

# Journée PERPHEGLIM

## Les modèles de Climat : Quels outils ? Pour quelles utilisations ?

*J.P. Céron – Météo-France / Direction de la Climatologie  
Avec les contributions de JC. Calvet (CNRM), N. Canal  
(DP/Serv & Arvalis), G. Pigeon (DP/Serv) et A. Voldoire (CNRM)  
Jean-Pierre.Ceron@meteo*

# Plan de la présentation

- Les modèles de Climat
  - Principes des modèles
  - Quelques détails supplémentaires
- Les incertitudes
  - Prévisions vs Projections
  - Incertitudes associées
- Quelques exemples d'utilisation
  - En mode projection
  - En mode prévision
- En guise de conclusion

# Les modèles de Climat

# Les principes

I. EX NIHILO NIHIL

II. NATURA NON FECIT  
SALTUM

# Les principes : le système climatique



*Atmosphere*



Precipitation

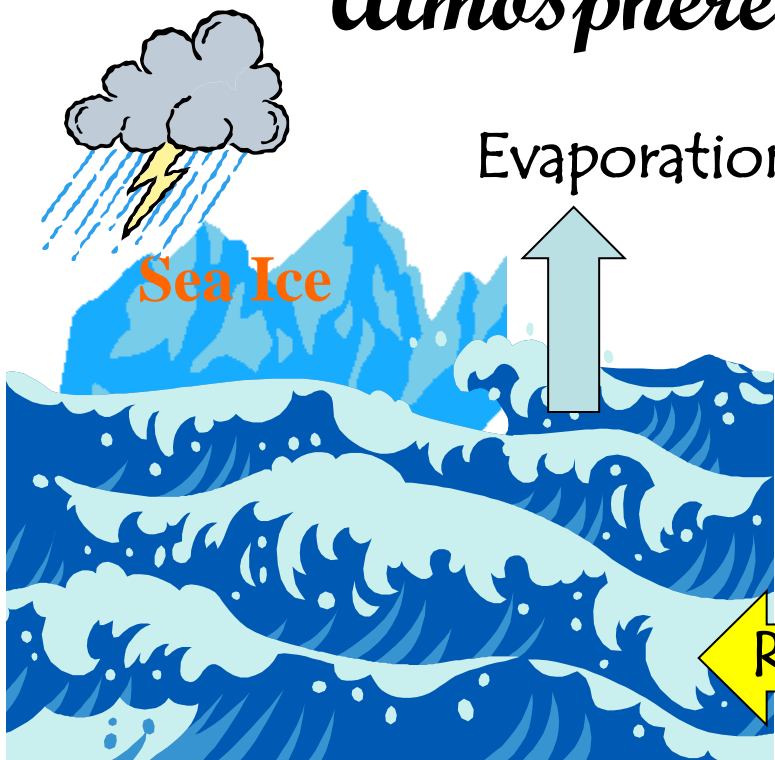
Evaporation



*Biosphere*

Run-off

Soil Moisture



Sea Ice



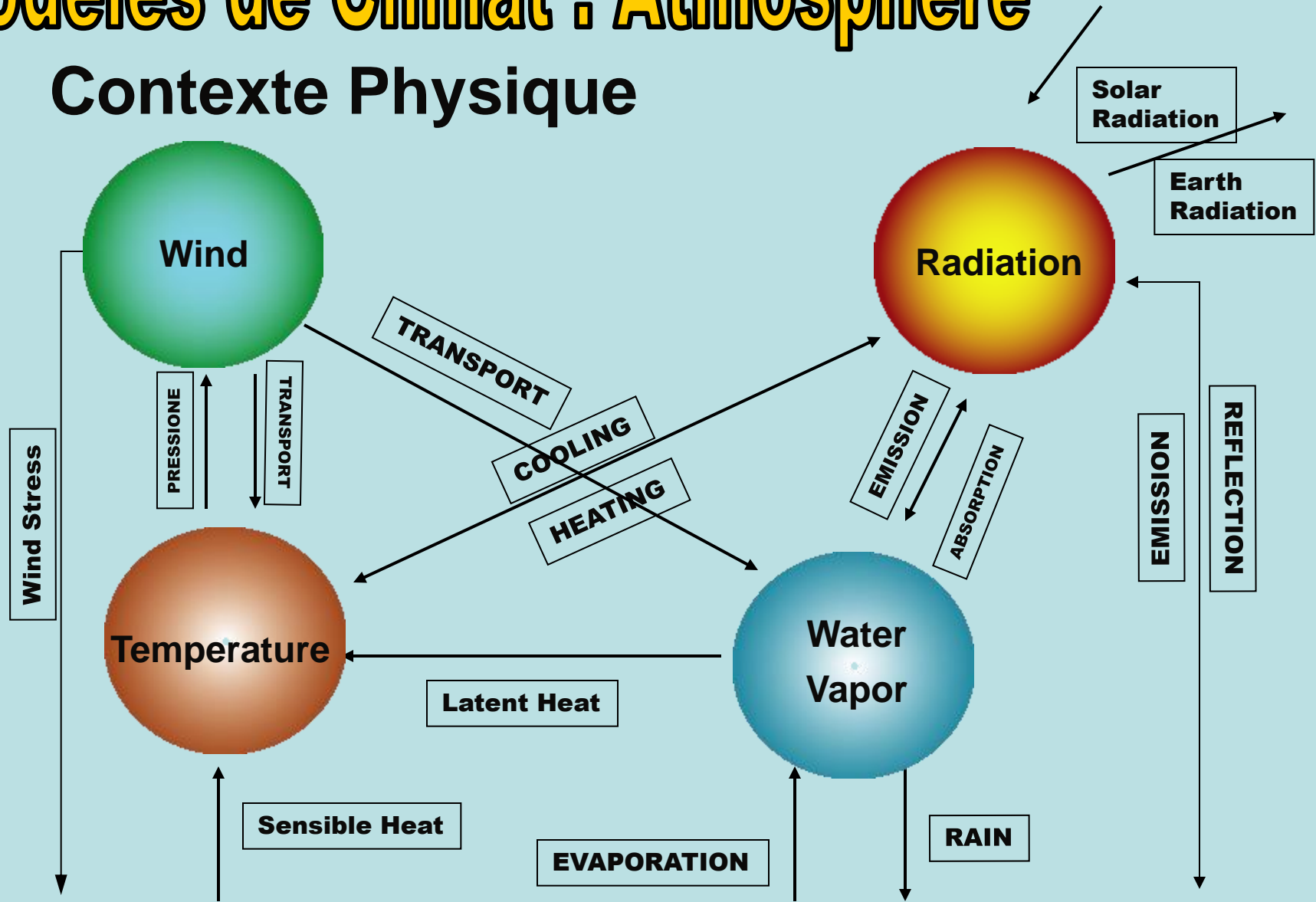
*Oceans*

# Le système climatique en quelques mots

- Composantes internes (atmosphère, océan, biosphère terrestre, cryosphère...) en interaction entre elles
- Forçages externes (rayonnement solaire, volcanisme, composition chimique de l'atmosphère d'origine anthropique, utilisation des sols...)
- L'évolution du système climatique est régi par des processus physiques, chimiques, biologiques
- Rétroactions : influence réciproque entre les composantes qui vont avoir tendance à renforcer ou à atténuer l'effet initial
- A des échelles de temps qui vont de quelques secondes à plusieurs milliers d'années

# Modèles de Climat : Atmosphère

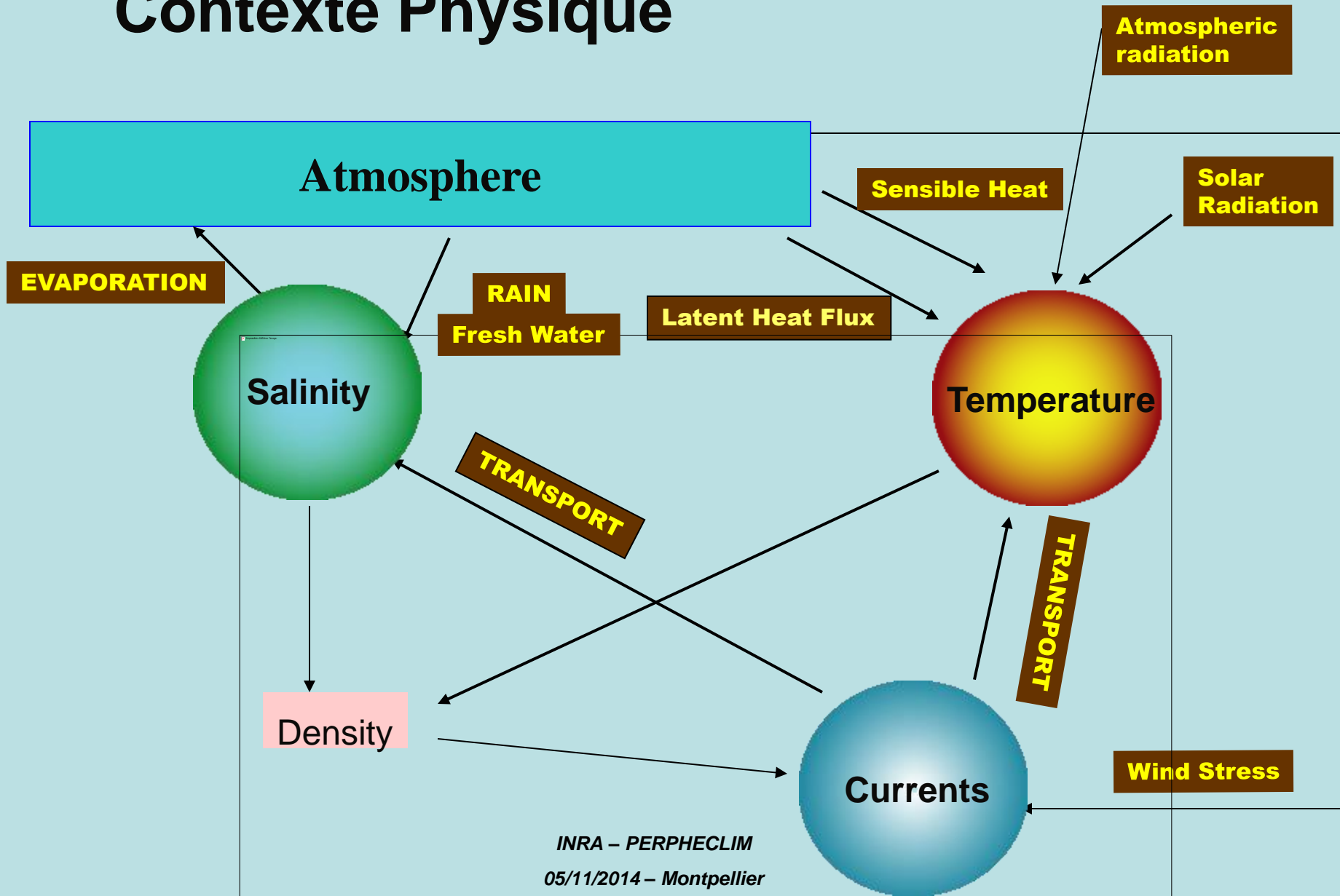
## Contexte Physique



Oceans -- Soil -- Cryosphere -- Biosphere

# Modèle de Climats : Océan

## Contexte Physique





# Les principes : l'atmosphère

- Etat du système représenté par les variables physiques correspondantes et leurs équations d'évolution

- **Altitude**

- temperature
- wind
- Moisture

- **Surface**

- pressure
- Temperature
- Soil Moisture
- (snow amount)
- (vegetation)
- ...

$$\frac{dX}{dt} = Dyn. + Phys.$$

# Les principes : l'océan

- Etat du système représenté par les variables physiques correspondantes et leurs équations d'évolution

- **Deep layers**

- Temperature
- Current (u,v)
- Salinity
- (+ TKE)

$$\frac{dX}{dt} = Dyn. + Phys.$$

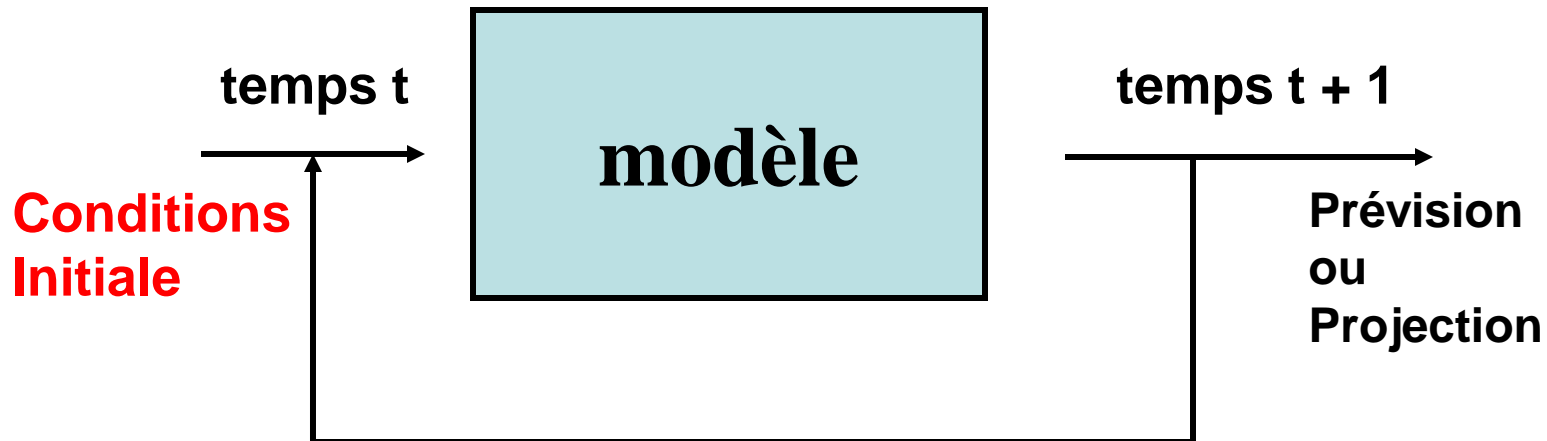
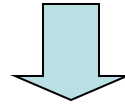
- **Surface**

- T,u,v,S
- (Surface anomaly elevation)
- *Pressure (Dynamic height)*

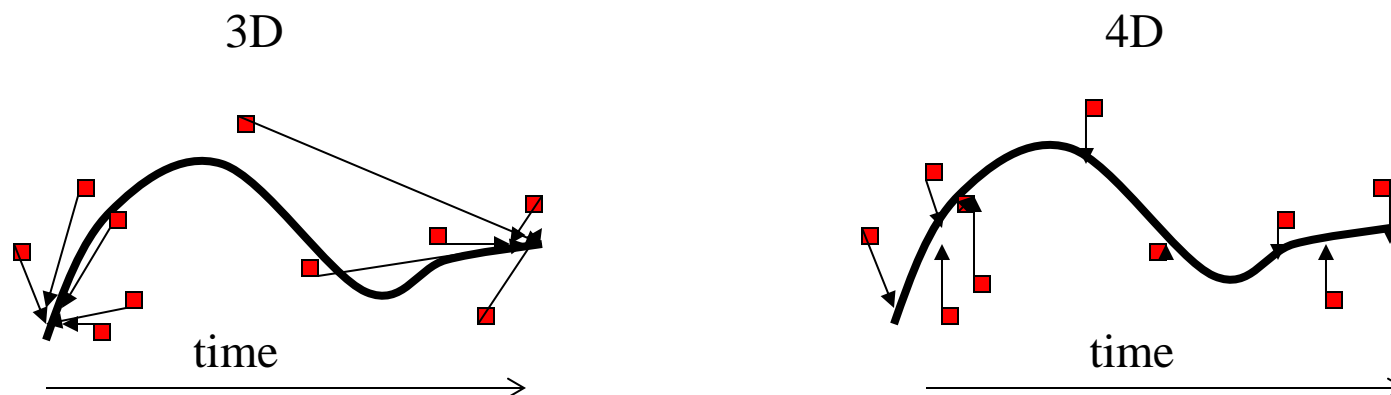
# Les principes : organisation d'un run

**un run typique:**

Conditions  
aux limites



# Les principes : les états initiaux

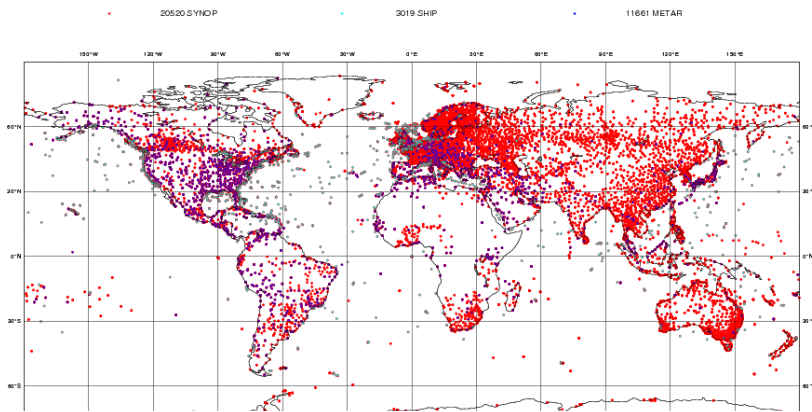


- Création d'une situation initiale pour le modèle à partir de diverses observations disponibles (cycle d'assimilation)
- Création d'une situation initiale proche des observations à des fins de vérifications (réanalyses notamment)

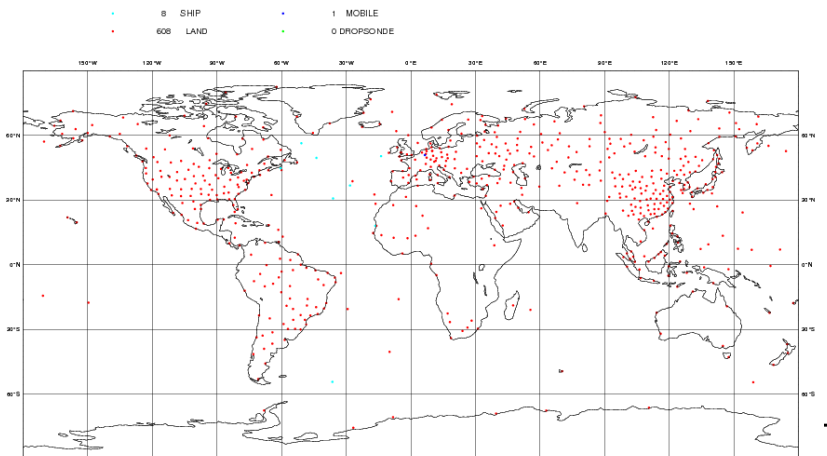
# Les principes : les états initiaux

Taking into account the concerned regions, the description of the initial state will be done with some **lack of observation (density network)**.

