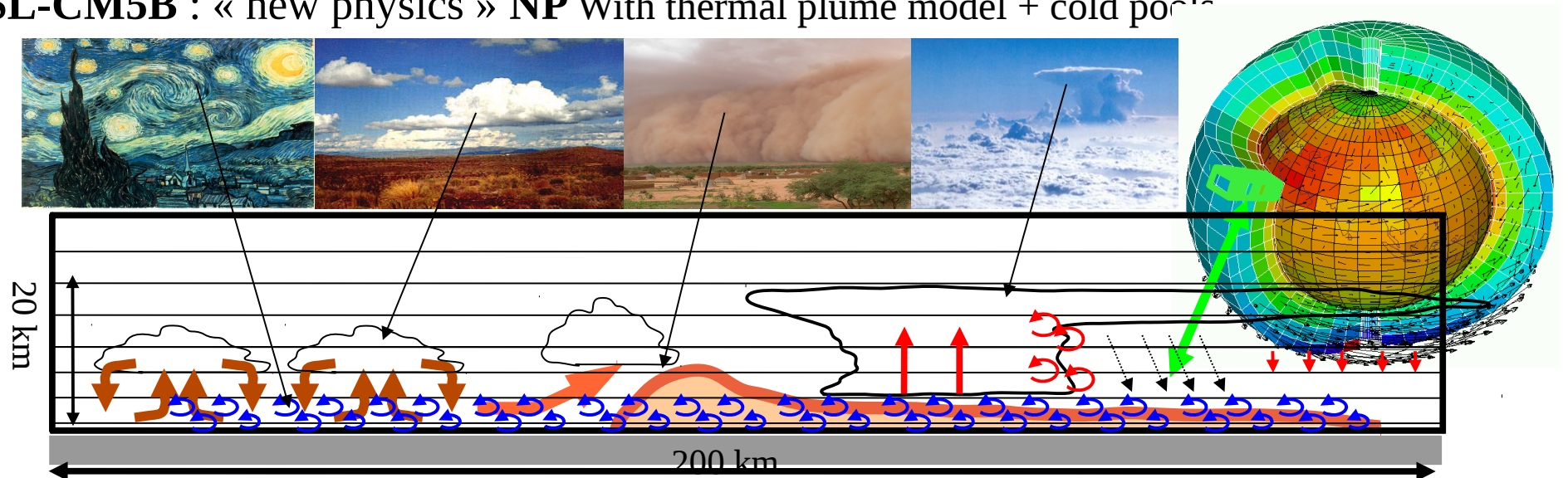
- Réalisation de simulations coordonnées
- Distribution de données

Deux versions des paramétrisation des nuages et de la pluies dans le modèle LMDZ

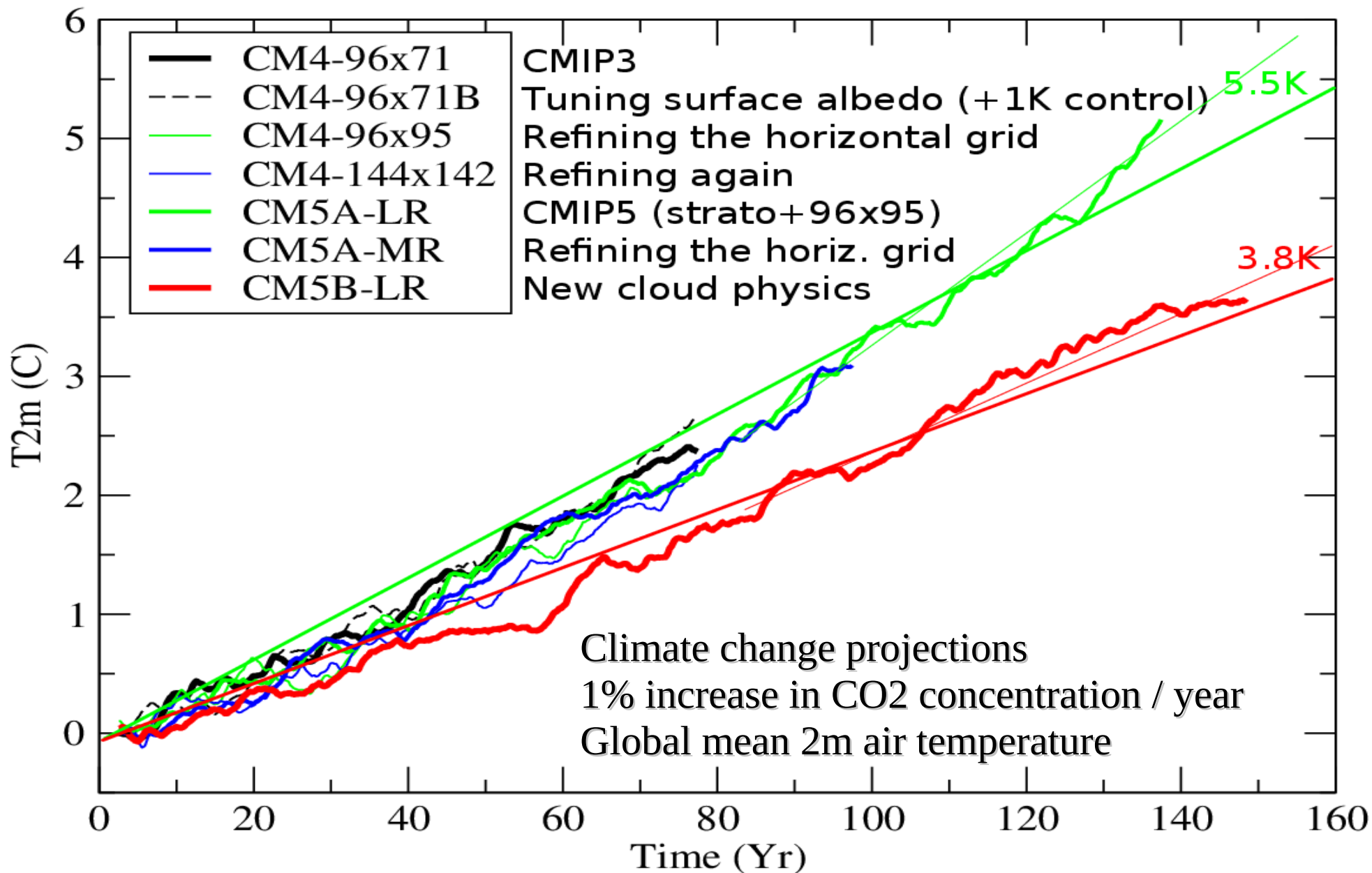
1. IPSL-CM5A : standard version SP. Physics already used in CMIP3



2. IPSL-CM5B : « new physics » NP With thermal plume model + cold pool



Deux versions des paramétrisation des nuages et de la pluies dans le modèle LMDZ

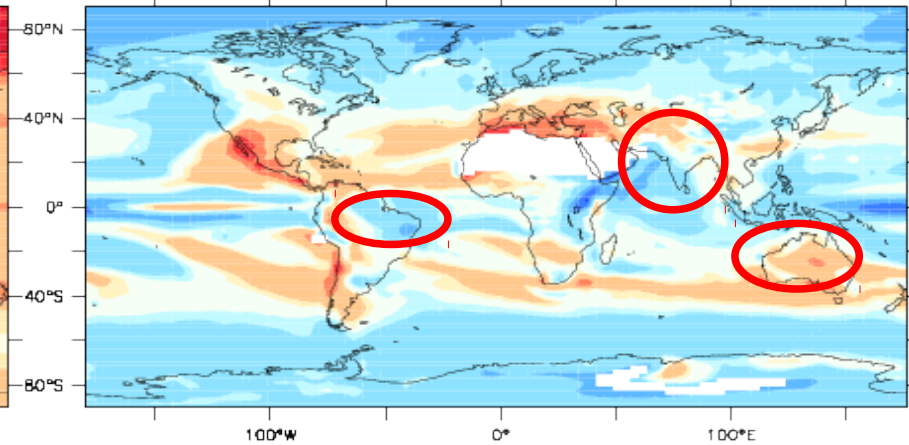
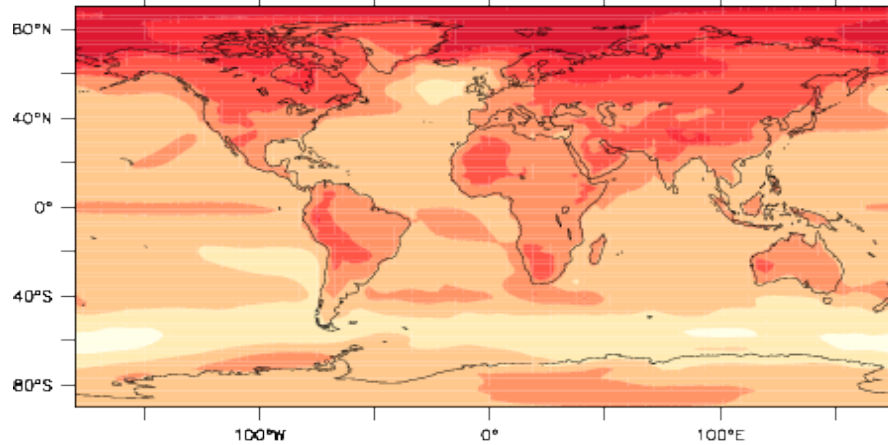