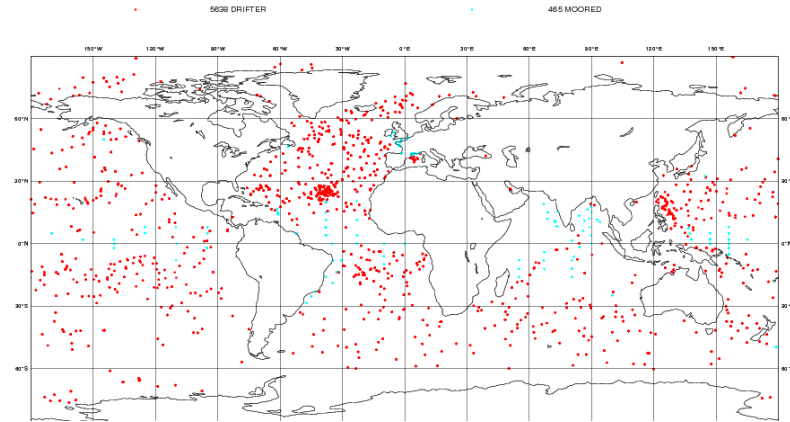
ECMWF Data Coverage (All obs DA) - Synop-Ship-Metar  
12/Apr/2013; 00 UTC  
Total number of obs = 35200



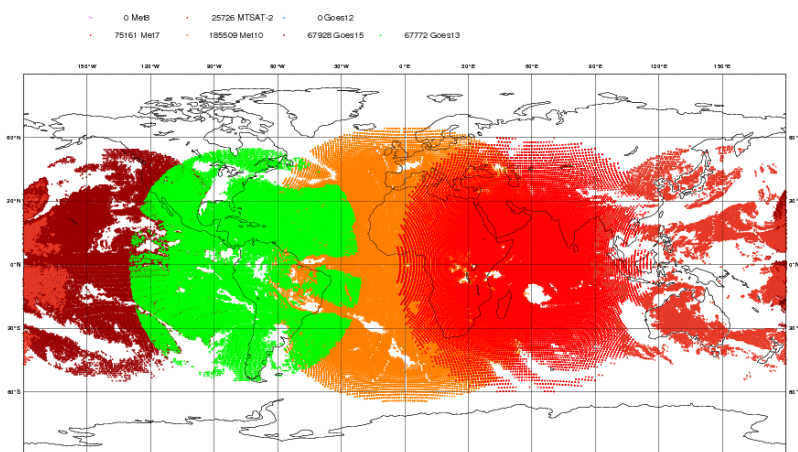
ECMWF Data Coverage (All obs DA) - Temp  
11/Apr/2013; 12 UTC  
Total number of obs = 617



ECMWF Data Coverage (All obs DA) - Buoy  
11/Apr/2013; 12 UTC  
Total number of obs = 6103



ECMWF Data Coverage (All obs DA) - GRAD  
11/Apr/2013; 12 UTC  
Total number of obs = 422096



- PERPHECLIM

014 - Montpellier

# Les principes : les processus Dynamiques (Atmosphère)

- Conservation de la quantité de mouvement
- Équation Hydrostatique (équilibre vertical)
- Équation de Continuité (conservation de la masse)
- Équation Thermodynamique (conservation de l'énergie)
- Conservation de la Vapeur d'Eau
- Loi des Gaz Parfaits
- *Conservation dynamique des variables passives*

# Les principes : les processus Dynamiques (Océan)

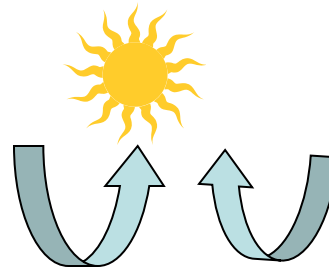
- Conservation de la quantité de mouvement
- Équation Hydrostatique (équilibre vertical)
- Équation de Continuité (conservation de la masse)
- Équation Thermodynamique (conservation de l'énergie)
- Conservation du Sel
- Équation d'état (densité  $\sim f(t,s,p)$ )
- *Conservation dynamique des variables passives*

# Paramétrisations Physiques (Atmosphère)

- Radiation
- Convection
- Diffusion

(horizontal & vertical)

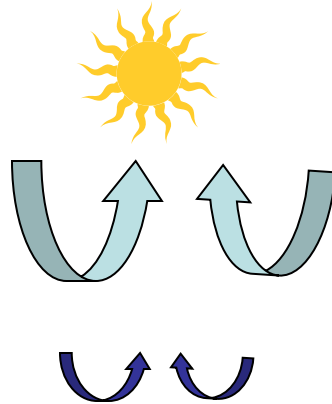
- Clouds
- Precipitation
- Orographic gravity wave drag
- Soil-snow-vegetation
- *Sea-Ice*
- *Chemistry*
- ...



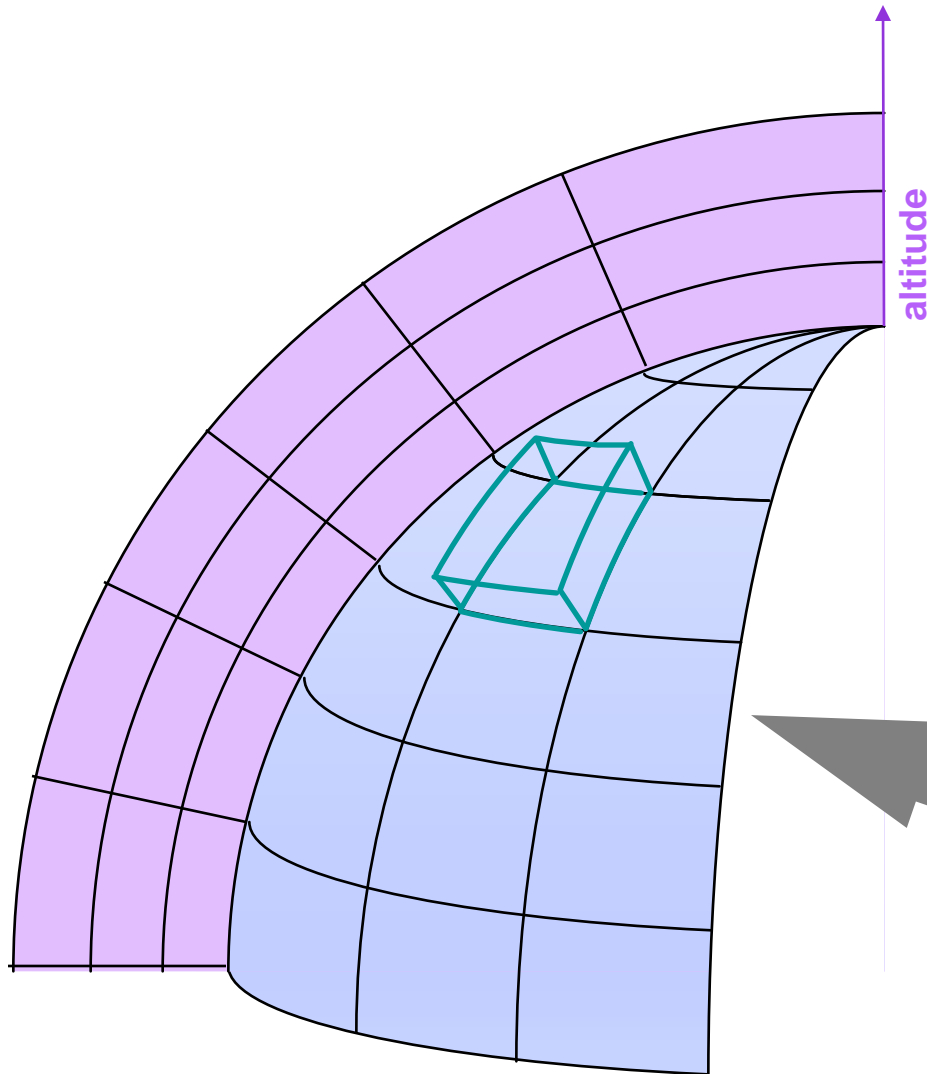


# Paramétrisations Physiques (Ocean)

- Solar Radiation
- Convection
- Diffusion  
(lateral & vertical)
- *Chemistry*
- ...



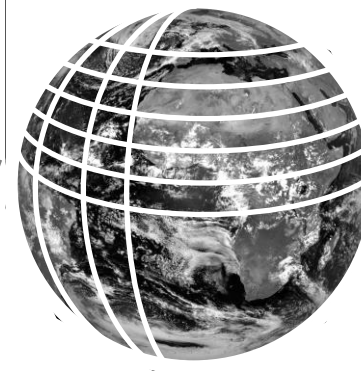
# Discrétisation horizontale et verticale



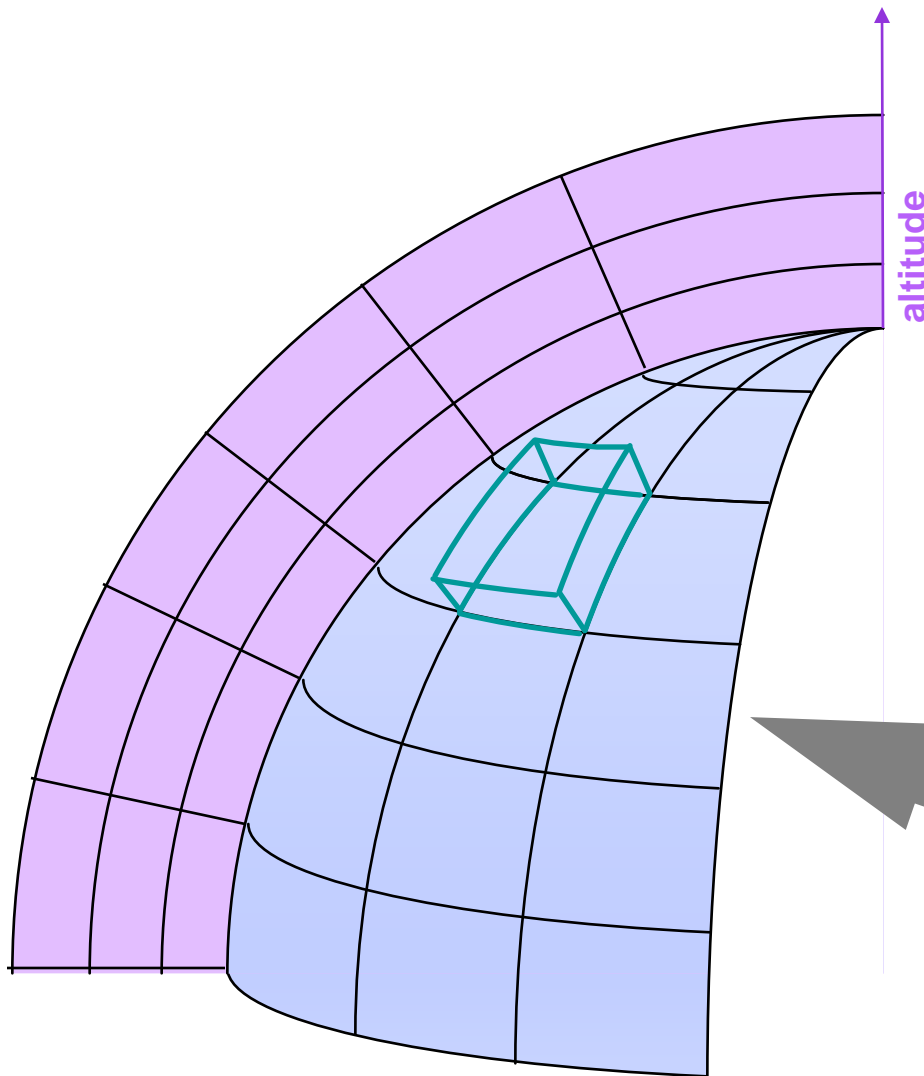
Pour décrire l'atmosphère, on divise l'atmosphère en « cubes » ou « parallélépipédiques ».

La **grille** des modèles correspond à la division **horizontale** (la distance entre 2 points de grille successifs est la **maille du modèle**).

La division **verticale** définit les **niveaux**.

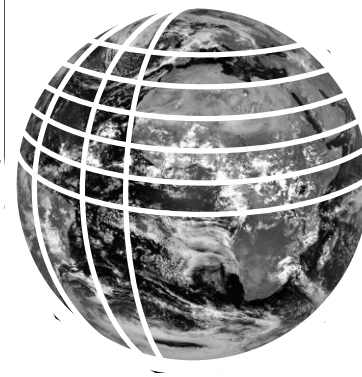


# Discrétisation horizontale et verticale

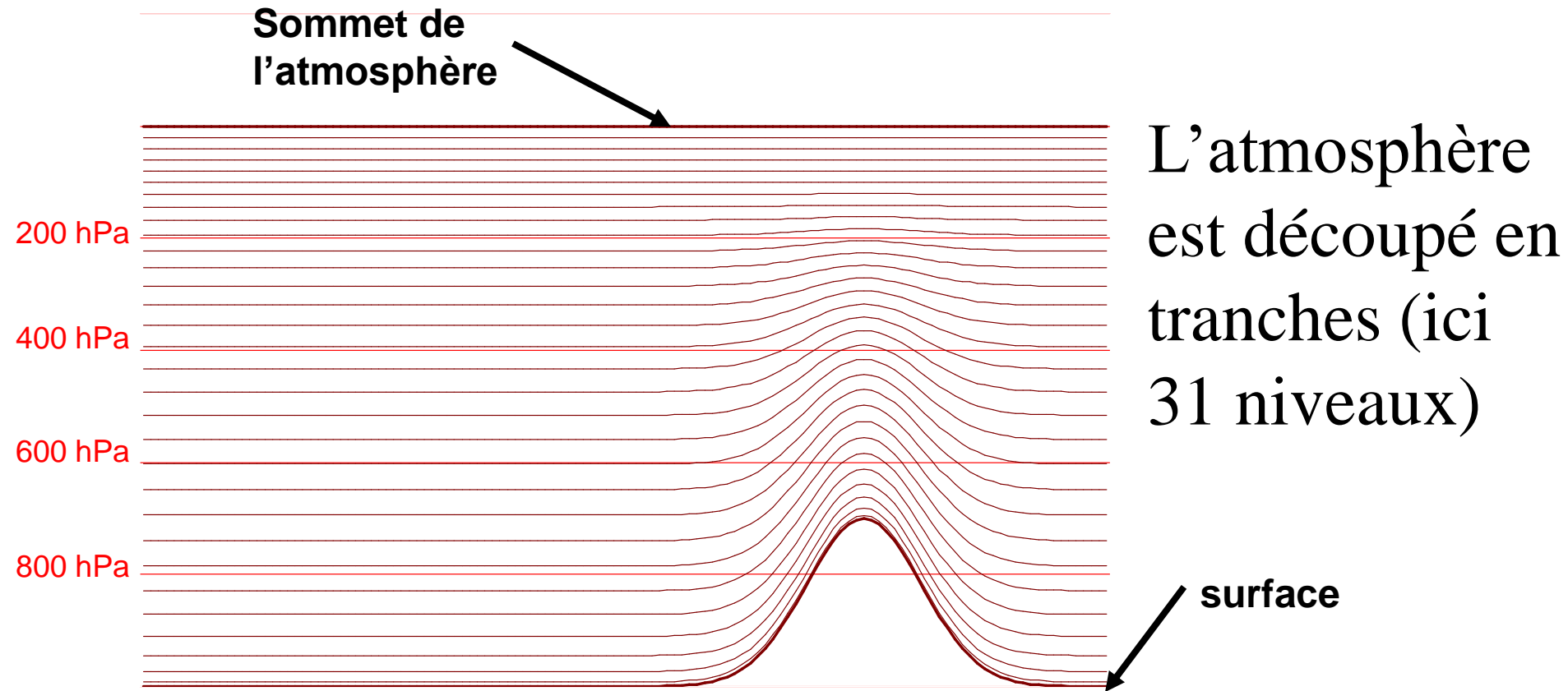


Le **choix** de la discrétisation horizontale et verticale d'un modèle **détermine** l'**échelle des phénomènes** que l'on sera capable de simuler. Ce choix n'est pas indépendant et doit être **cohérent avec le pas de temps** d'intégration du modèle et le but de la prévision.

Les **effets des phénomènes non résolus** (sous la maille du modèle) doivent être représentés par leur effet moyen à la maille du modèle (systèmes de **paramétrisations**).



# Discrétisation horizontale et verticale



# Organisation opérationnelle

## Starting with

Physical laws  
(thermodynamic,  
Fluide mechanics  
etc...)