Deux versions des paramétrisation des nuages et de la pluies dans le modèle LMDZ

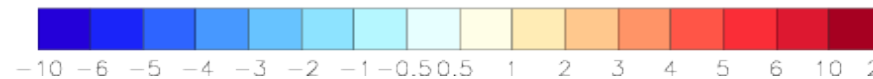
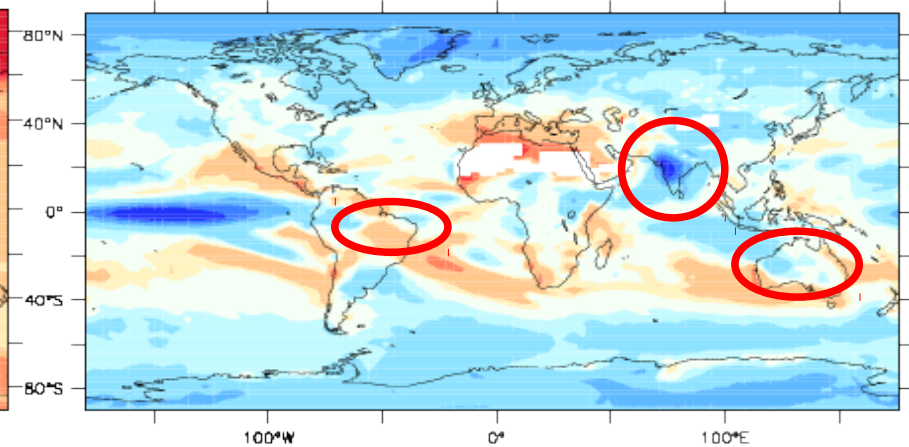
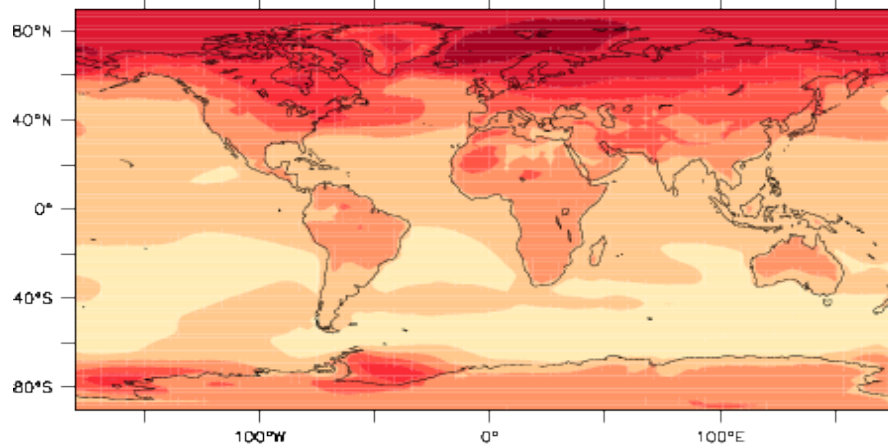
Change in surface temperature (K)
(for a 3K averaged change)

Change in annual mean rainfall (mm/day)
(for a 3K averaged change)