We get equations  
using parameters like

- Pressure (P)
- Temperature (T)
- Humidity (U)
- Wind (V)

TIME  
EVOLUTION  
EQUATIONS  
(P, T, U, V or  
T,U,V,S)

# Organisation opérationnelle

one get for a specific time

P, T, V, U or T,U,V,S

(initial state)

Initial state

$t_0$

Then, using  
the time  
evolution  
equations

TIME  
EVOLUTION  
EQUATIONS  
(P, T, U, V) or  
(T,U,V,S)

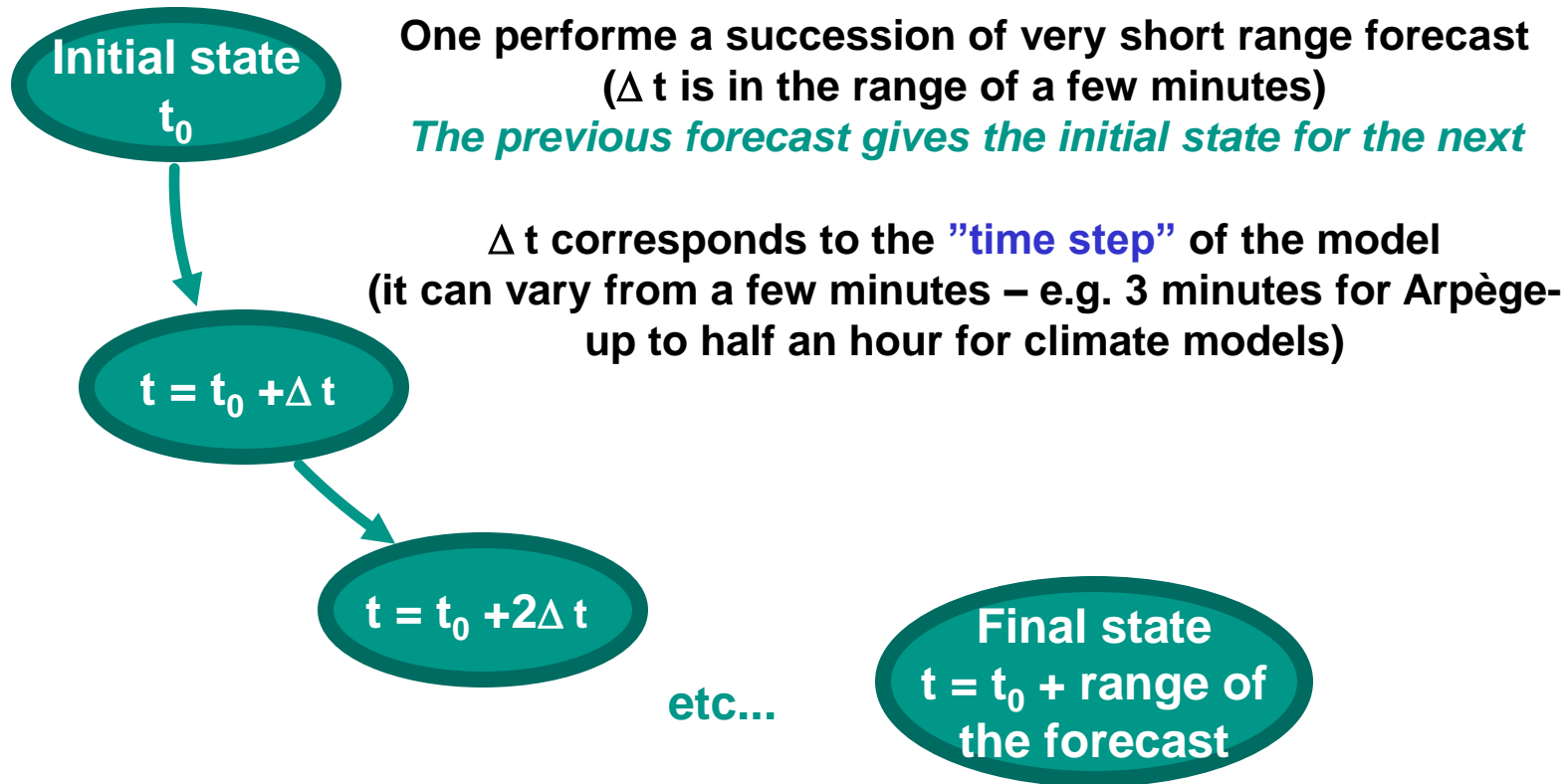
One can compute the new state  
after a time " $\Delta t$ "

(time step)

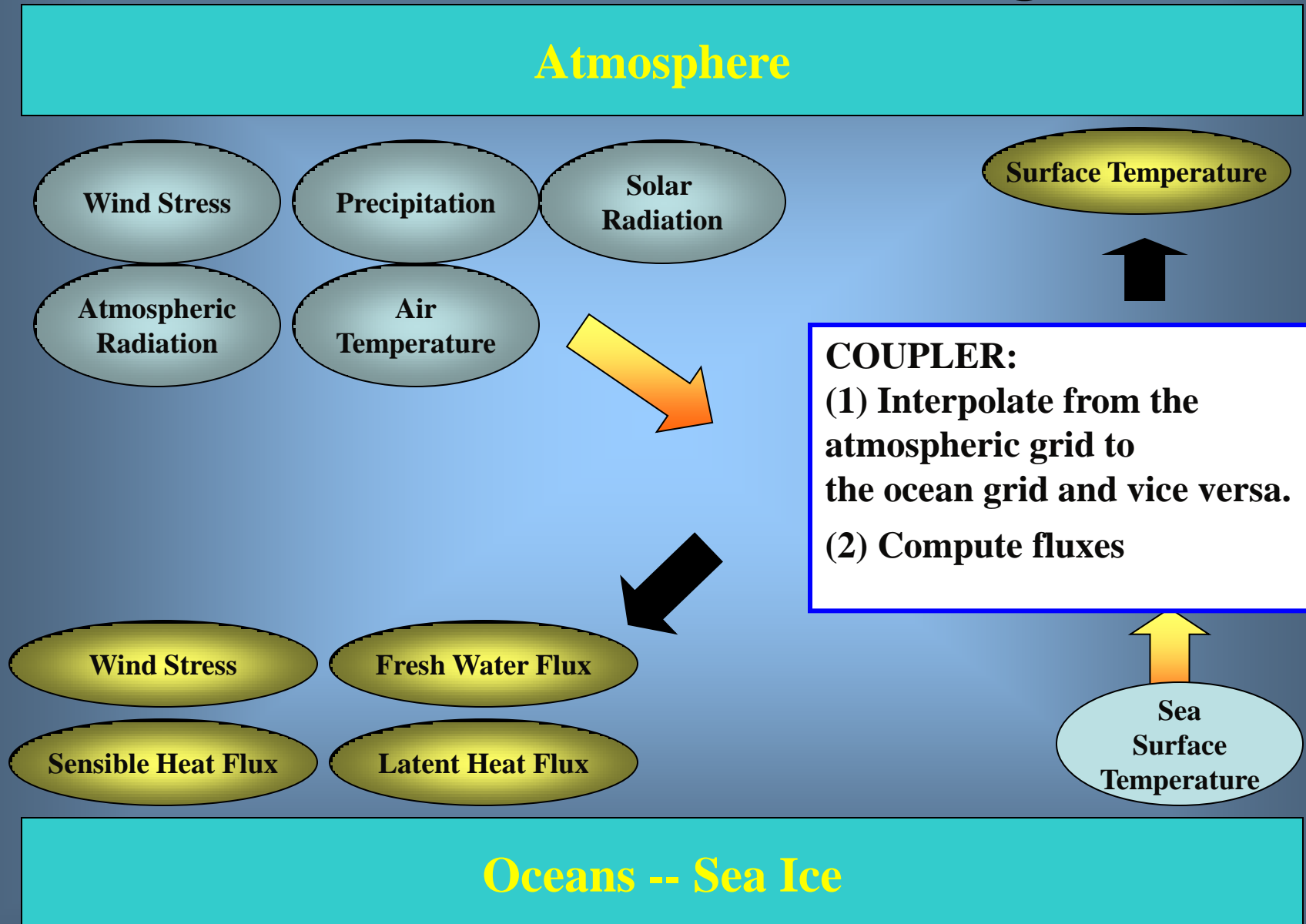
New state at

$t = t_0 + \Delta t$

# Operational organisation

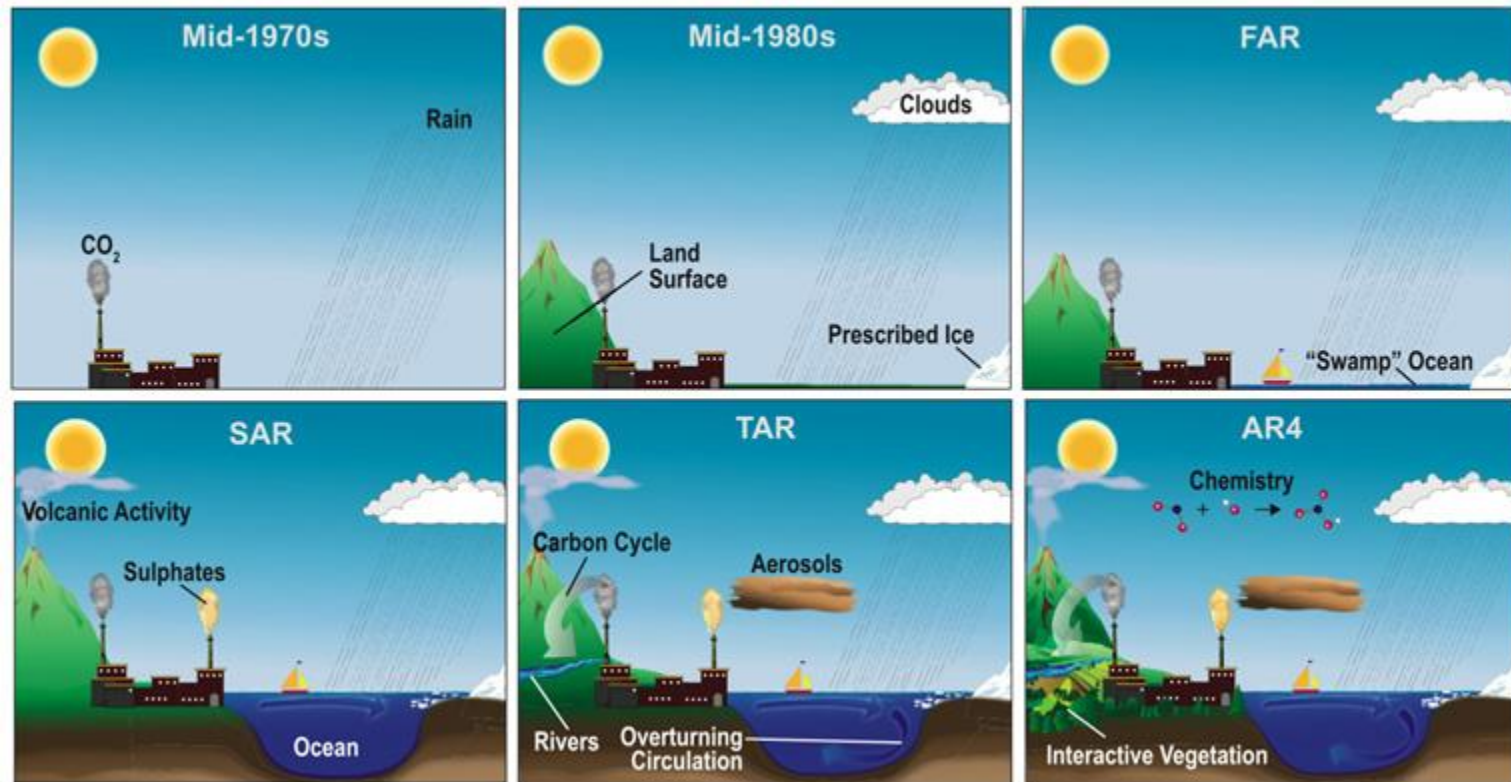


# Modèles de Climat: Couplage





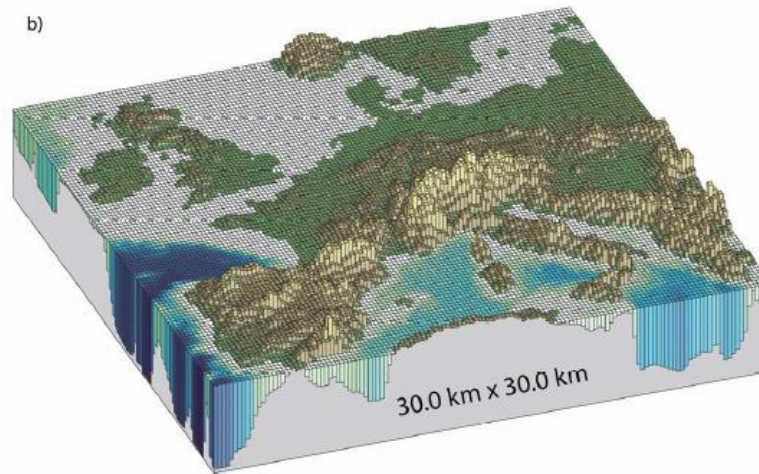
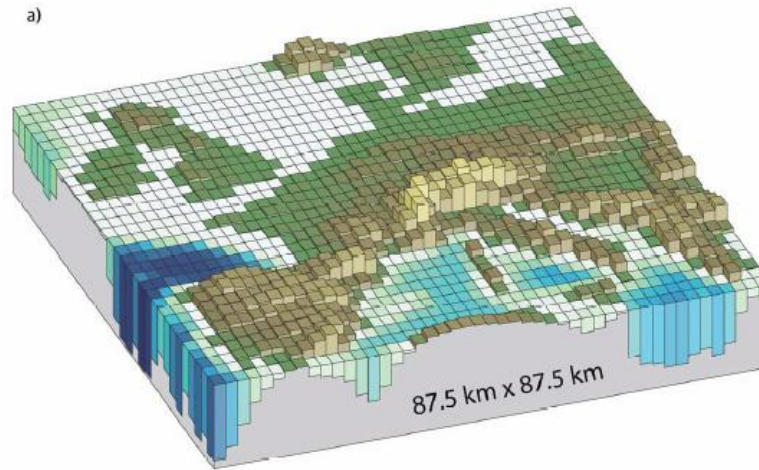
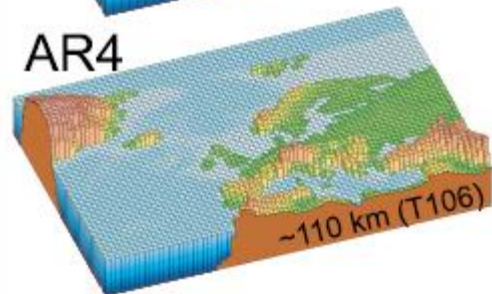
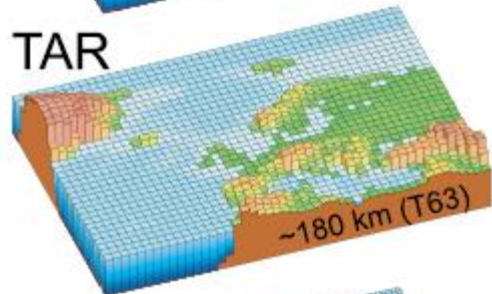
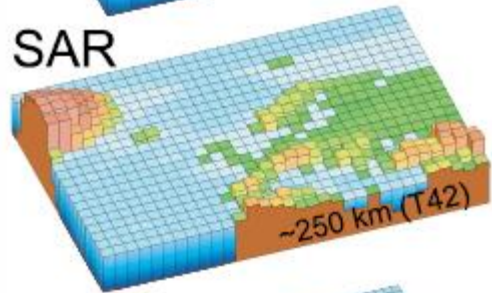
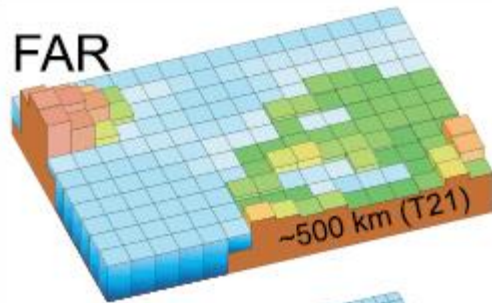
# Les modèles de climat



- Accroissement du nombre de sous-systèmes représentés
- Pour le dernier rapport du GIEC : augmentation du nombre de processus représentés dans chaque compartiment

Source : GIEC, 2007

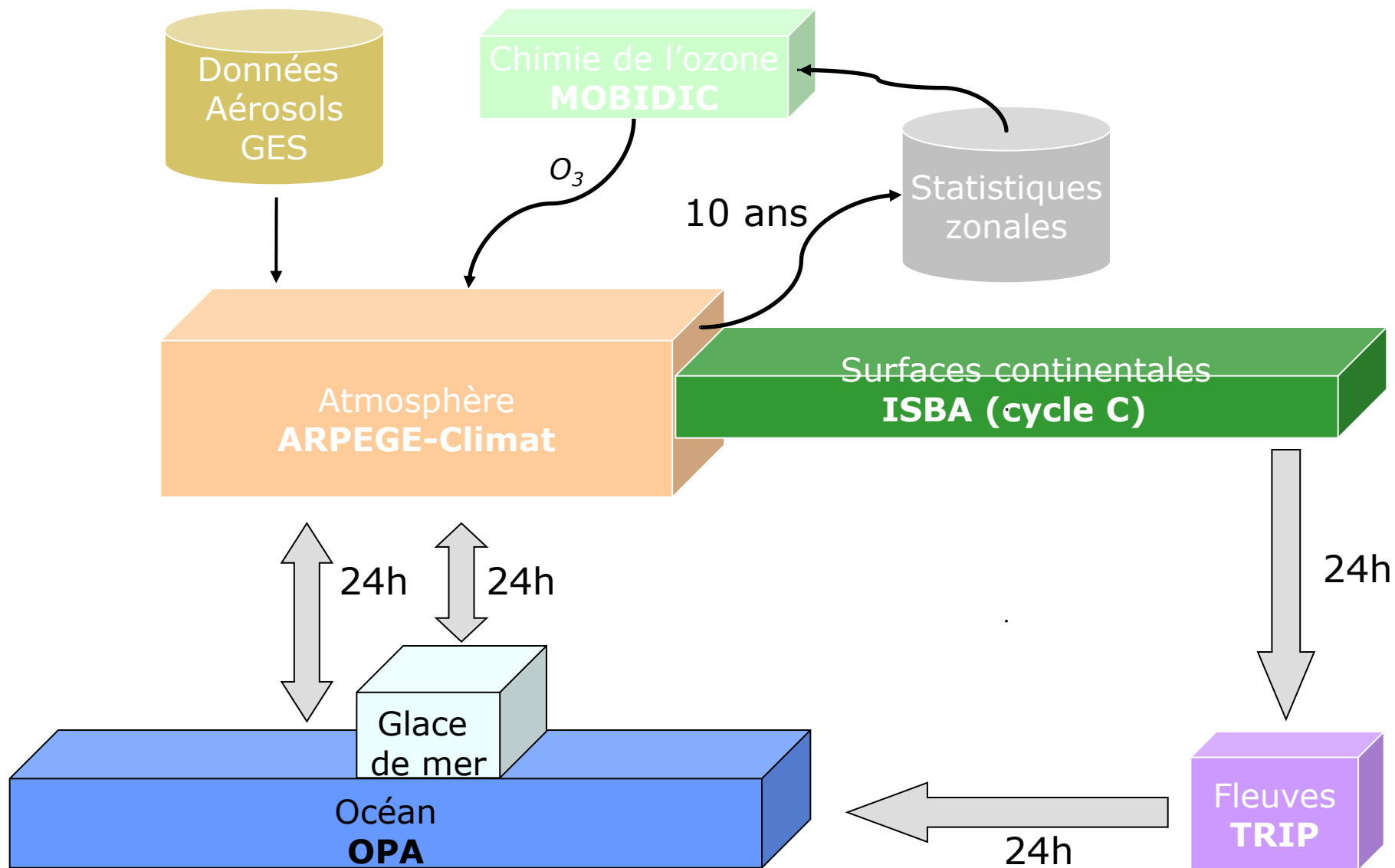
# Les modèles de climat



- La représentation du relief est essentiel pour la représentation régionale du climat