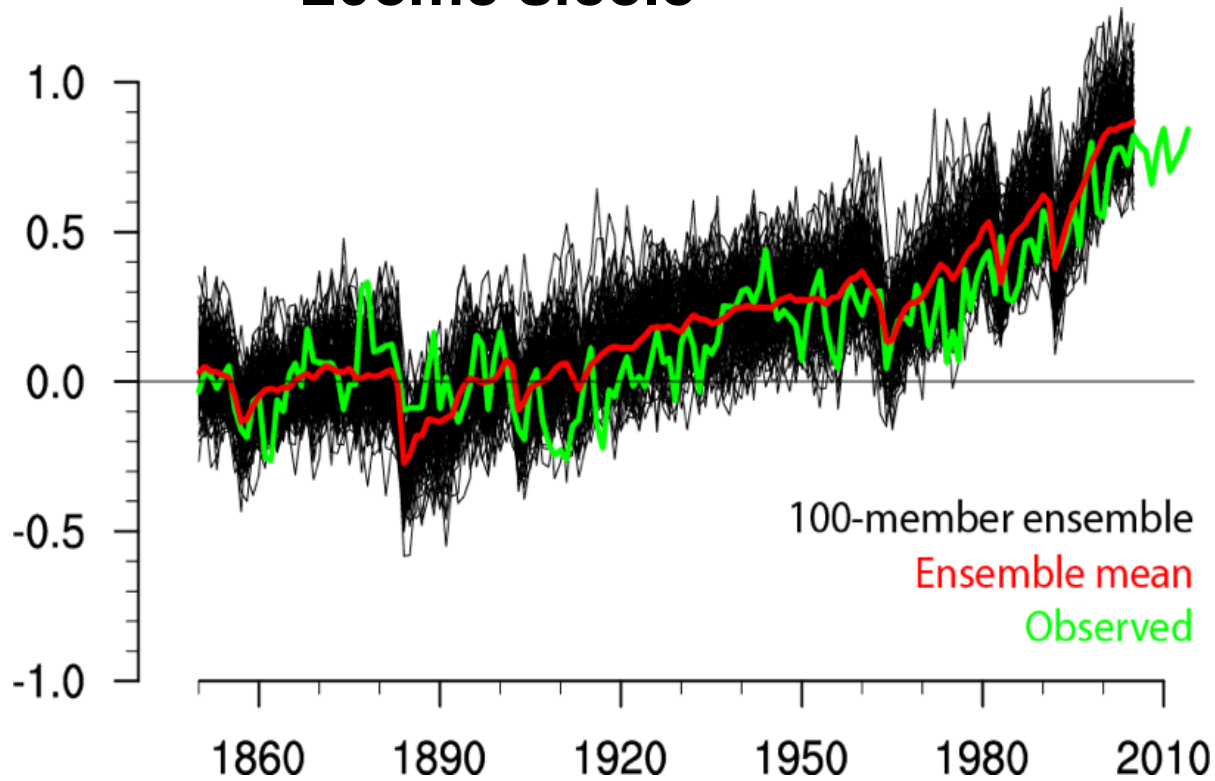
IPSL-CM5A



IPSL-CM5B

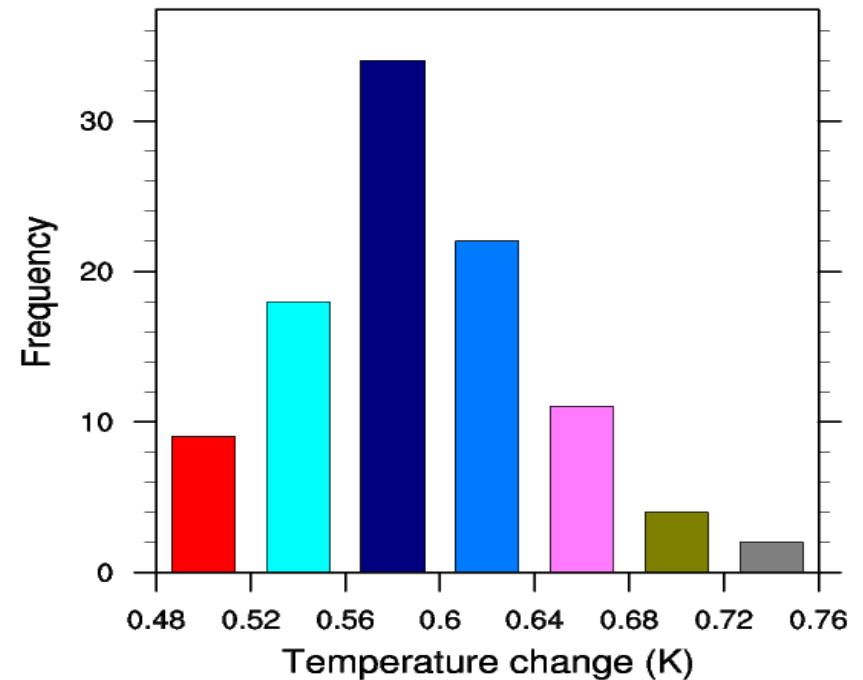


Evolution de la température moyenne globale 20ème siècle

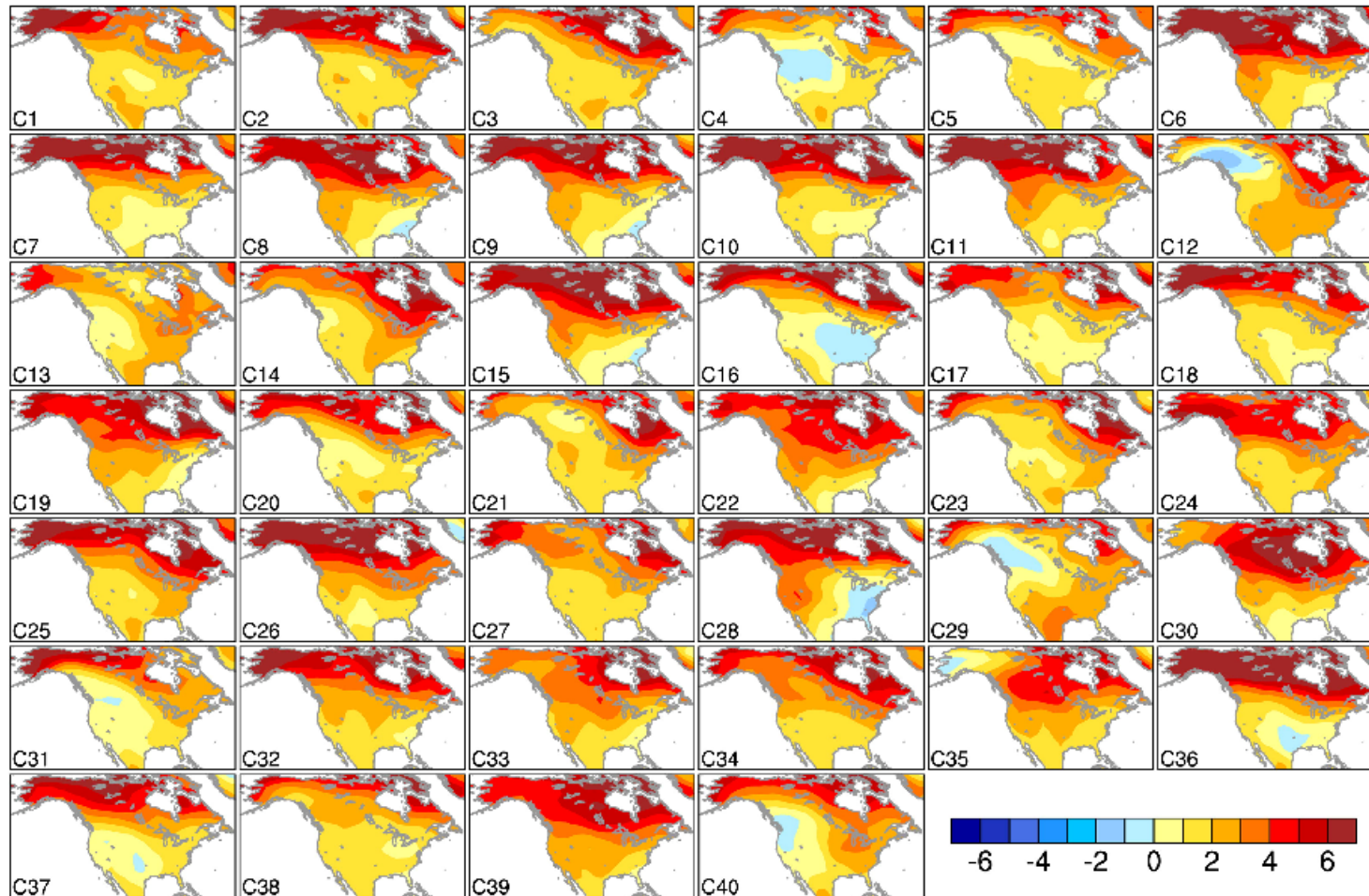


Distribution du changement de température
entre 1850-1900 et 1970-2010

100 simulations du 20ème
siècle avec un même
modèle mais des
conditions initiales
différentes (modèle MPI,
T. Mauritsen)



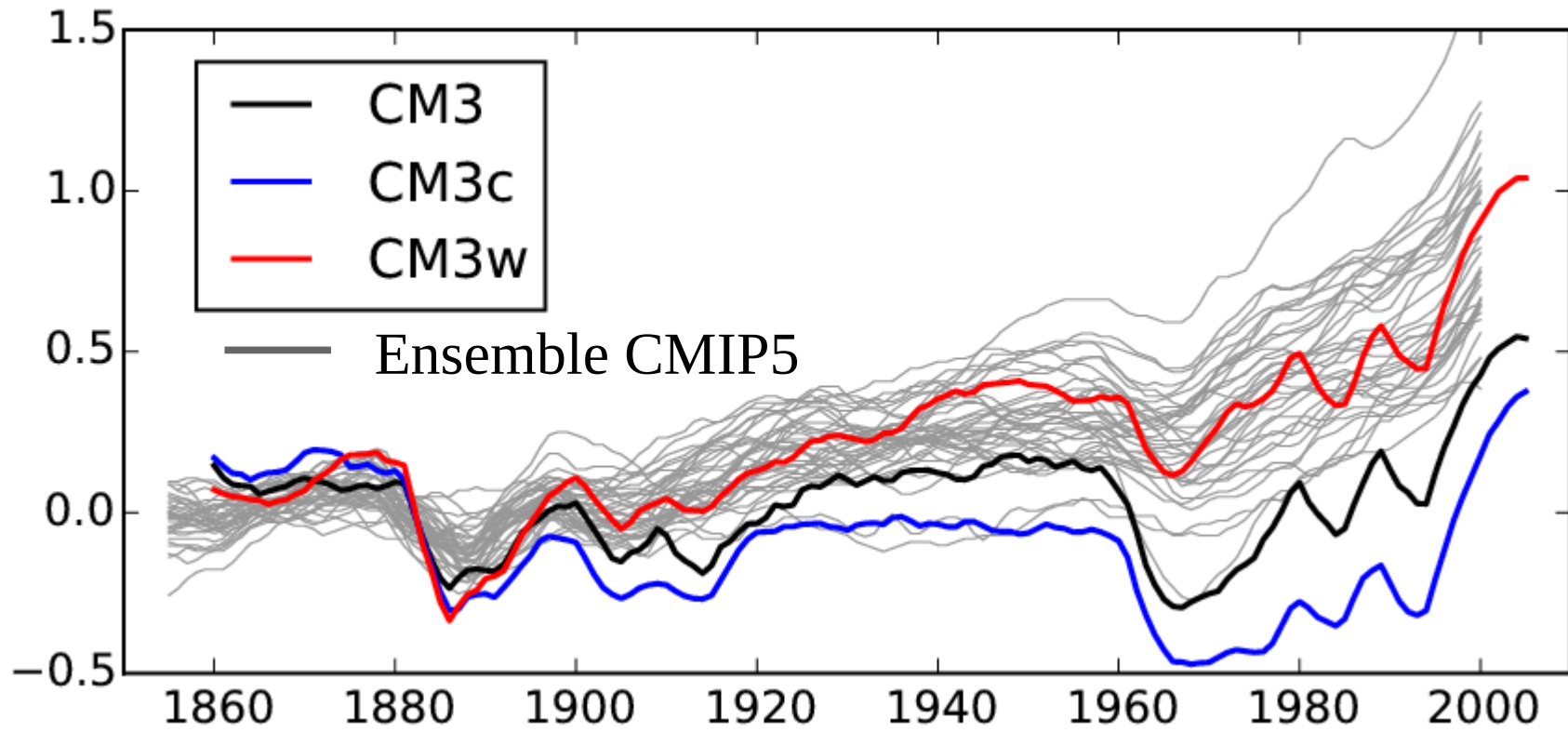
Even 50-year regional trends exhibit natural variability



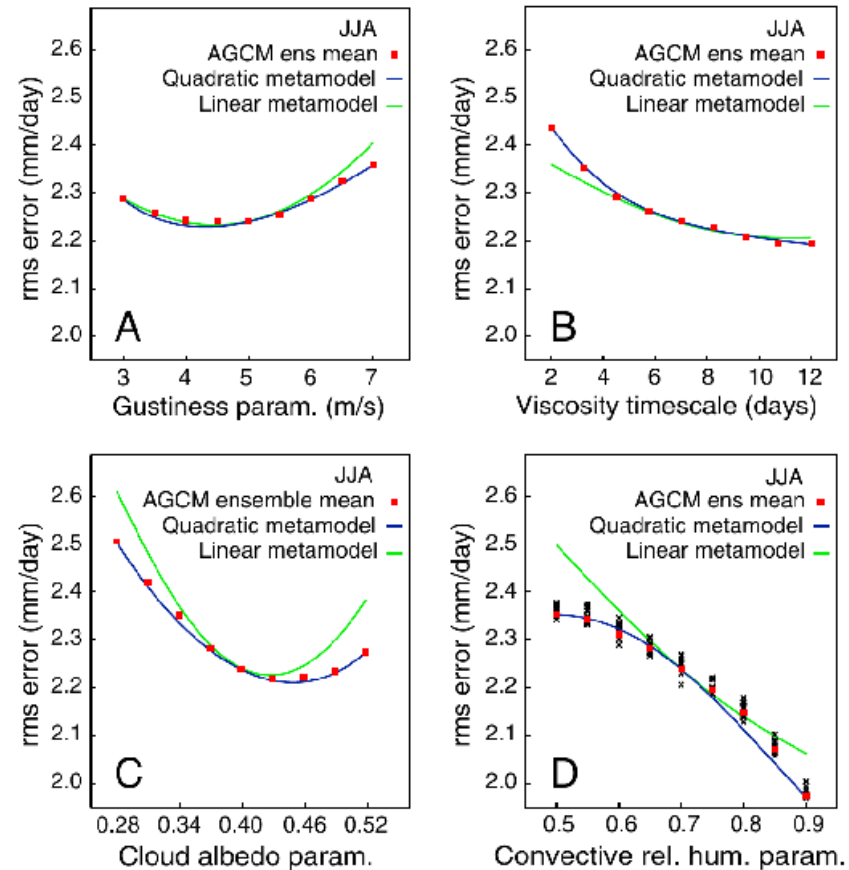
From Deser et al 2015.