# Les modèles de climat

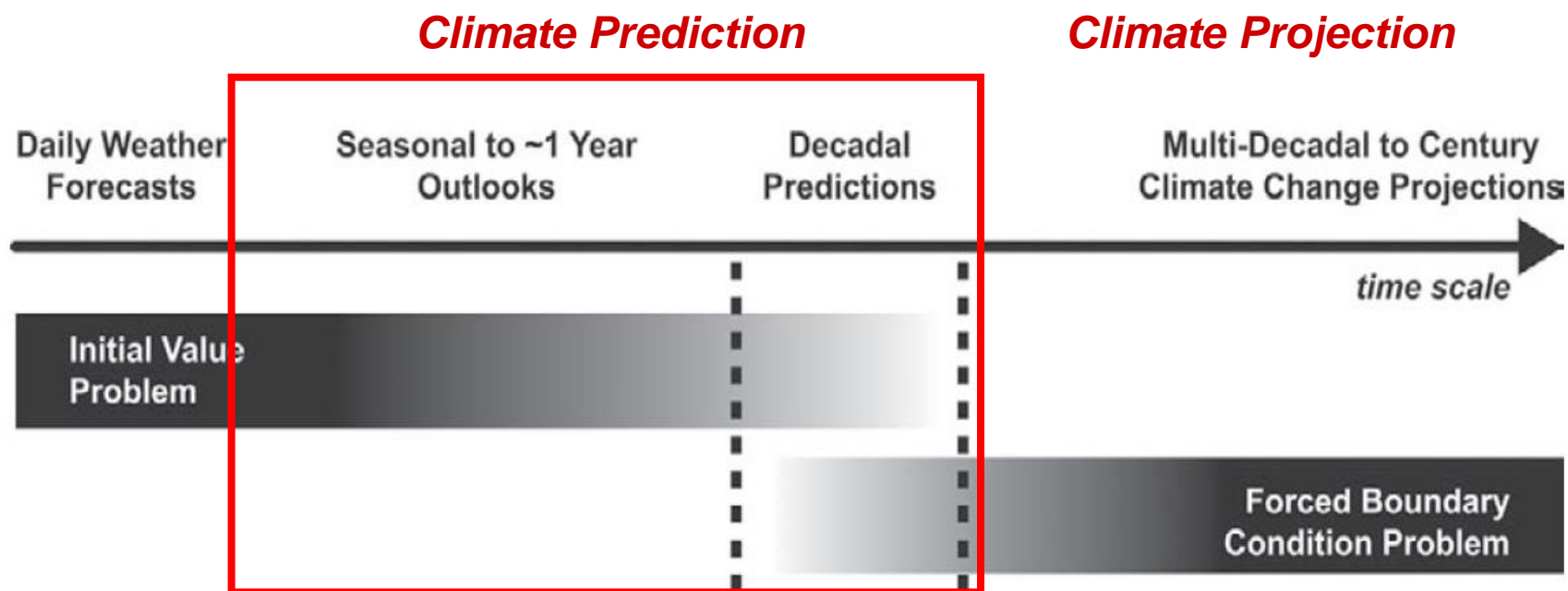
Un exemple de « système-terre » (CNRM-GAME)



# Les incertitudes

# Prévisions vs Projections

- Progression d'un problème de conditions initiales (prévision du temps) jusqu'à un problème de forçage des conditions aux limites (**projections climatiques**), avec entre les 2 les prévisions climatiques (**intra-saisonnière, saisonnière, interannuelle et décennale**).



Meehl et al. (2009)

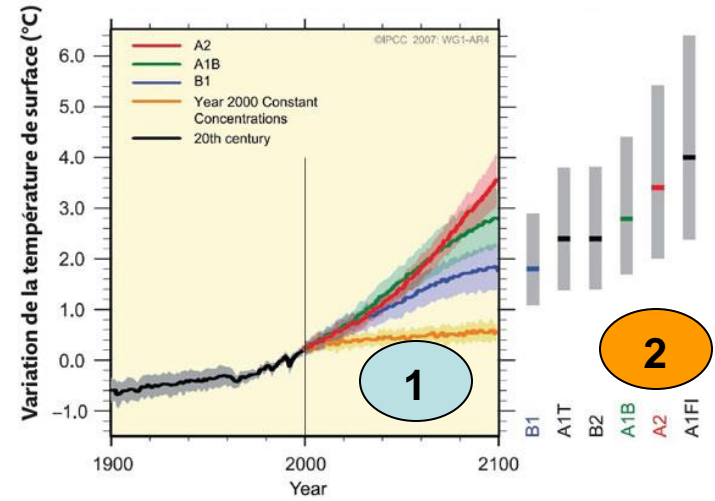


# Les incertitudes

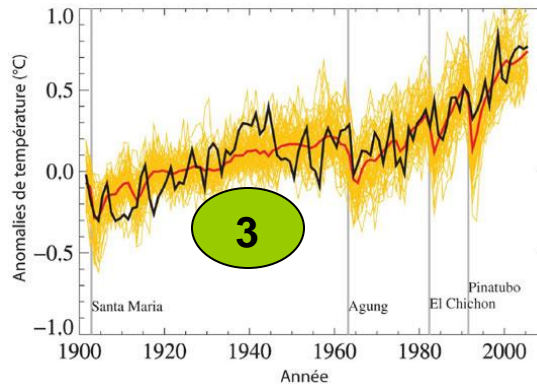
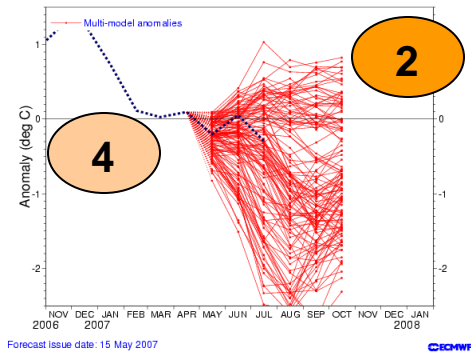
## ■ Uncertainties : Projection & Forecast

### ● Uncertainty sources

- 1 Radiative forcing / Green House Gas Concentration Evolution
- 2 Climate Modeling
- 3 Internal Climate Variability
- 4 Initial condition



NINO3.4 SST anomaly plume  
EUROSIP multi-model forecast from 1 May 2007  
ECMWF, Met Office, Météo-France  
Monthly means plotted using NCEP adjusted Qv2 1971-2000 climatology



- The uncertainty is inherent to the climate prediction and projection
- It is part of the climate information to be tailored and conveyed
- We have to cope with and to learn how to use it in the best possible way

# Les sources d'incertitude des projections

- **Les scénarios socio-économiques de base** : ils ont une composante non prévisible importante qui augmente l'incertitude (la démographie après 2050, le comportement humain, ...).
- **Les modèles climatiques** : ils peuvent ne pas représenter certains processus importants pour l'évolution du climat (émissions de méthane dues à la fonte des pergélisols ...); certains processus peuvent être mal représentés (le rôle radiatif des nuages ...); parmi les données d'entrées des modèles, certains paramètres ne sont pas connus avec précision (coefficients de mélange, ....).
- **Le caractère chaotique du climat** : une part de la variabilité climatique résulte d'interactions complexes dans l'atmosphère, les océans, les glaces ... ou aux interfaces entre ces composantes, c'est la variabilité climatique interne. Elle a une forte composante imprévisible en particulier à des échéances supérieures à l'année.

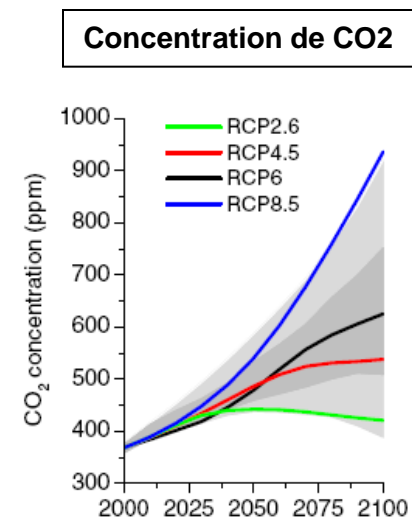
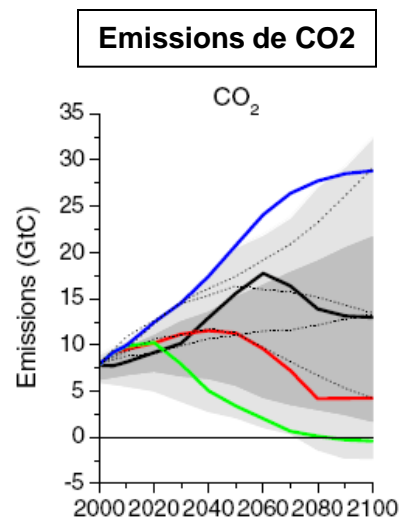
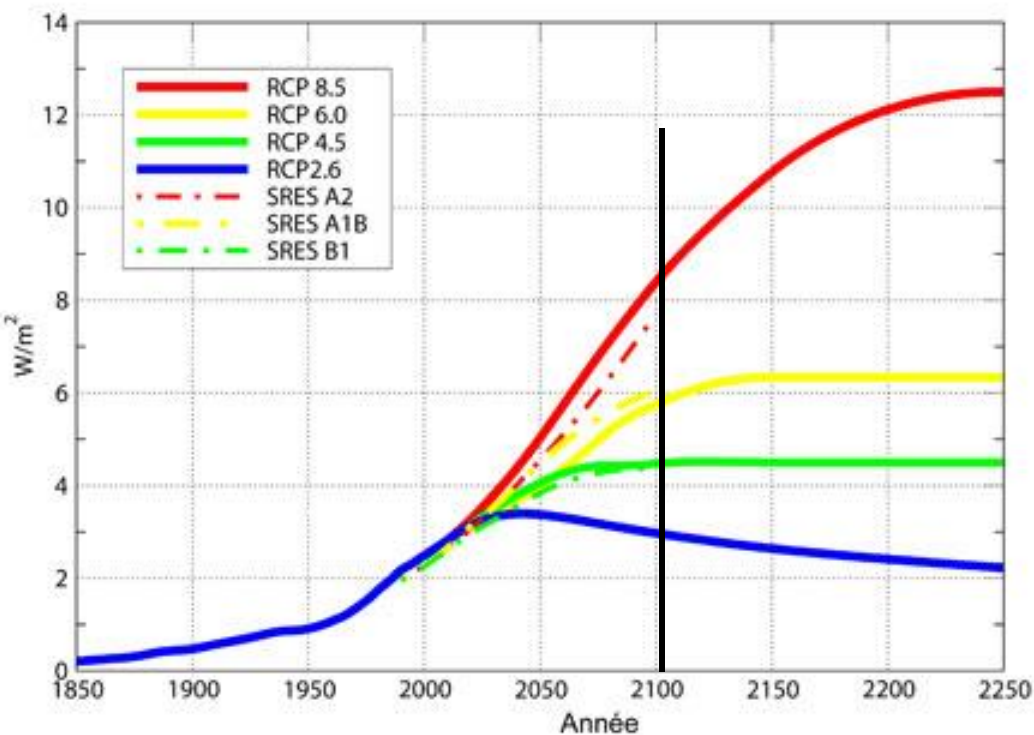
# Les scénarios du Changement Climatique

## ■ Dernières projections Climatiques

### ● Nouveaux Scénarios (Radiative Concentration Pathway)

- RCP xx indication du forçage radiatif à la fin du siècle
- RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 8.5 : émissions croissantes de GES

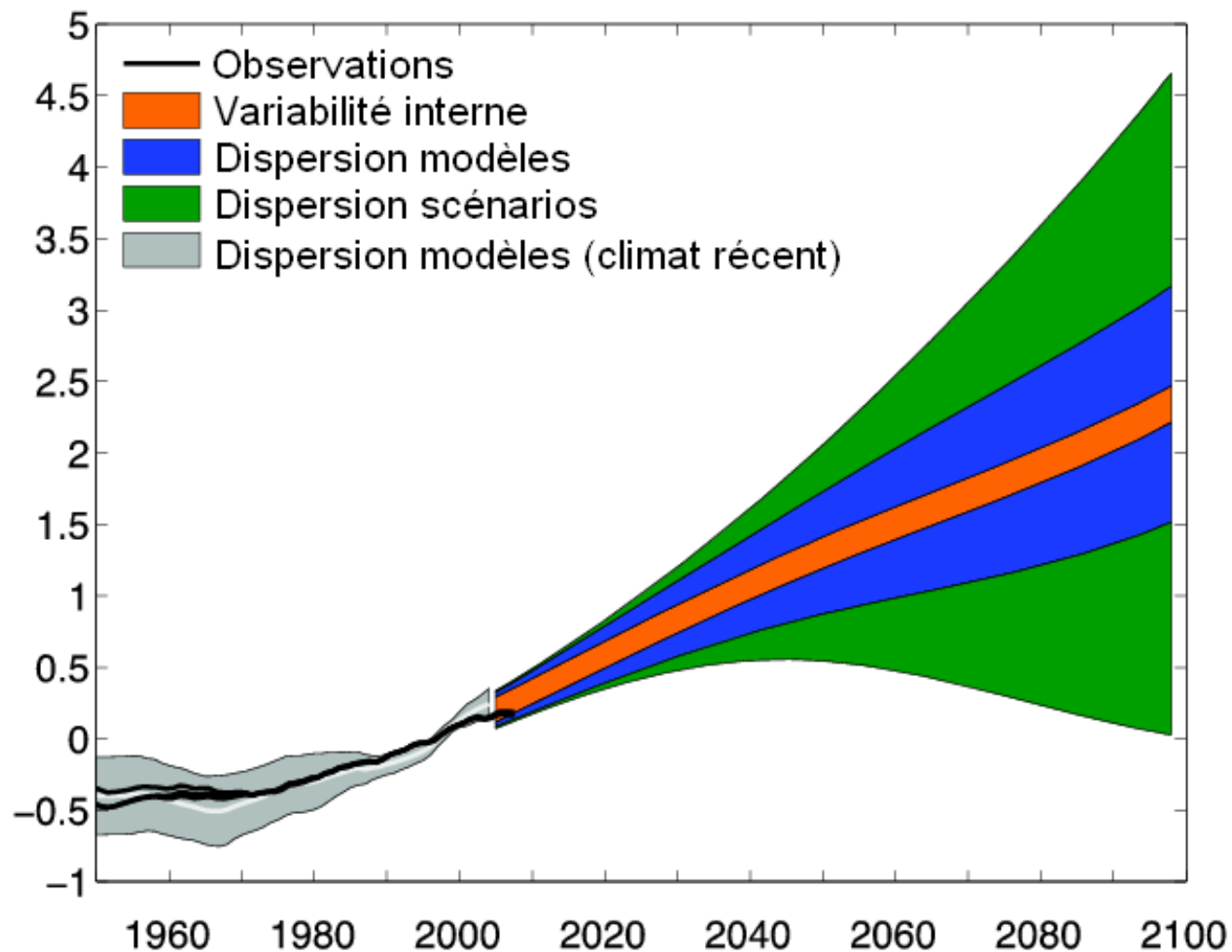
### ● RCP vs SRES (B1, A1B, A2)





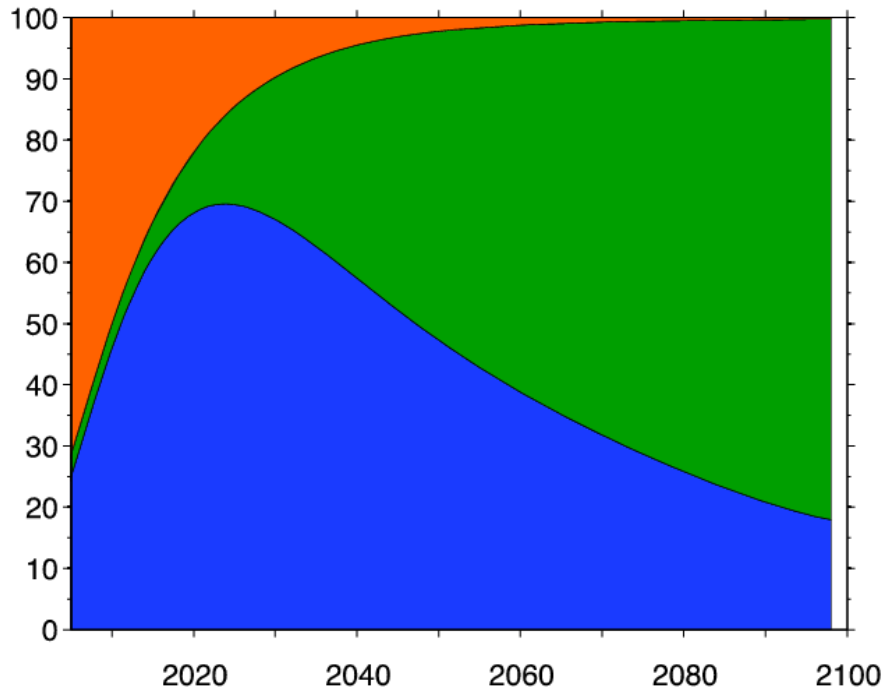
# Incertitudes des projections: évolutions simulées selon les sources