Sensibilité de la reconstruction des température globales du 20ème siècle à des paramètres libres

Modèle GFDL, Princeton



Objective methods of tuning



Neelin et al (2010) construct “metamodels” to aid in multi-parameter optimization. See also Daniel Williamson papers (LMDZ visit 14 September 2015).

I. Les modèles de climat

- Construction
- Utilisation

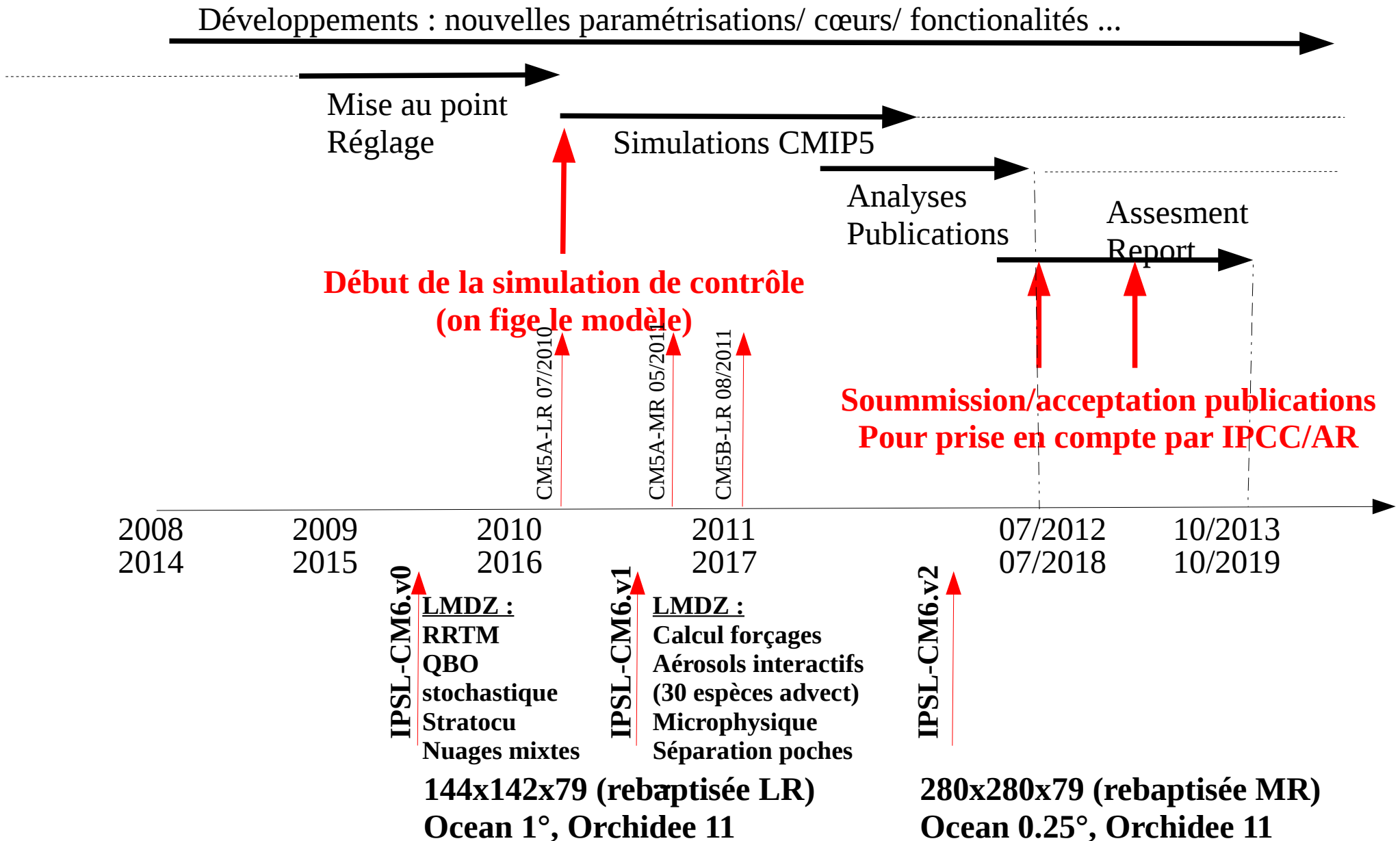
II. Enjeu des simulations d'ensembles

- Sensibilité à la « physique » atmosphérique
- Sensibilité à l'état initial
- Sensibilité aux paramètres de « tuning »

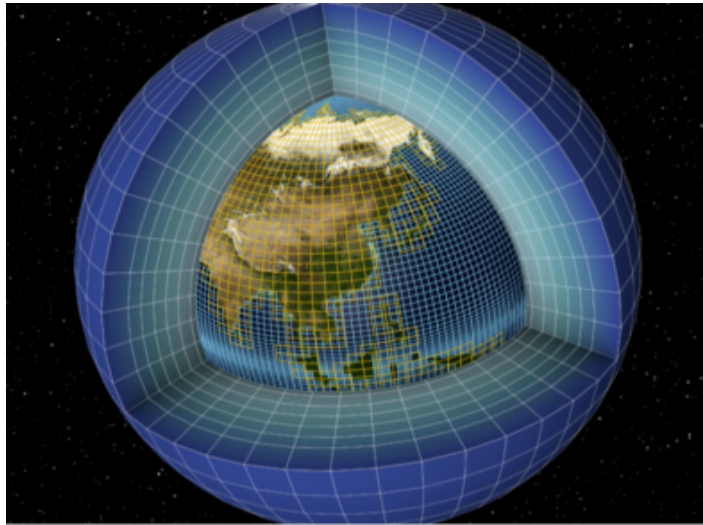
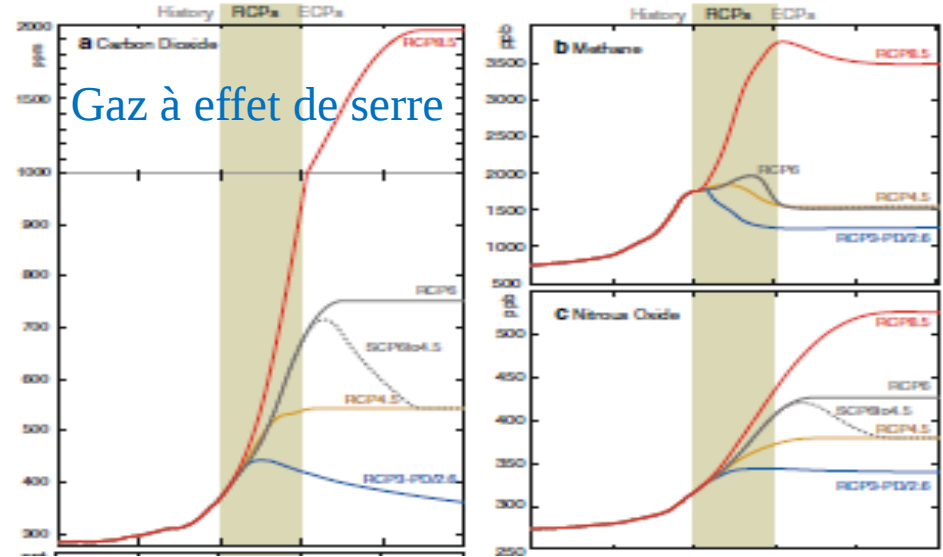
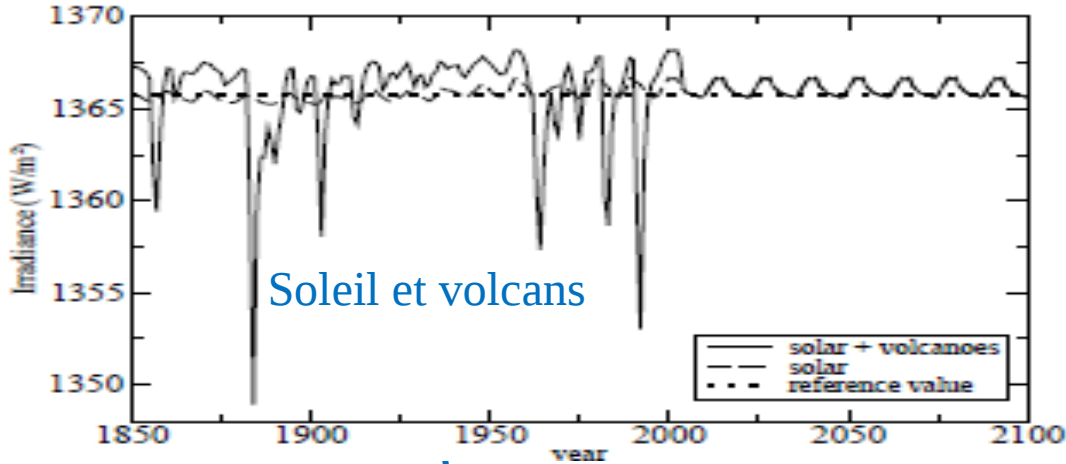
IV. Le projet CMIP5 et les projections du changement climatique

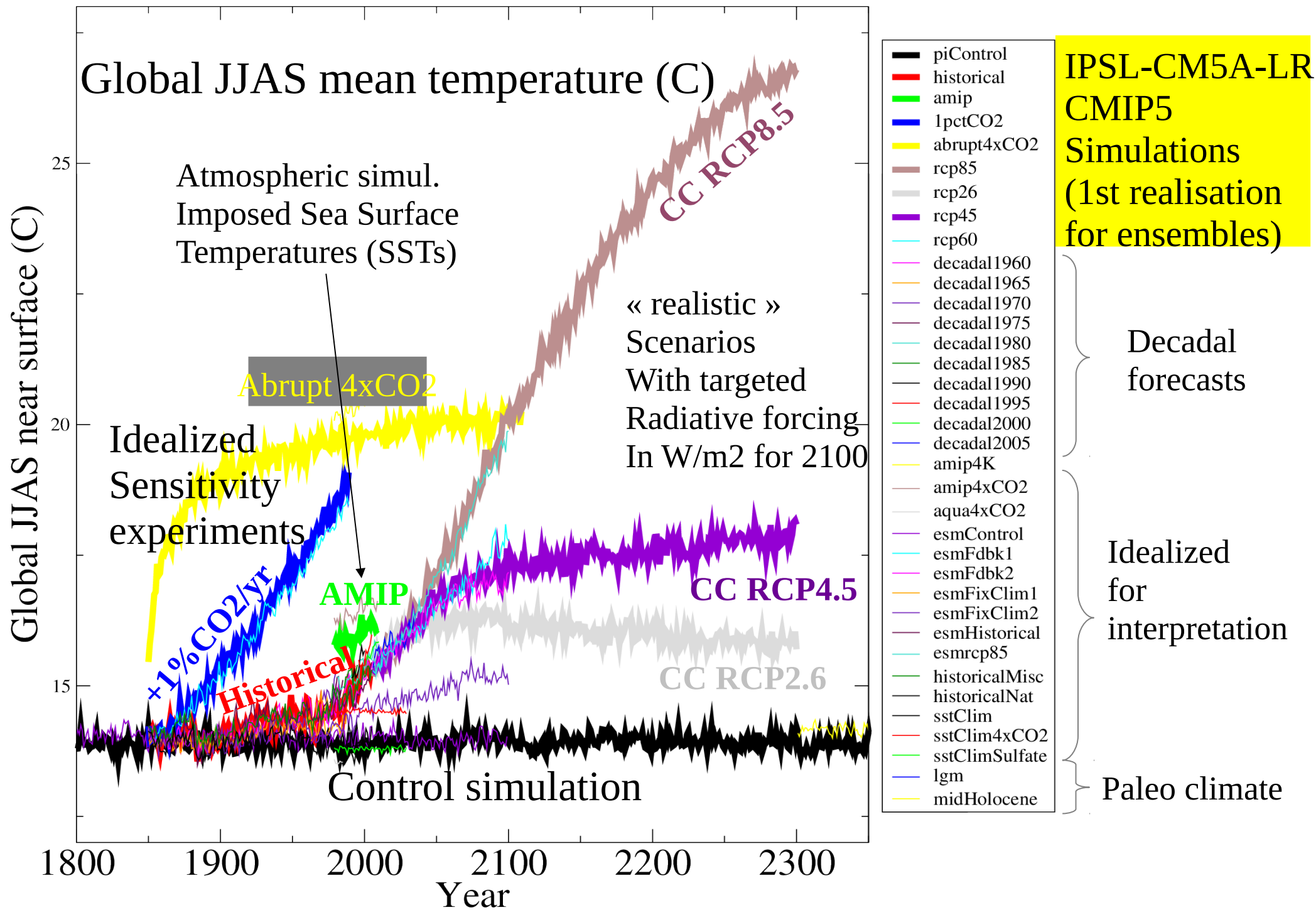
- Réalisation de simulations coordonnées
- Distribution de données

Développement du modèle LMDZ et les rendez-vous CMIP (Coupled Model Intercomparison Project)