Changements de  
température  
moyenne globale  
relativement à  
1986-2005 (°C)

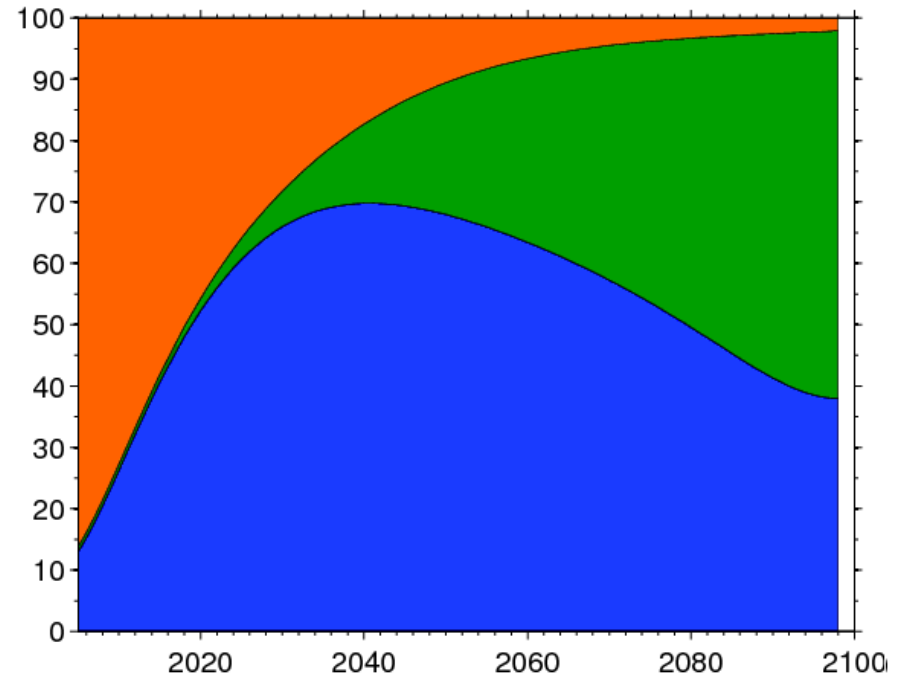


# Incertitudes des projections: fraction de variance totale expliquée par source (%)

Température moyenne  
décennale globale (année)

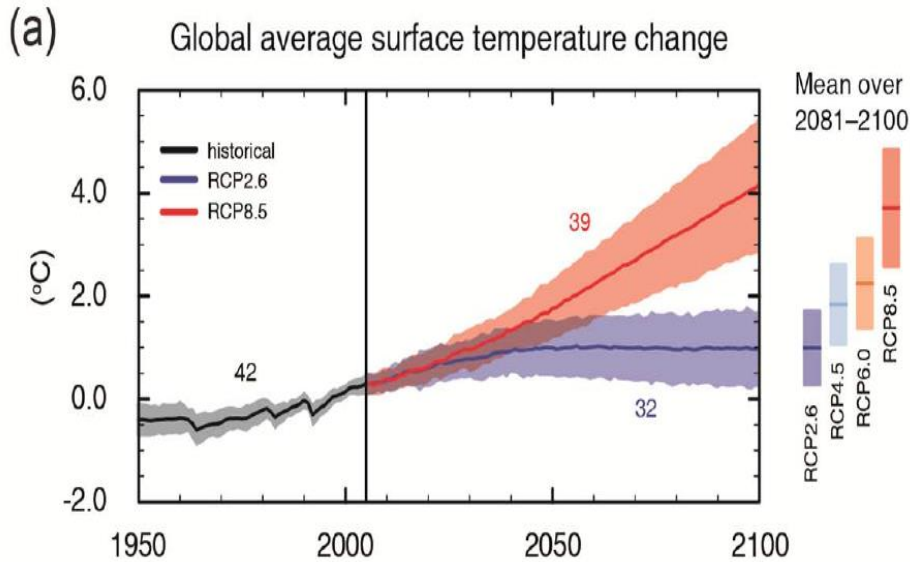


Température moyenne  
décennale en Europe (hiver)



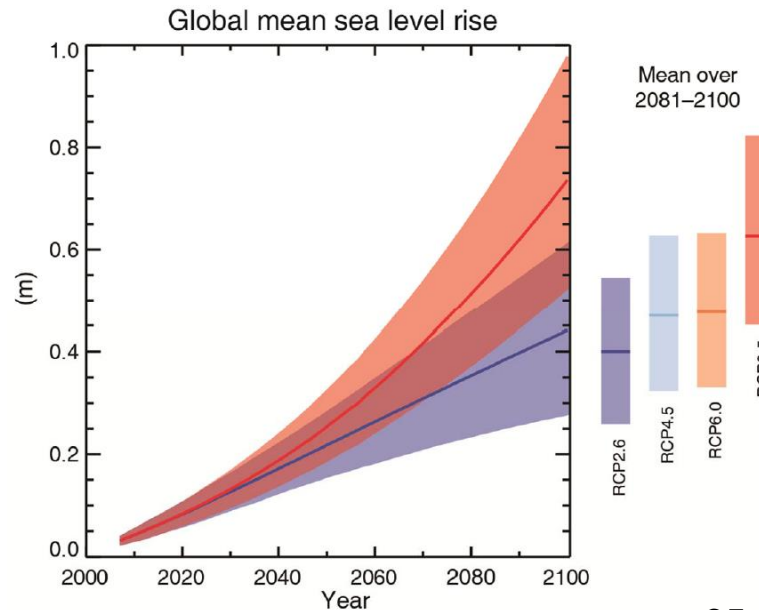
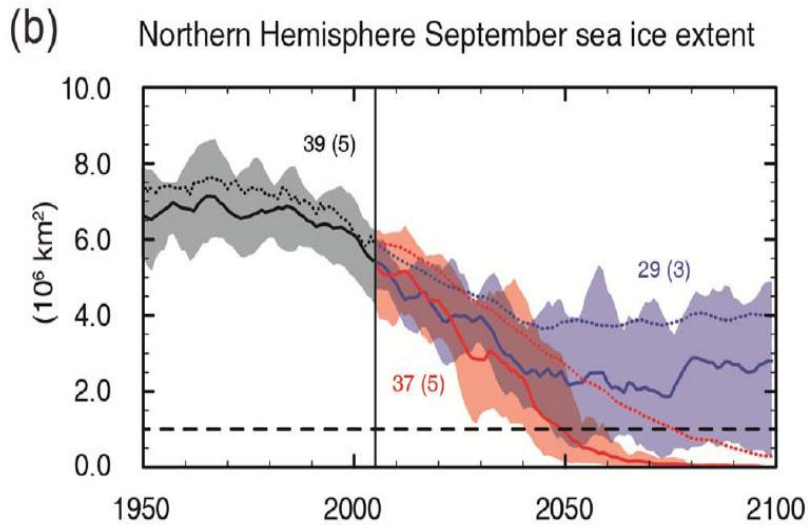
- Variabilité interne
- Dispersion modèles
- Dispersion scénarios

# Traduction des incertitudes



Ordre de grandeur entre période glaciaire et interglaciaire : 5-6 degrés

Temps caractéristique de transition glaciaire/interglaciaire: 15000 a 20000 ans.

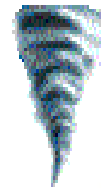


# Les incertitudes des prévisions climatiques

- *Le chaos et la prévision d'ensemble*

Sources d'incertitudes :

- Différences entre les conditions initiales fournies aux modèles et la réalité
  - Manque d'observation
  - Imperfection du système d'assimilation
- Erreur de modélisation (Océanique , Atmosphérique et Couplage)
- Variabilité naturelle de l'atmosphère
- *Interprétation de la prévision*



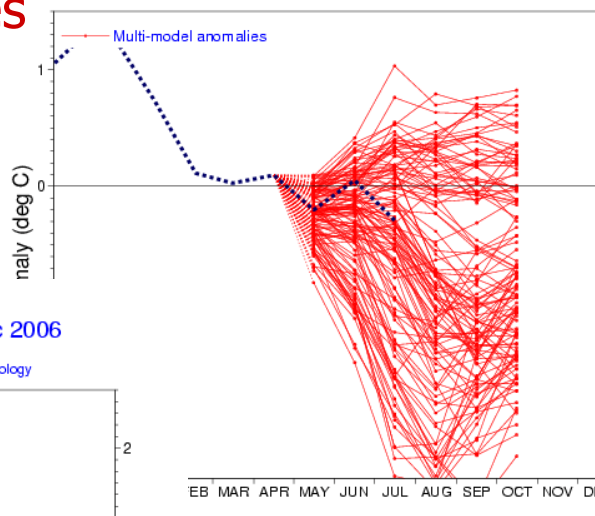
# La prévision climatique

■ 2006/2007 :

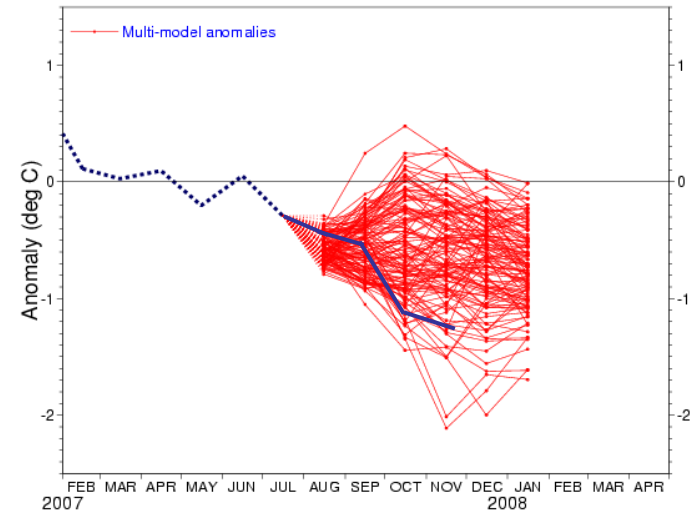
● Prévisions de SST

Échantillonner les incertitudes inhérentes aux prévisions

NINO3.4 SST anomaly plume  
EUROSIP multi-model forecast from 1 May 2007  
ECMWF, Met Office, Météo-France  
Monthly means plotted using NCEP adjusted OIv2 1971-2000 climatology



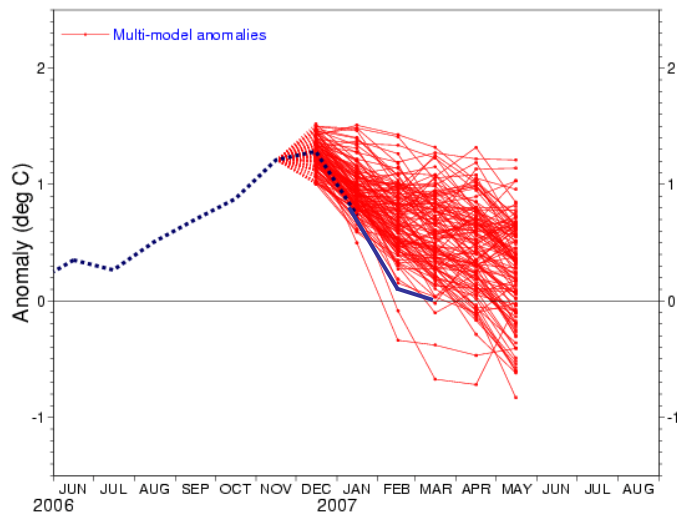
NINO3.4 SST anomaly plume  
EUROSIP multi-model forecast from 1 Aug 2007  
ECMWF, Met Office, Météo-France  
Monthly means plotted using NCEP adjusted OIv2 1971-2000 climatology



Forecast issue date: 15 Aug 2007

ECMWF

NINO3.4 SST anomaly plume  
EUROSIP multi-model forecast from 1 Dec 2006  
ECMWF, Met Office, Météo-France  
Monthly means plotted using NCEP adjusted OIv2 1971-2000 climatology



2007

ECMWF

- Prévisions d'Ensemble
- Prévisions d'Ensemble Multi-Modèles

INRA – PERPHECLIM

05/11/2014 – Montpellier



**METEO FRANCE**  
Toujours un temps d'avance

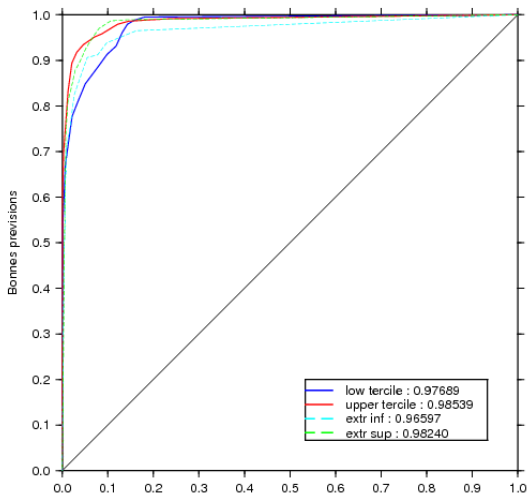
ECMWF

Forecast issue date: 15 Dec 2006

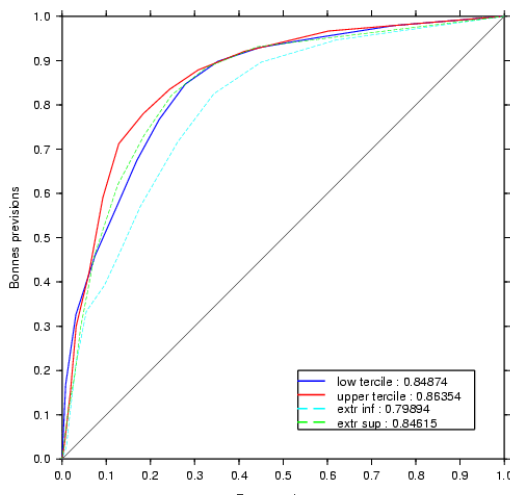
# La prévision climatique

## Qualité des prévisions Océaniques :

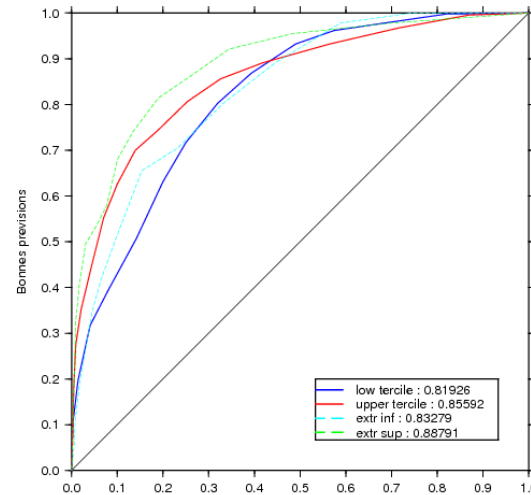
TSOL METEO-FRANCE ROC CURVES DJF LEAD=1 NINO3.4



TSOL METEO-FRANCE ROC CURVES NDJ LEAD=1 TNA



TSOL METEO-FRANCE ROC CURVES OND LEAD=1 WTIO



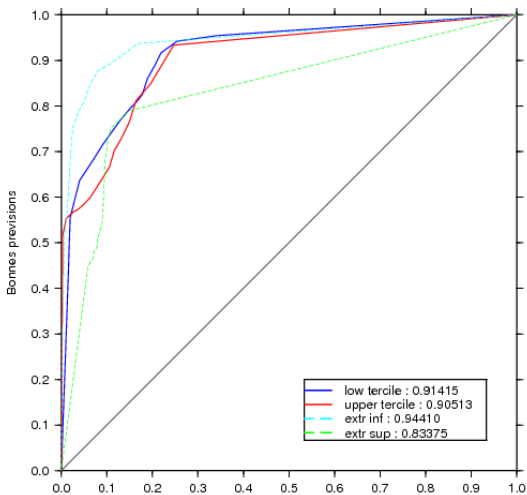
Best

Niño 3.4

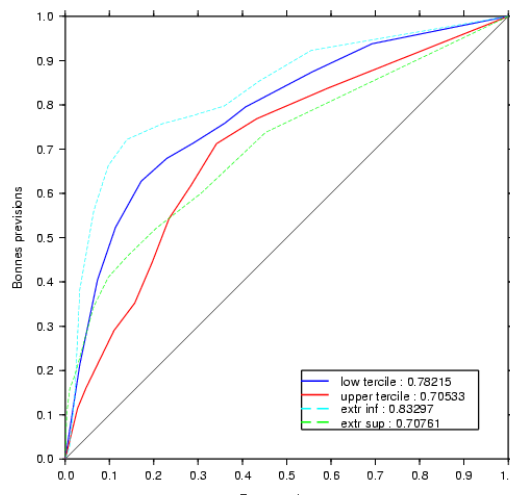
TNA

WTIO

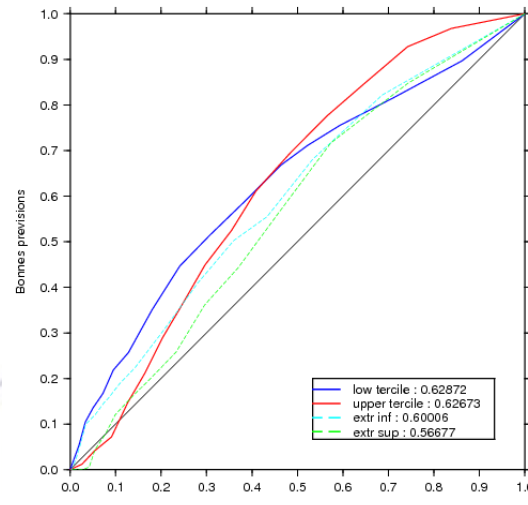
TSOL METEO-FRANCE ROC CURVES ASO LEAD=1 NINO3.4



TSOL METEO-FRANCE ROC CURVES AMJ LEAD=1 TNA



TSOL METEO-FRANCE ROC CURVES JJA LEAD=1 WTIO



Worst

Fausses alarmes

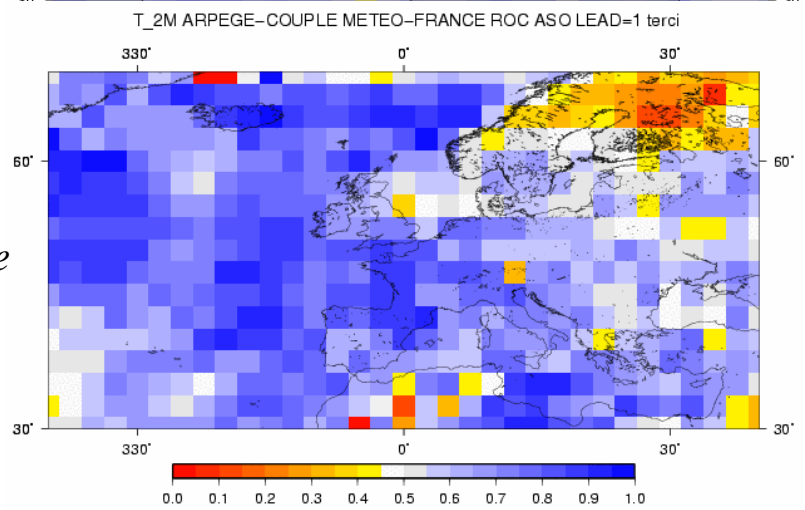
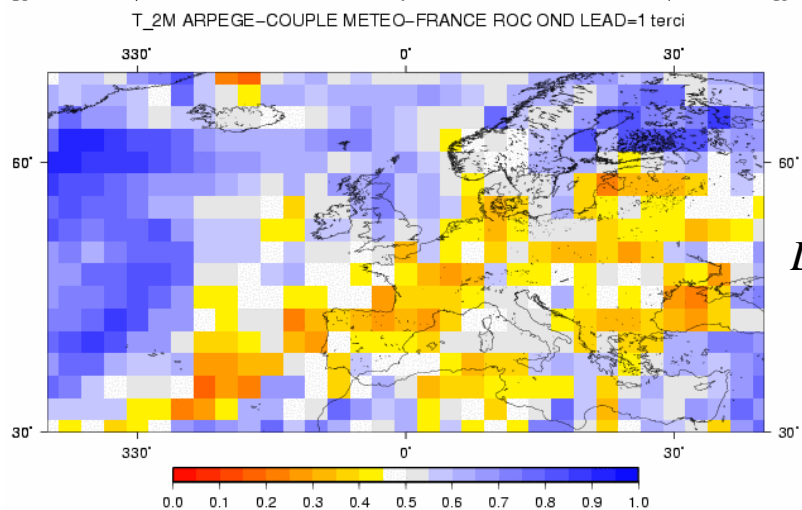
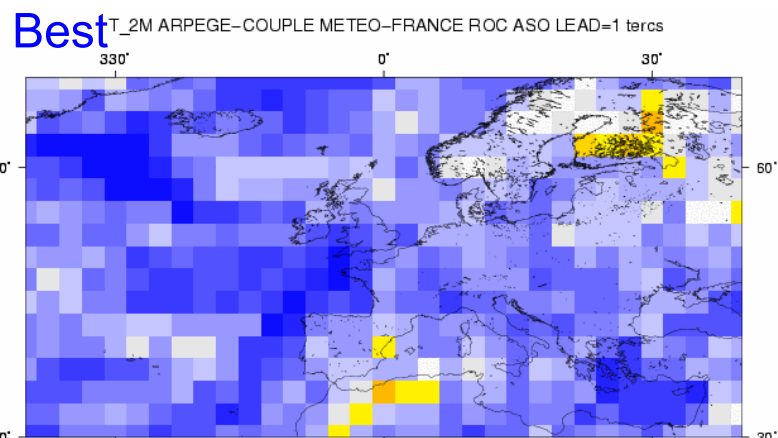
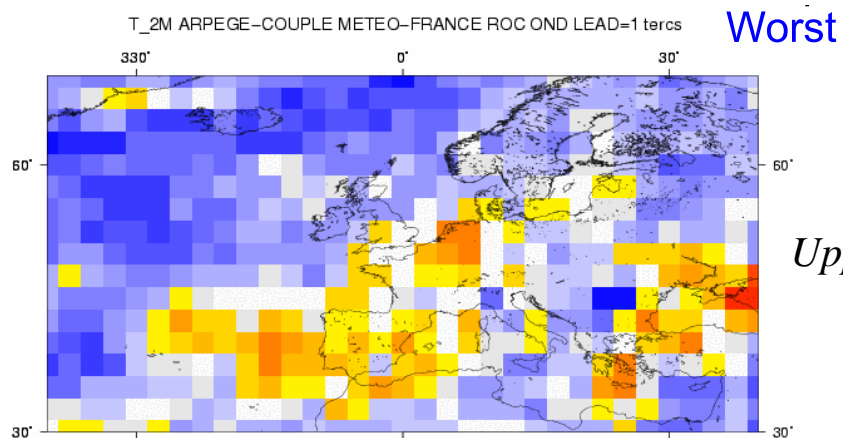
Fausses alarmes

Fausses alarmes



# La prévision climatique

## ■ Qualité des prévisions de T2m

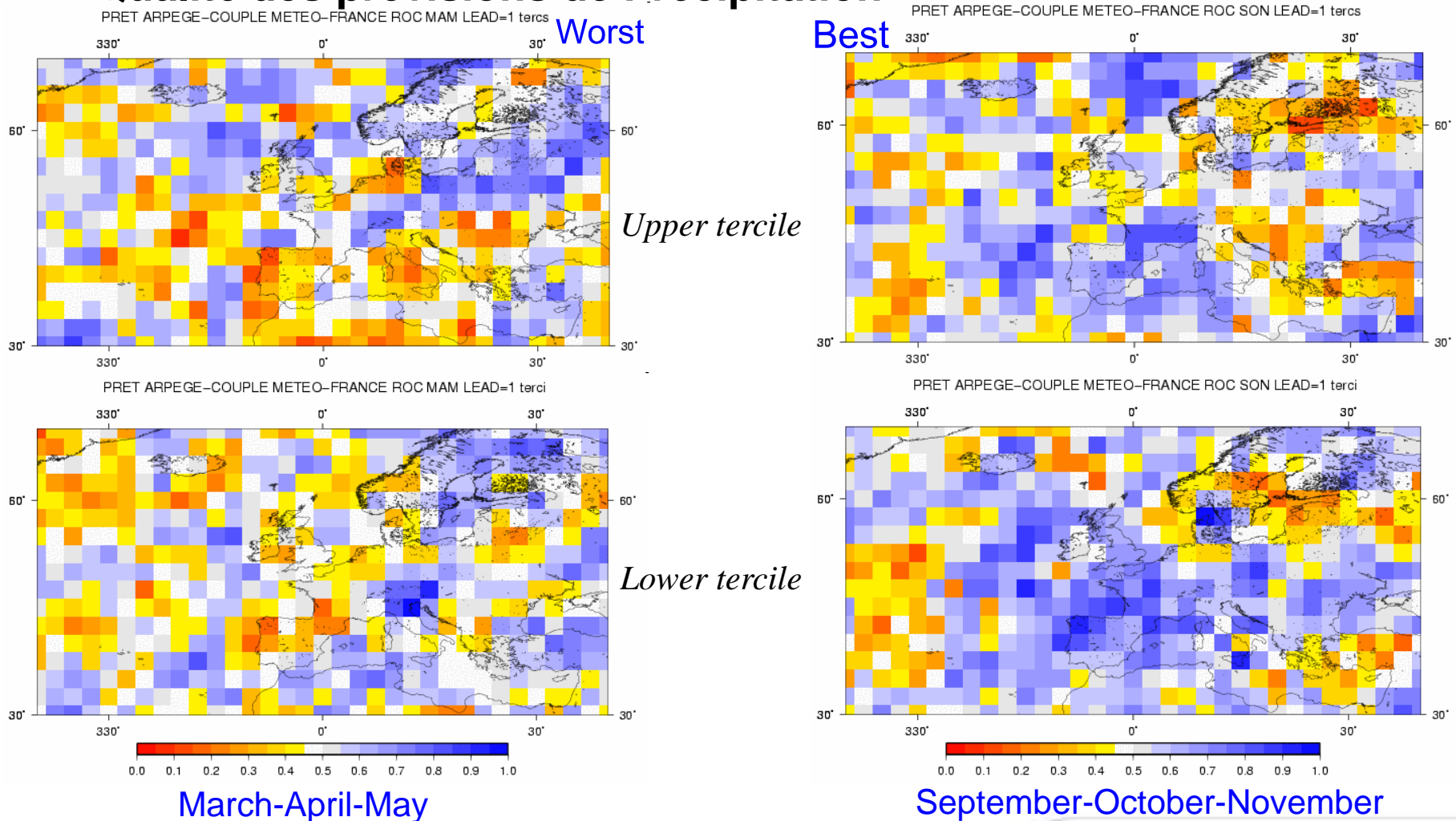


October-November-December

August-September-October

# La prévision climatique

## ■ Qualité des prévisions de Précipitation





# Quelques exemples d'utilisation

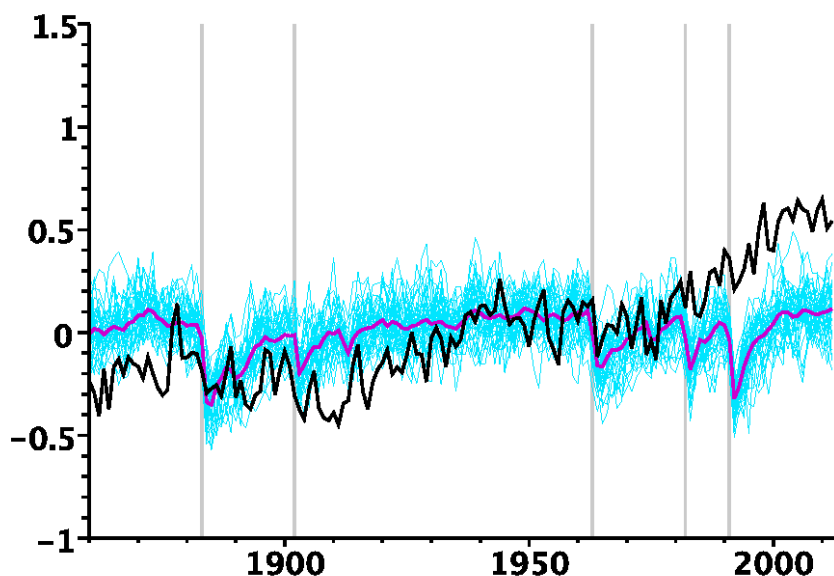
# Applications des modèles de climat

- **Reproduction du climat présent**
  - Validation, évaluation, amélioration du modèle
  - Compréhension des processus et du climat actuel (études de sensibilité)
- **Scénarios climatiques (IPCC)**
  - Impacts d'une augmentation des gaz à effet de serre / aérosols
  - Impacts des changements de végétation et d'utilisation des sols
- **Reconstructions paléoclimatiques**
  - Optimum climatique de l'Holocène (6000 ans)
  - Dernier maximum glaciaire (20 000 ans)
  - Dernier Interglaciaire (125 000 ans)
- **Prévisions saisonnières**
- **Prévisions décennales**

# Impact des forçages anthropiques

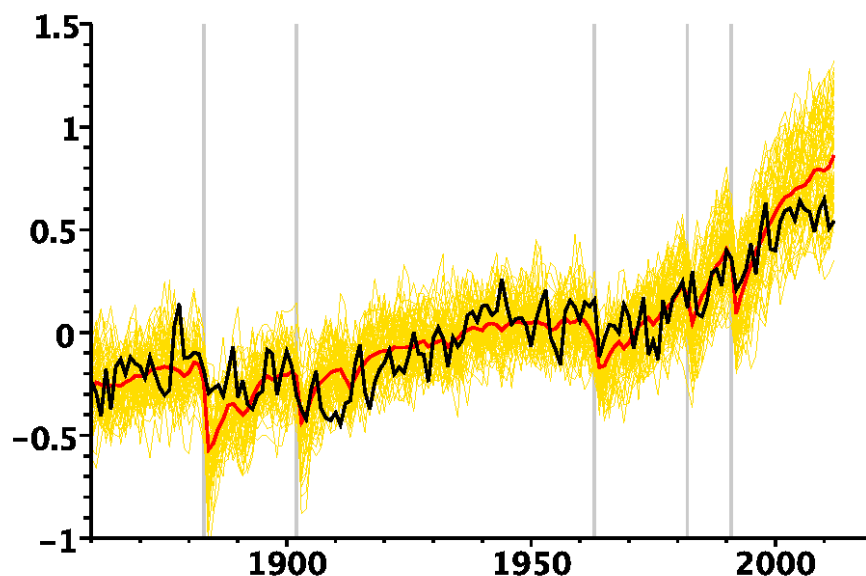
## Simulations n'intégrant que des forçages naturels

- Variabilité du rayonnement solaire incident
- Éruptions volcaniques



## Simulations intégrant des forçages naturels et anthropiques

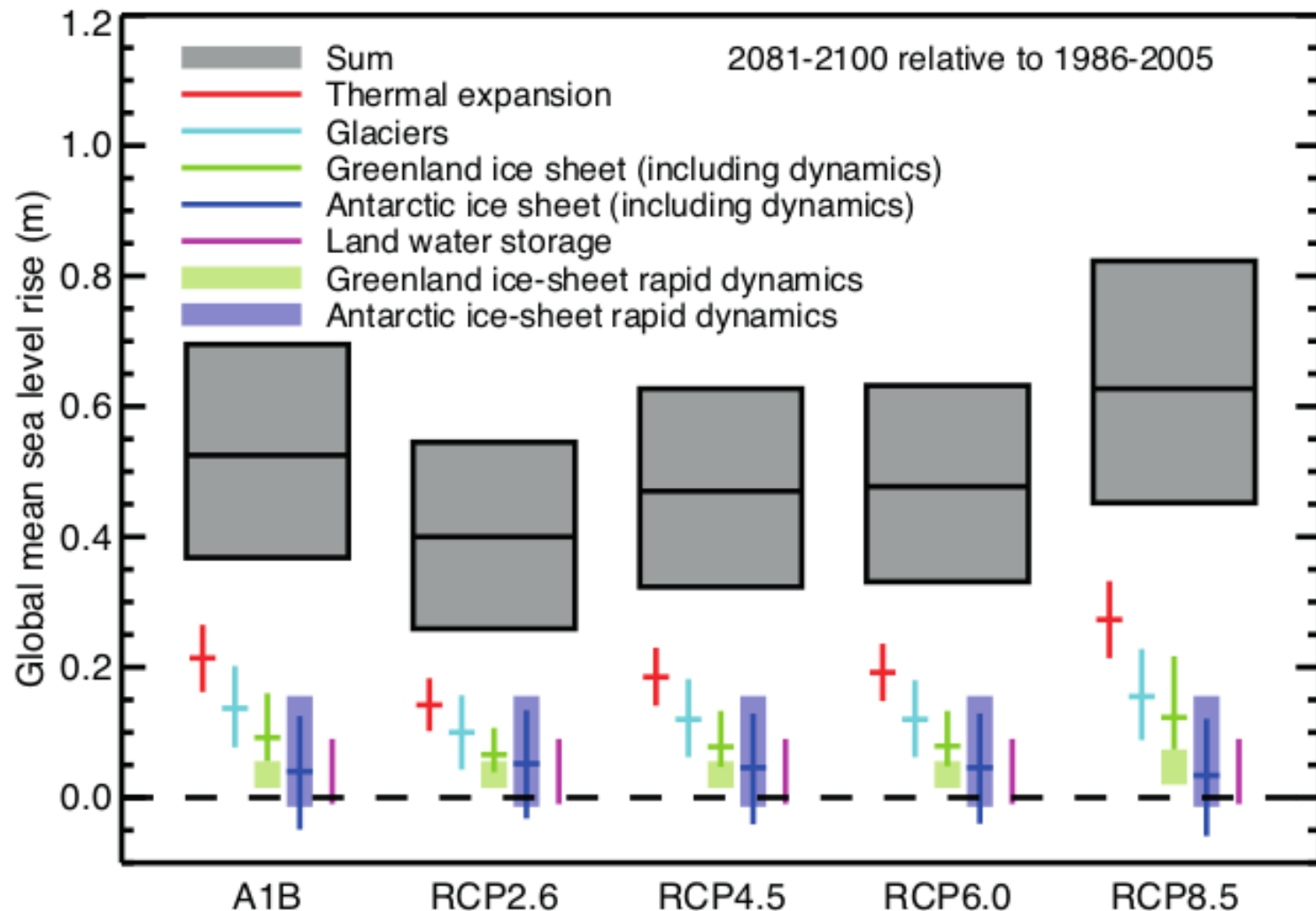
- Variabilité du rayonnement solaire incident
- Éruptions volcaniques
- Gaz à effet de serre (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, ...)
- Aérosols



Évolution de la température moyenne globale sur le 20<sup>ème</sup> siècle en anomalie par rapport à la période 1960-1989.