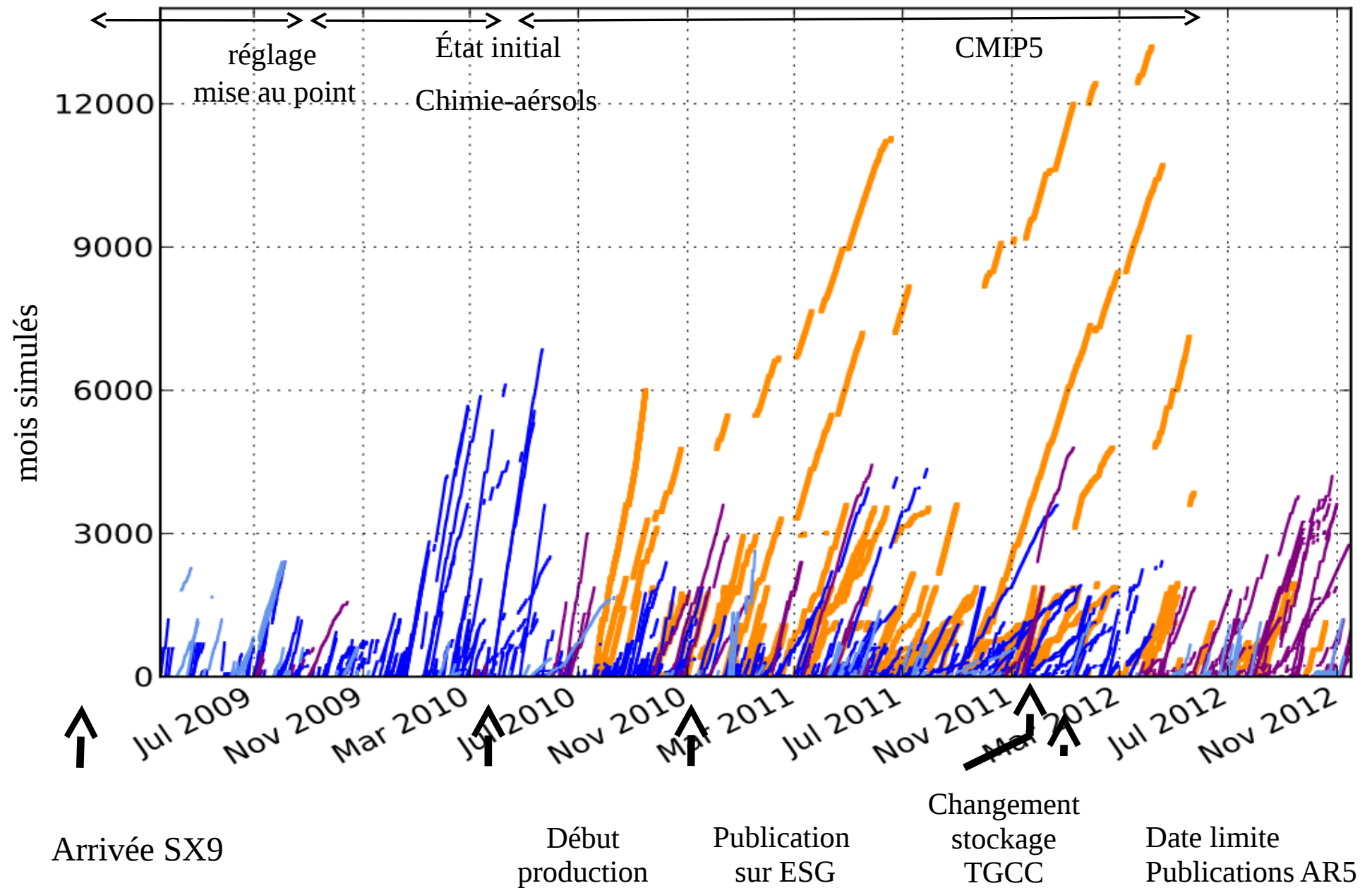


Forçages naturels et anthropiques



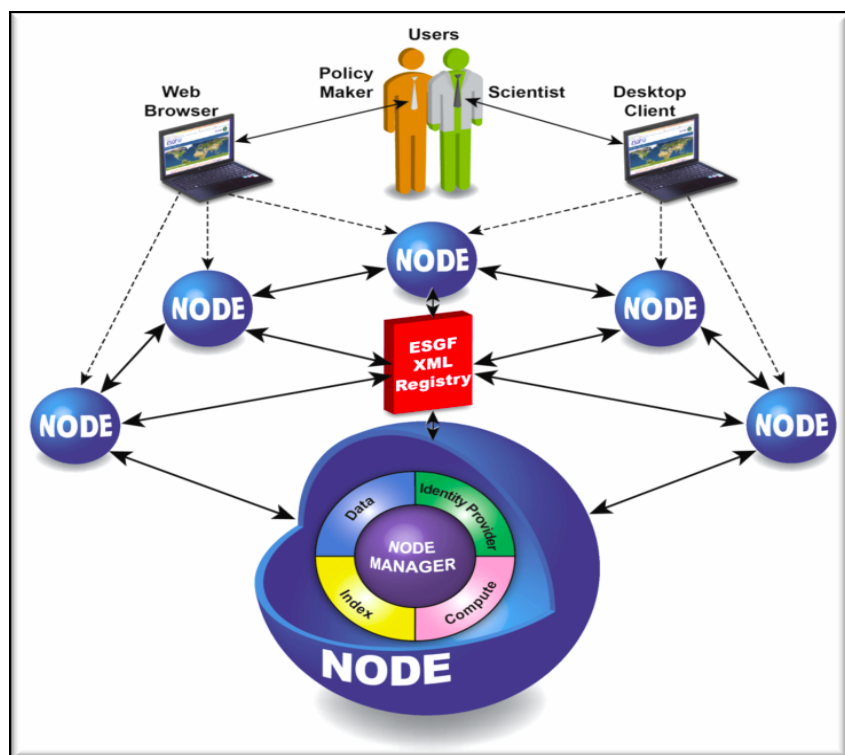


Déroulement des simulations CMIP5 (2009-2012)



CMIP6 Data Infrastructure

ESGF is a software infrastructure for management, dissemination, and analysis of simulation and observational data. The software utilizes hardware, networks, software for data management, access and processing.



ESGF federation nodes interact as equals. Users log onto any node using single sign-on OpenID to obtain and access data throughout the entire federation.

Worldwide distributed system

The **Earth System Grid Federation (ESGF)** is a multi-agency, international collaboration of persons and institutions working together to build an open source software infrastructure for the management and analysis of Earth Science data

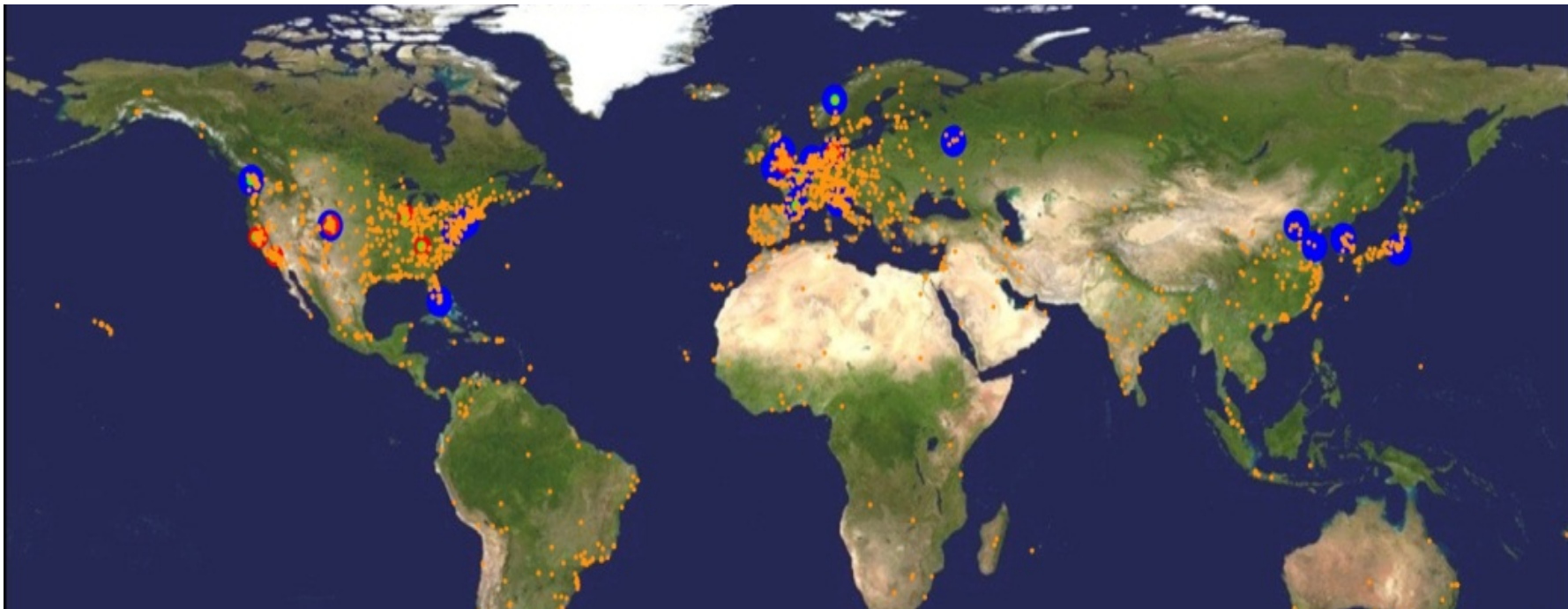
- Software development and project management: ANL, ANU, **BADC**, **CMCC**, **DKRZ**, ESRL, GFDL, GSFC, **IPSL**, JPL, LLNL, **LIU**, ORNL, ...
- Operations: tens of data centers across Asia, Australia, Europe and North America



Worldwide distributed system

The **Earth System Grid Federation (ESGF)** is a multi-agency, international collaboration of persons and institutions working together to build an open source software infrastructure for the management and analysis of Earth Science data

- Software development and project management: ANL, ANU, **BADC**, **CMCC**, **DKRZ**, ESRL, GFDL, GSFC, **IPSL**, JPL, LLNL, **LIU**, ORNL, ...
- Operations: tens of data centers across Asia, Australia, Europe and North America



Exemple d'analyse multi-modèle (1/2)

Uncertainties in climate change projection : dispersion of results

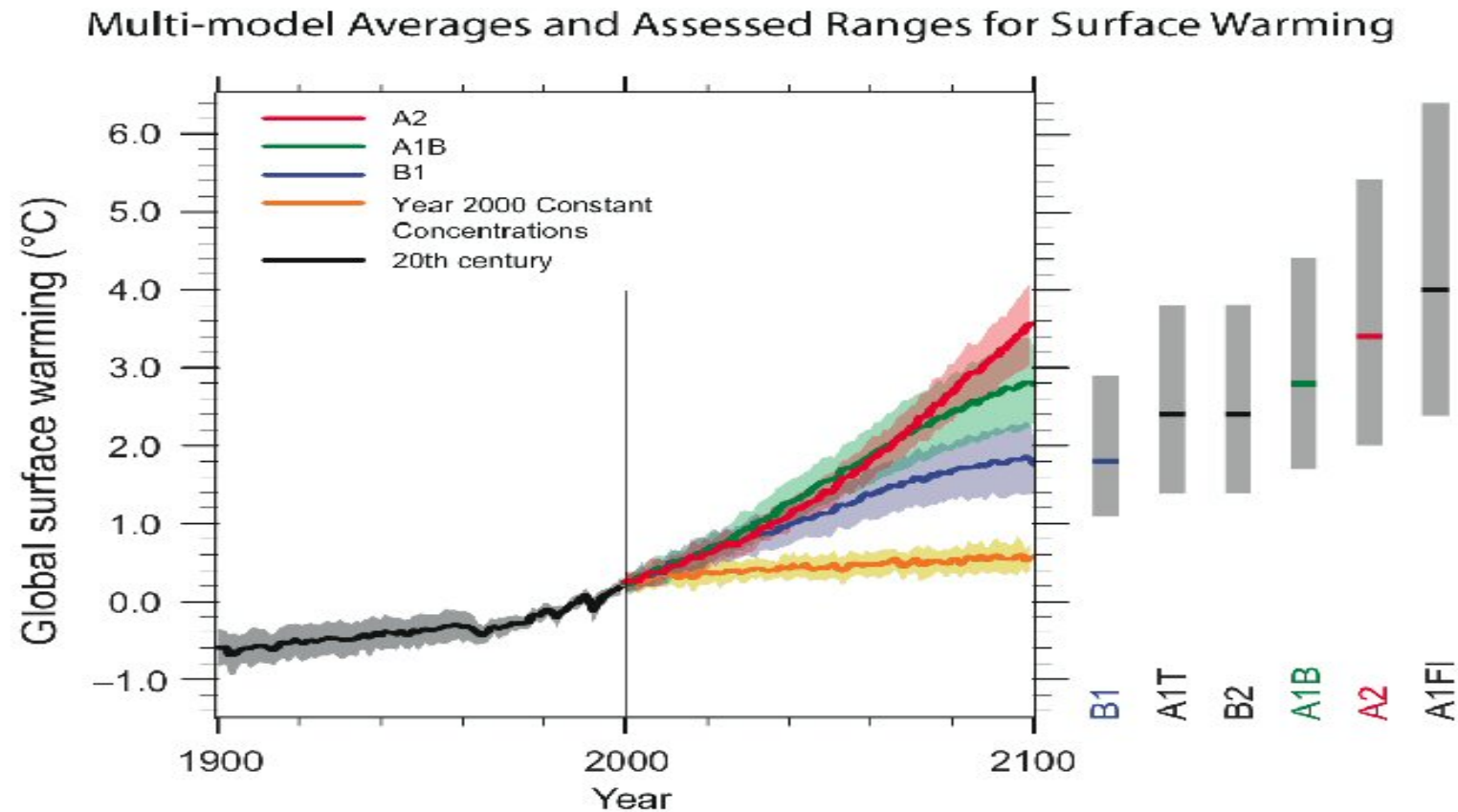


Image 2. Predicted global mean temperature. With only slight differences to [Image 1](#), bars on the right side indicate span of model predictions under standard scenarios. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Working Group I Contribution to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Figure SPM.5. Cambridge University Press. Courtesy of the IPCC.

- For a given scenario (greenhouse gas, aerosols, ...) a large dispersion remains
- Due to the dispersion of climate models sensitivity
- Large part due to the representation of cloud feedbacks (Bony, Dufresne et al.)

Exemple d'utilisation d'analyse multi-modèle (2/2) : pour l'amélioration des modèles

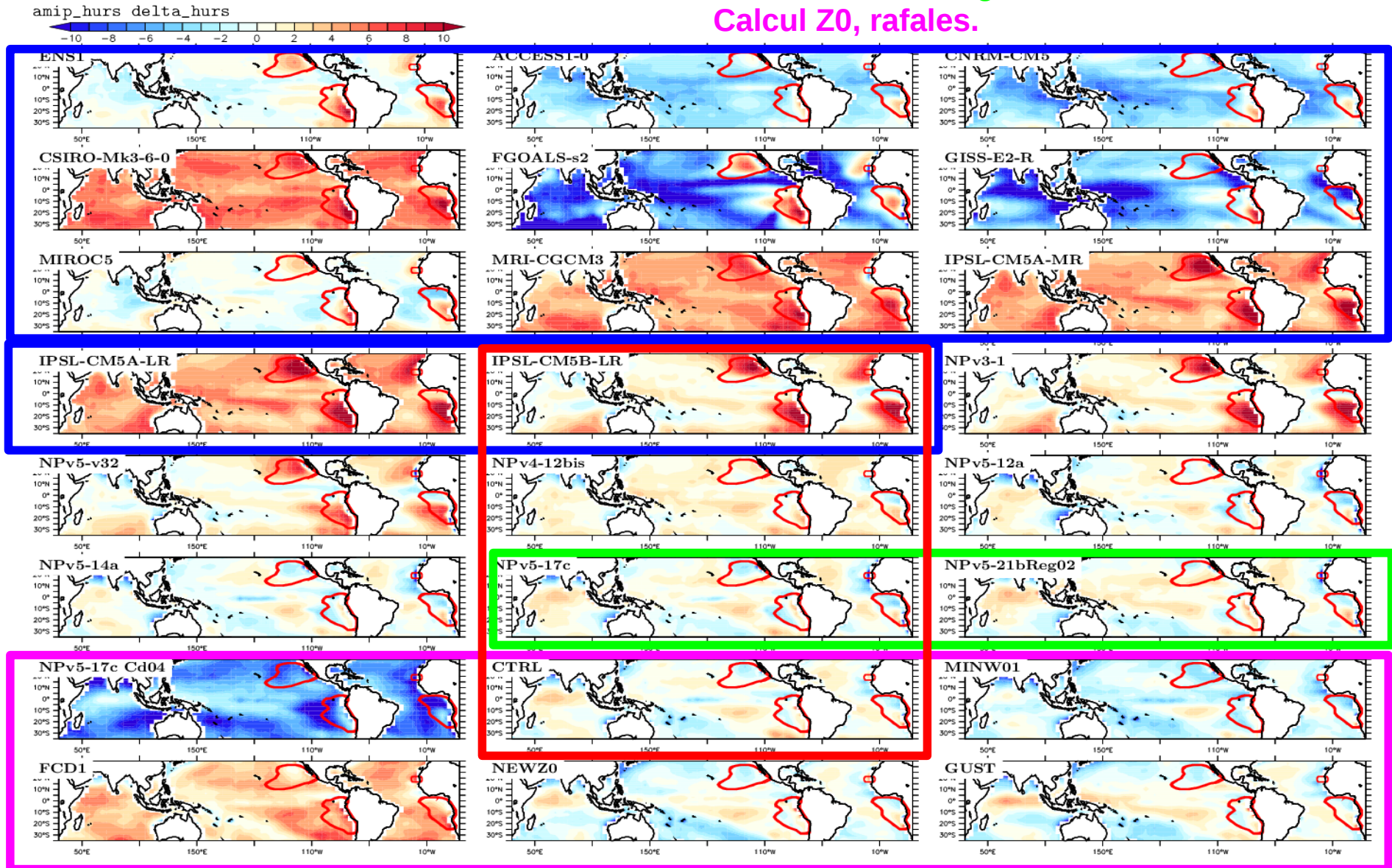
Erreur sur l'humidité relative de l'air à la surface (%)
Moyenne climatologique

CMIP5

5B → v4.12 → v5.17c = CTRL(betaclim)

V5.17c / v5.21bReg02

Calcul Z0, rafales.



Conclusions (1/2)

1. Le défi de la modélisation climatique

- Un gigantesque **effort collectif et pluri-disciplinaire**
- Modèles : mélange de physique de base et de description heuristique des processus
- Des modèles complexes
- Des enjeux pour l'exploitation des ressources informatiques (parallélisme, GPU)
- Des enjeux pour la distribution des données
- Définition de standards internationaux / partage de codes / protocoles d'évaluation
- Une distribution complètement ouverte et des analyses menées indépendamment.
- Importance des observations in-situ (sites/campagnes) et satellites

2. Le climat de demain

- Un climat qui se réchauffe sous l'effet de l'augmentation des gaz à effet de serre
- Un **réchauffement** particulièrement fort sur les continents
- Des contrastes de pluies qui se renforcent dans les tropiques. Fortes incertitudes régionales
- Les nuages et la pluie toujours au cœur des incertitudes
- Nécessité de grands ensembles de simulations pour échantillonner
 - * échantillonner les erreurs/incertitudes de modélisation
 - * échantillonner les incertitudes liées aux valeurs des paramètres internes
 - * échantillonner la variabilité interne non prévisible du système
 - * L'attribution des causes des changements climatiques
- Un enjeu très fort de pluri-disciplinarité pour évaluer les conséquences des changements climatiques pour les sociétés.