# Changement du niveau des mers

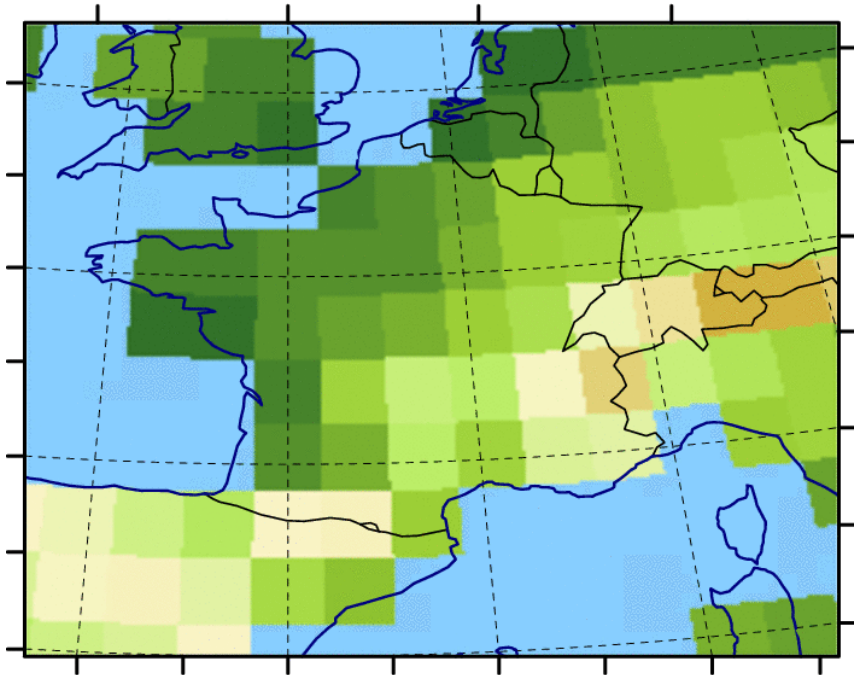
Evaluation de l'augmentation du niveau marin de 1980-1999 à 2090-2099  
Décomposition par processus et selon le scénario d'émissions



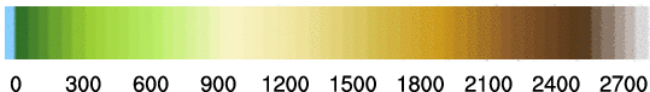
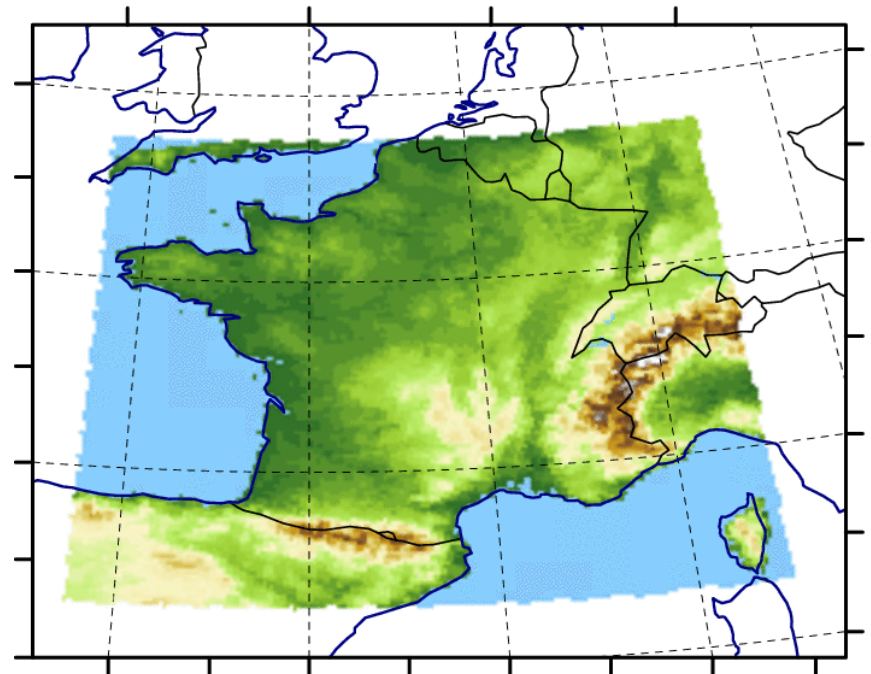
# Régionalisation du climat

En raison des coûts de calcul, la résolution des modèles globaux est généralement limitée à ~100km.

CMIP5 - ARPEGE 120km



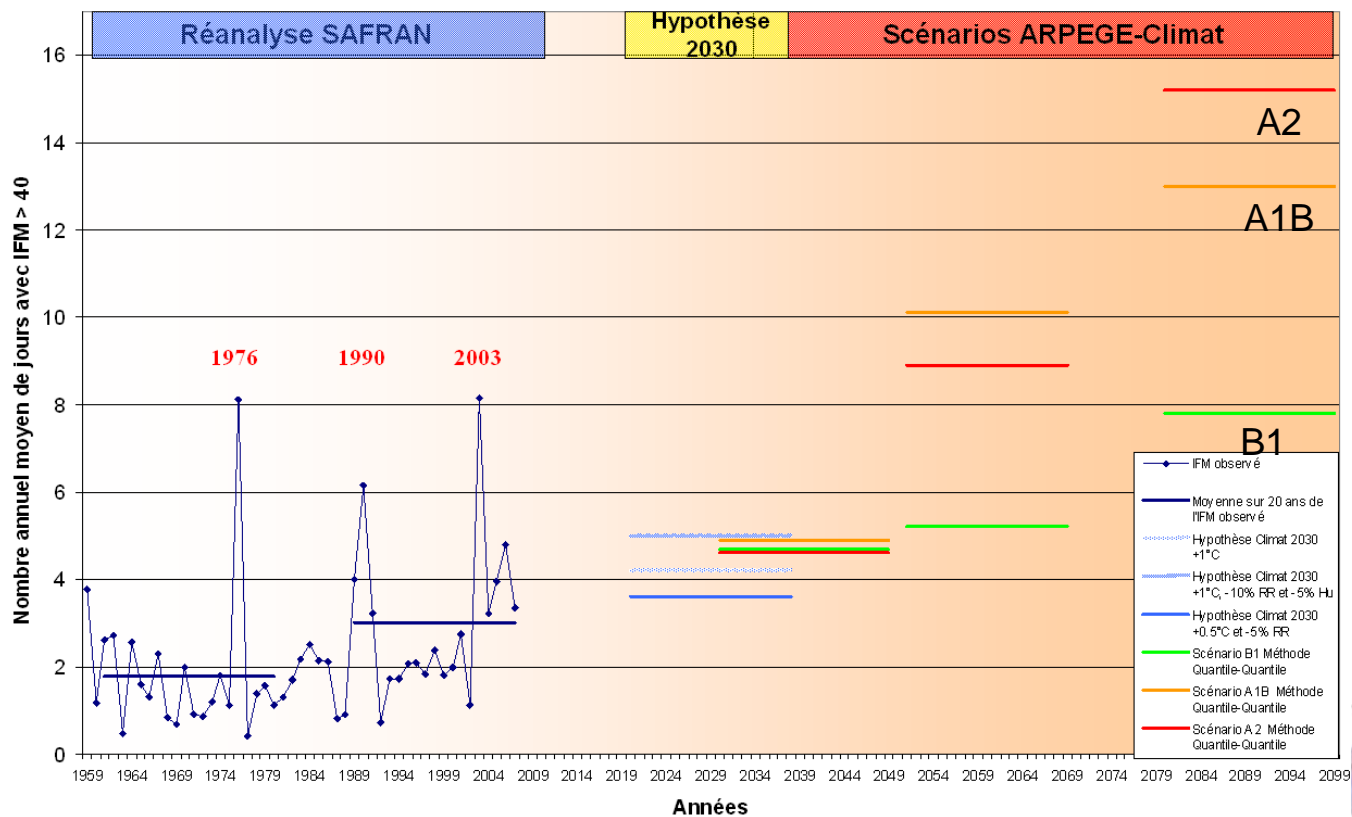
CORDEX - ALADIN 12km



Metres

# ... Une évolution prévisible du danger météorologique d'incendie

- Une évolution à la hausse observée des indices météorologiques de danger.
- Une réflexion en cours à l'horizon 2030-2050 dans le cadre de l'extension future des zones à risque élevé d'incendie de forêt



Nombre de jour par an avec un risque météorologique d'incendie important (IFM supérieur à 40)

# Évaluation de l'impact du Changement Climatique sur la végétation et cultures

- Le changement climatique a-t-il un impact ?
  - Test de tendance sur 150 ans
  - Test de Student (LAI<sub>max</sub>) : test de différence sur les moyennes [Climatologie passée (P) vs. Futur Proche (FP)] et [P vs. Futur Lointain (FL)]
  
- L'impact diffère-t-il selon que l'on utilise un modèle de climat ou un autre ?
  - Test ANOVA : test sur les variances pour voir si les moyennes sont les mêmes ou si au moins un modèle diffère des autres
  
- Céréales à paille, prairies naturelles, feuillus, conifères
  - Biomasse (LAI), phénologie (début et fin de cycle)
  - Contenu en eau du sol, température du sol, flux eau/CO<sub>2</sub>, neige

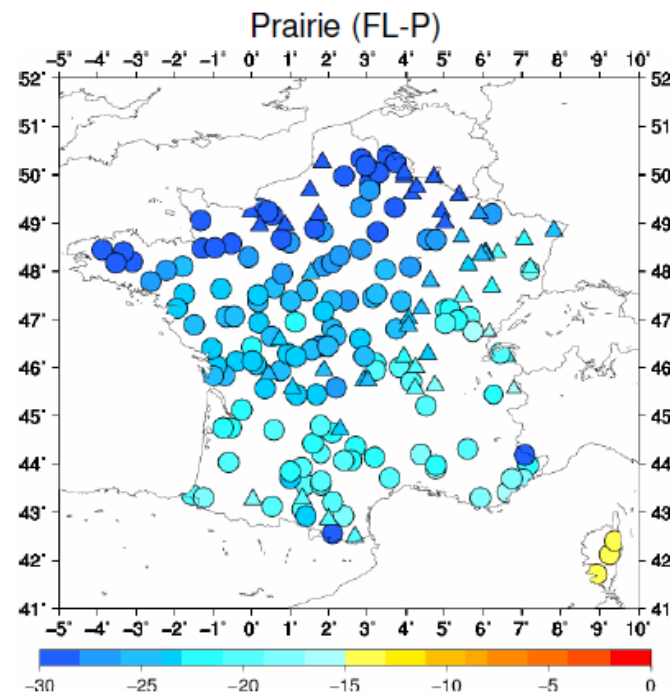
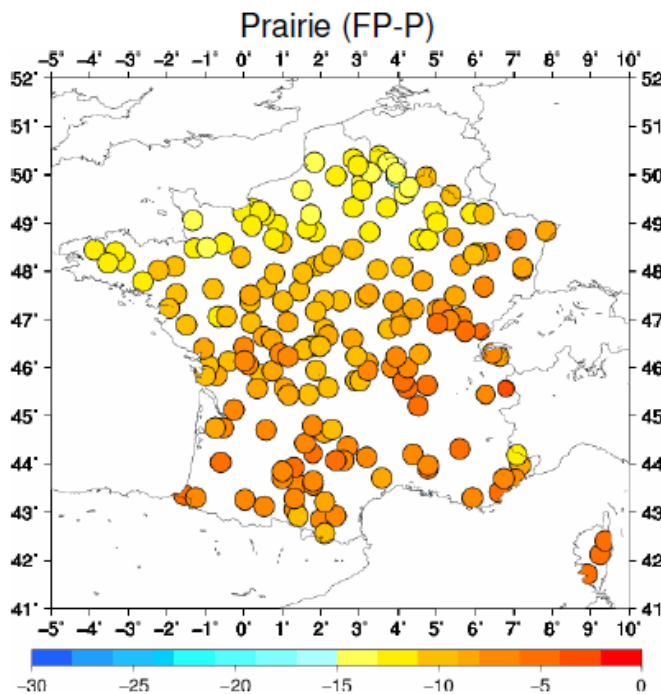
Simulations de 150  
ans sur 191 sites



# Évaluation de l'impact du Changement Climatique

## ■ Partout en France

- **FP** : bon accord de l'impact dérivé des divers modèles de climat sur
  - le **début de cycle et la date du LAImax (plus précoces)**
  - le **nombre de jours avec sol sec (SWI < 0.3)**, jusqu'à +30 j/an
  - le **nombre de jours avec sol à saturation (SWI > 1)**, jusqu'à -30 j/an
- **FL** : meilleur accord sur la **date du LAImax (plus précoce)** que sur le début de cycle, pour céréales et prairies

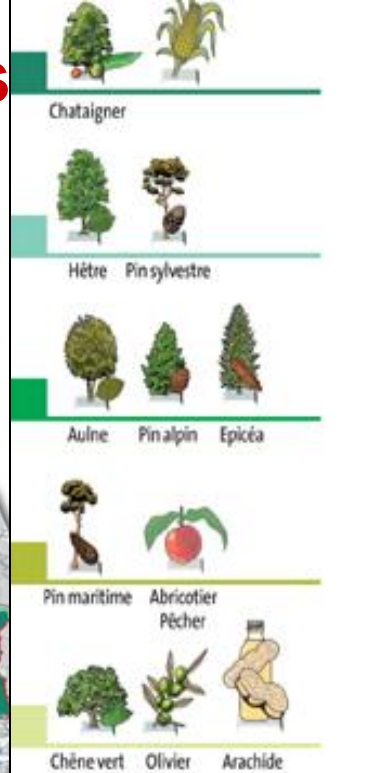
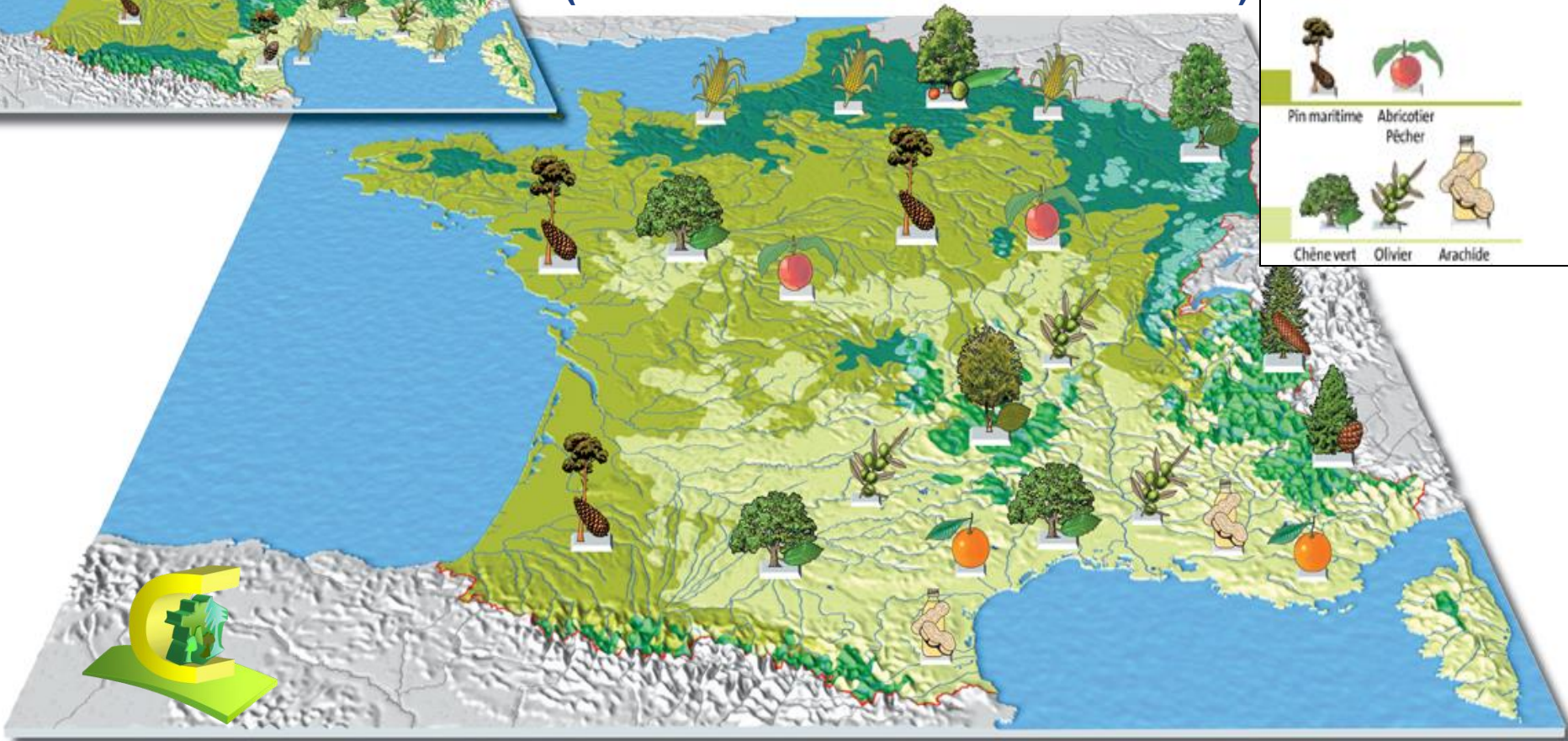