Cocnclusion (2/2) : Utilisation des moyens de calcul

1. Centres nationaux (Genci)

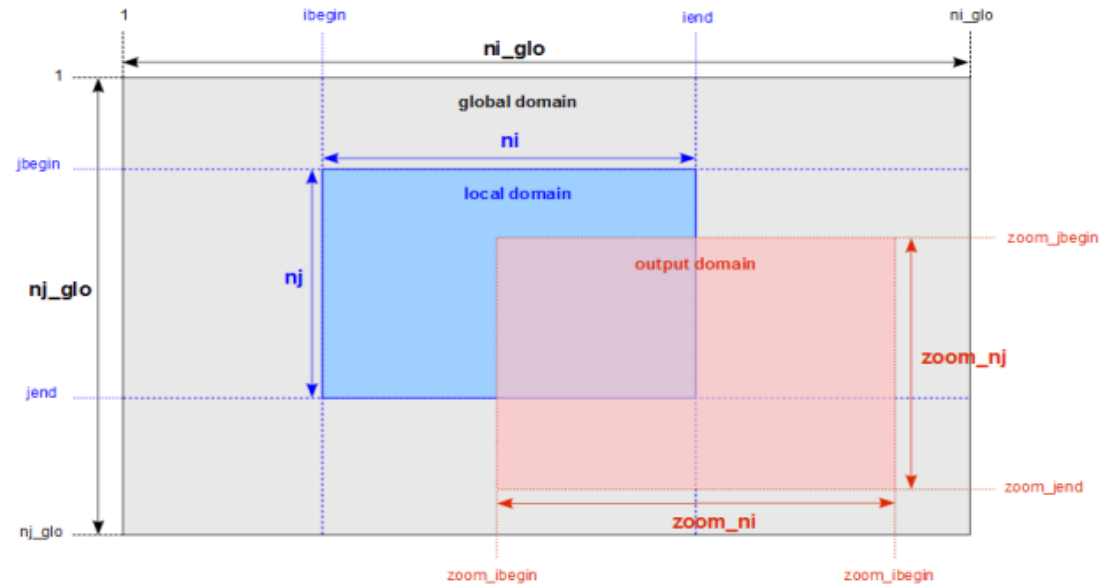
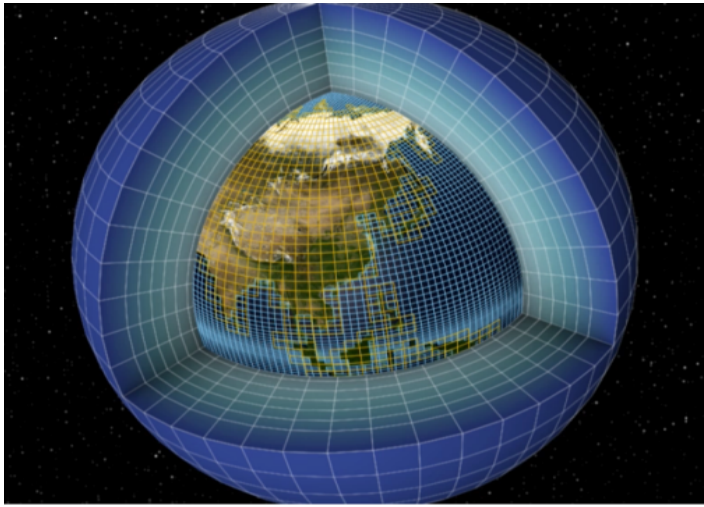
- Simulations de mise au point / ajustement des paramètres (1000ers de simulations pour le réglage / debug / évaluation / optimisation)
- Simulations de production CMIP (et équivalente pour d'autres projets)
- Simulations frontière (ex : dynamico, océan 5km)
- Simulations explicites de nuages pour développer les paramétrisations
- Stockage des sorties natives et distribution au travers de l'ESGF (volume estimé à 4 Po)
- Diagnostiques / post-traitement nécessitant les données natives

2. Méso-centre ciclad

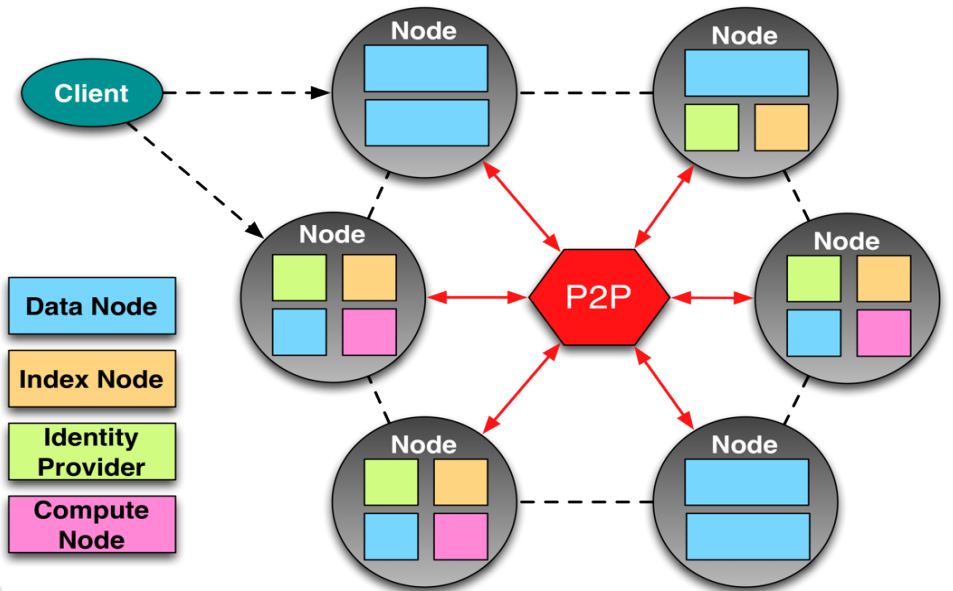
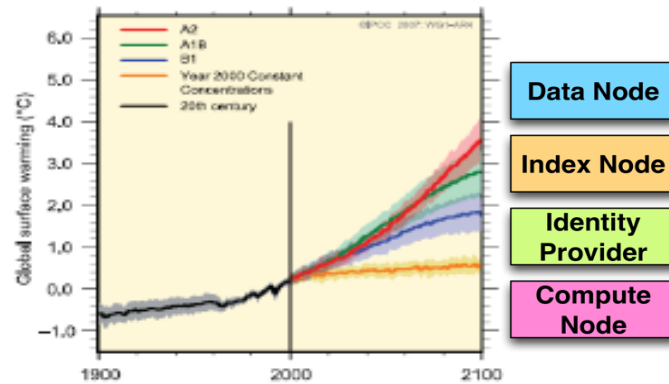
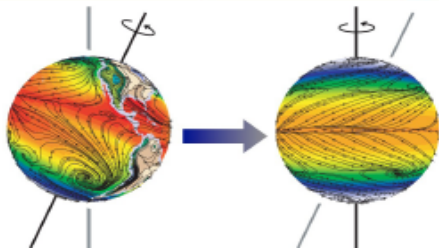
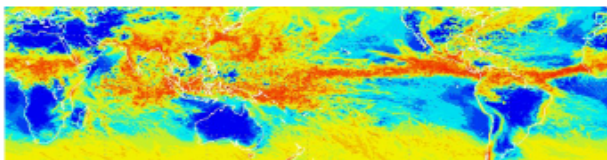
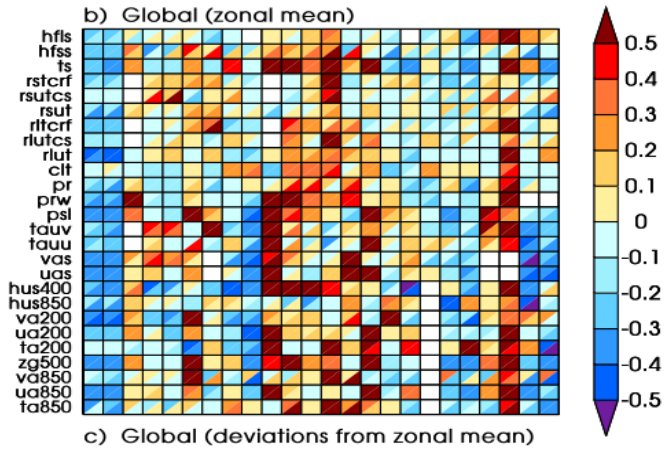
- Nœud ESGF de réplication multi-modèles CMIP6 (soit environ 2 à 4 Po, les plus utilisés).
- Plateforme académique nationale d'analyse des résultats du projet CMIP6.
- Analyse croisée des simulations de développement du modèle couplé de l'IPSL pour CMIP6
- Analyse croisée des simulations IPSL des différents centres de calculs et des simulations CMIP des autres groupes.
- Extraction / filtrage de base de données pour des problèmes spécifiques (e. g. climat Ouest africain et ses impacts)
- Suivi et post-traitements systématiques des simulations multi-centres(?)
- Tests systématiques des configurations garantissant une continuité (?)
- Renforcement des liens avec l'ICS de l'UPMC (3000 coeurs intel)

3. Ordinateurs personnels

- Développement
- Enseignement
- Versions légères ou simplifiées (1D)



1. Climate Simulations
2. Archive and distribute
3. Analysis



Le mésocentre de l'IPSL et CMIP6

- Les simulations de développement du modèle couplé de l'IPSL pour CMIP6 sont analysés sur le mésocentre (en croisant les données existantes).
- Les données produites par les modèles de l'IPSL pour CMIP6 seront distribuées depuis les centres de calcul GENCI (volume estimé à 4 Po).
- Le mésocentre de l'IPSL : un nœud de réplication multi-modèles CMIP6. (soit environ 2 à 4 Po, les plus utilisés).
- Le mésocentre de l'IPSL : une plateforme académique nationale d'analyse des résultats du projet CMIP6.
- Accès en consultation pour tous aux codes et aux données composant une sélection de figures qui nous semblent particulièrement pertinentes, dont des figures du rapport du GIEC à venir.
- Renforcement des liens avec l'ICS de l'UPMC (3000 coeurs intel) dans le cadre des travaux qui demandent des ressources de calculs importantes.

Un système de distribution mondial

Tous les chercheurs peuvent analyser les résultats de tous les modèles !
Extraction Arique de l'Ouest (Abdoulaye Deme)