Date du  
LAImax  
des  
prairies

# ... et une modification des paysages

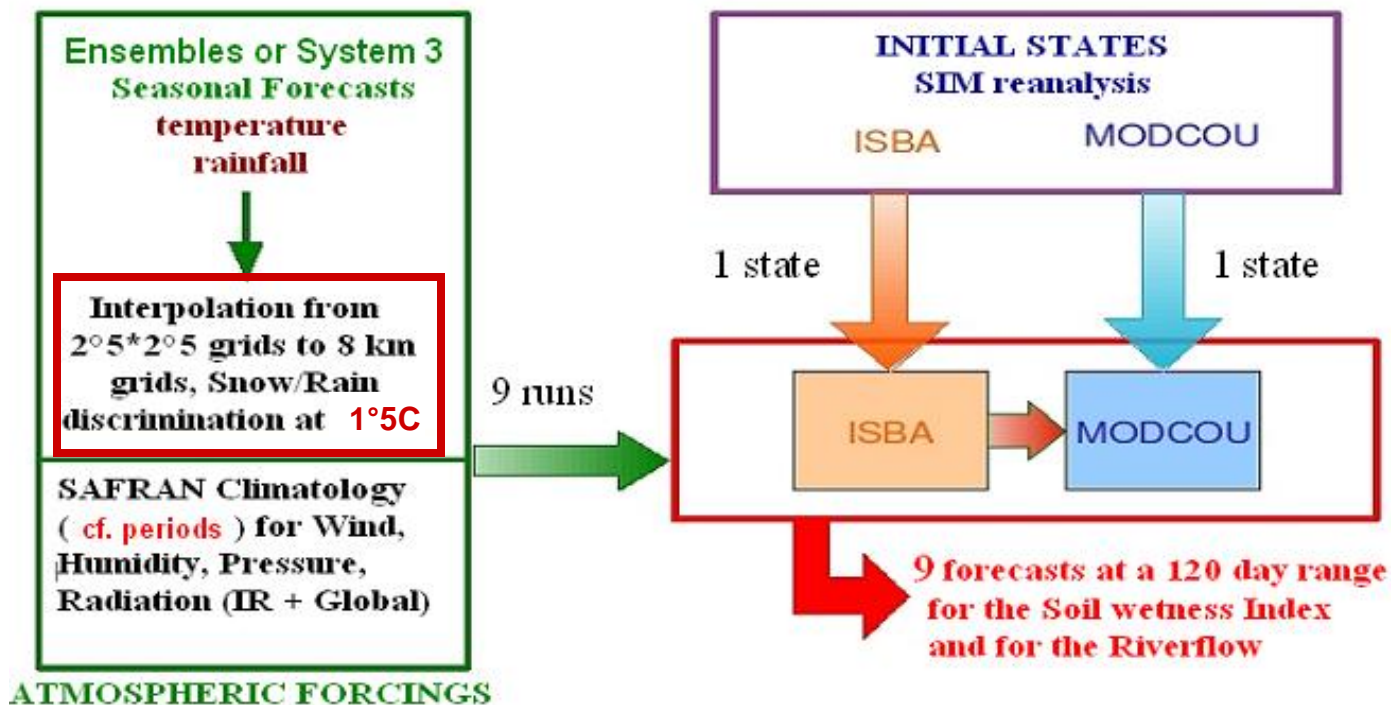
## Climat actuel

## Fin du XXI<sup>ème</sup> siècle (données ARPEGE-Climat – scénario B2)



# Prévisions saisonnières hydrométéorologique

- Méthode adaptée de la prévision des débits à moyenne échéance (Rousset-Regimbeau – 2007, Tanguy - 2009, Céron *et al.* - 2010)



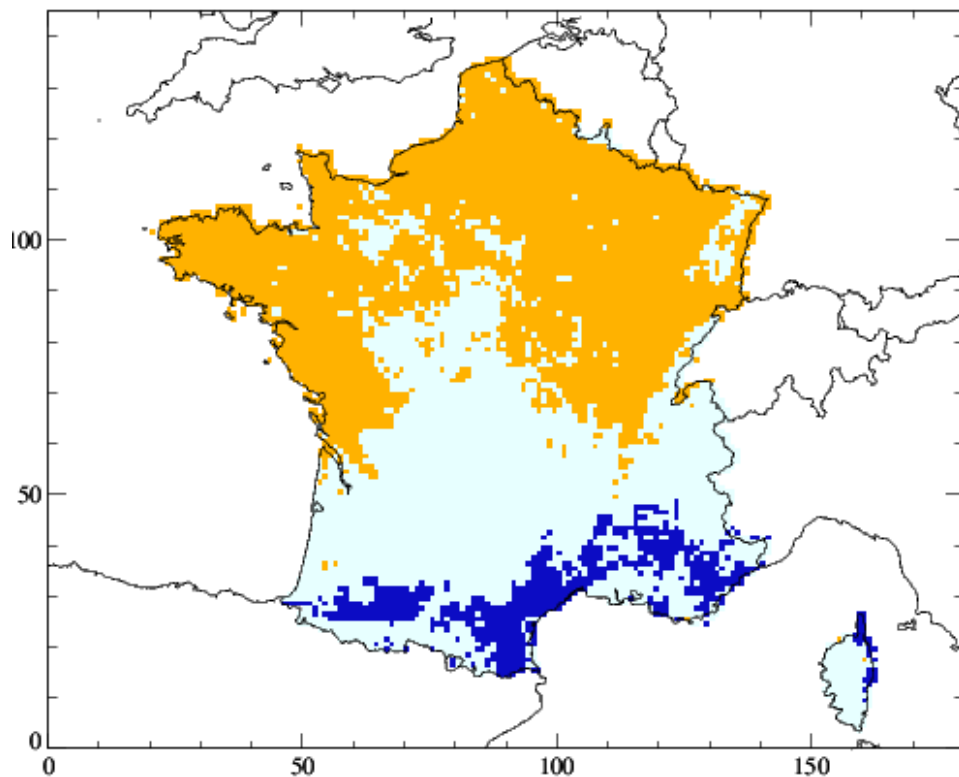
- Période de 1960 à 2005 (ENSEMBLES) – 9 membres
- Période de 1979 à 2007 (System3) – 9 ou 11 membres



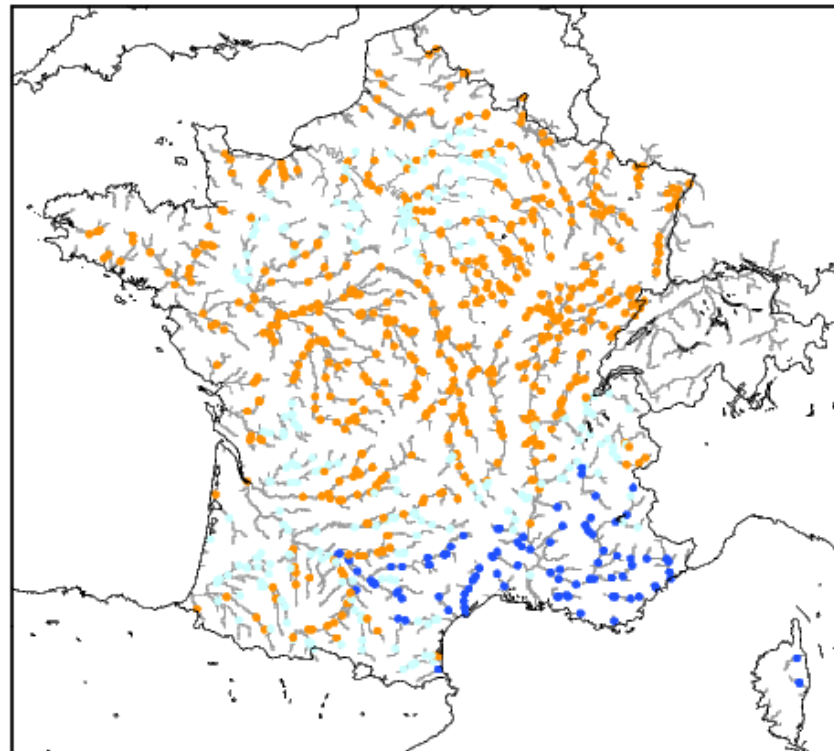
# Résultats pour le Printemps (MAM)




Comparaison des corrélations entre Hydro-SF et RAF – CI 1<sup>er</sup> Février  
(Singla *et al.*, 2012)

SWI



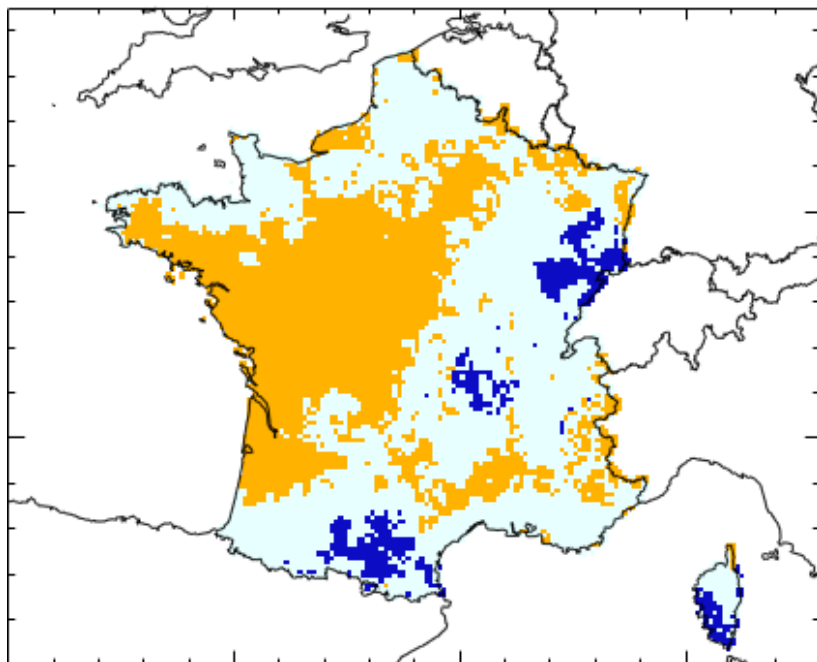
Débits



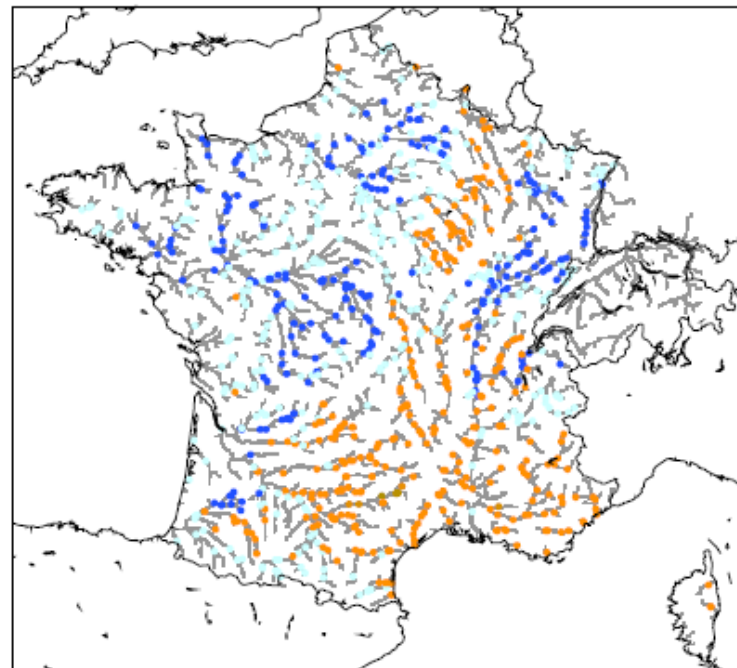
-  Régions où Hydro-SF est significativement meilleur que RAF
-  Régions où Hydro-SF est équivalent à RAF
-  Régions où RAF est significativement meilleur que Hydro-SF

# Résultats pour l'Été (JJA)




Comparaison des corrélations entre Hydro-SF (CI Avril) et RAF



**SWI**



**Débits**

-  Régions où Hydro-SF est significativement meilleur que RAF
-  Régions où Hydro-SF est équivalent à RAF
-  Régions où RAF est significativement meilleur que Hydro-SF

# Les prévisions saisonnières pour l'agriculture

Données issues de la  
méthode  
fréquentielle

Données de prévision  
saisonnière du temps  
« descendues  
d'échelle »

Forçages  
météorologiques

## Paramètres d'entrée

Réserve utile maximale :  
**140 mm**  
Type de sol :  
**Limono-argileux**

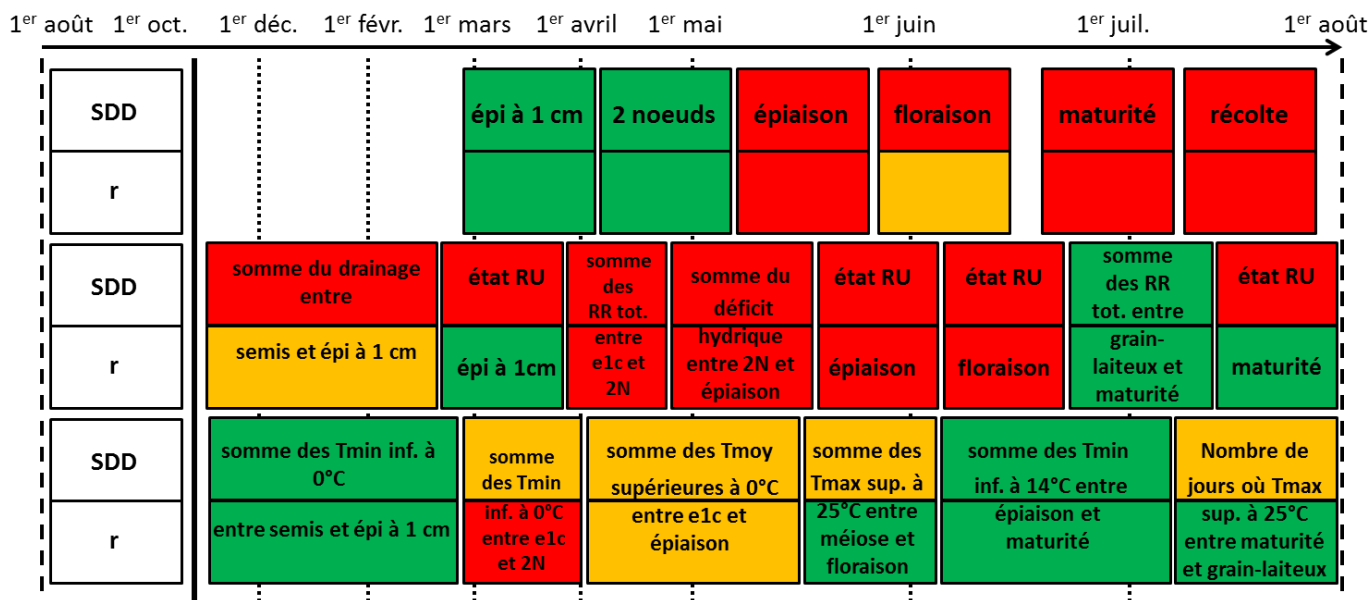
Modèle de culture  
**PANORAMIX**  
(Gate, 1995)

## Données de culture

Variété de blé :  
**Soissons**  
Date de semis :  
**20 octobre**

# Comparaison "PS" vs. "fréquentiel" (1)

Evaluation déterministe - Simulation PS : « Multi-modèles Quantile-Quantile 6 mois »



SDD = écart-type des différences  
r = coefficient de corrélation

Score système « PS » > Score système « fréquentiel »

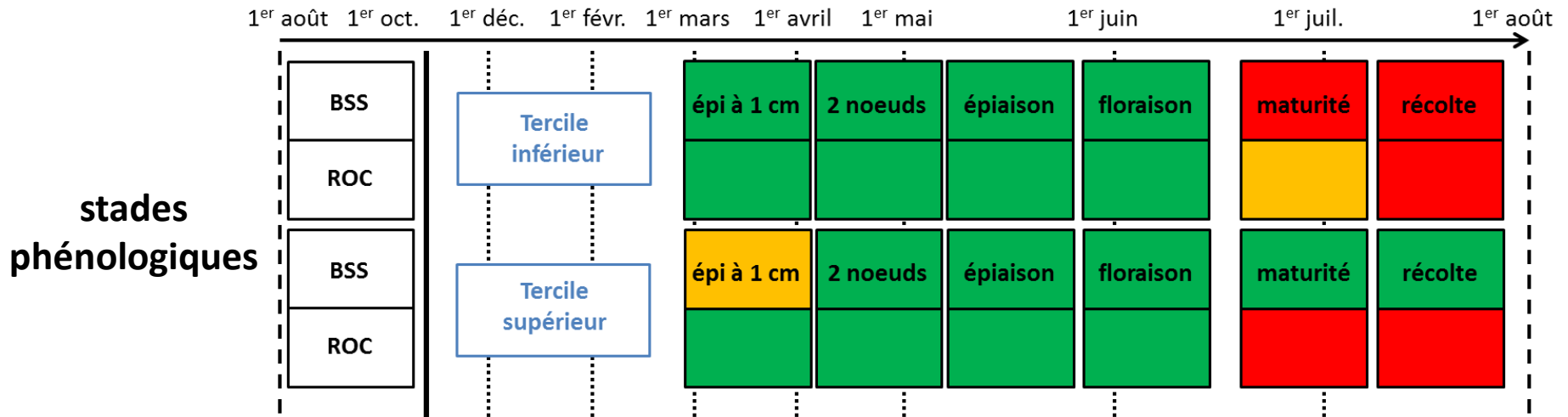
Score système « PS » ~ Score système « fréquentiel »

Score système « PS » < Score système « fréquentiel »



# Comparaison "PS" vs. "fréquentiel" (4)

- Evaluation probabiliste :



BSS = Brier Skill Score  
 ROC = Aire sous la courbe ROC

Score système « PS » > Score système « fréquentiel »  
 Score système « PS » ~ Score système « fréquentiel »  
 Score système « PS » < Score système « fréquentiel »

# En guise de conclusion

- Les modèles de Climat
  - Basés sur la modélisation des acteurs du système climatique
  - Couplage entre les différents acteurs toujours délicat
  - Complexité croissante des modèles et résolution de plus en plus fine
  - Nécessité de données de vérification
- L'utilisation des modèles de climat
  - Prévisions vs Projections
  - Les Incertitudes associées sont partie intégrante des informations produites
  - Outils et compétences très similaires en prévision et en projection (en dépit d'une utilisation différente)
  - Nécessité d'opérations de descente d'échelle pour aller vers les applications
  - Nécessité d'opérer des modèles d'impact en aval des modèles de climat
  - Prévision climatique première étape de l'adaptation aux changements futurs
  - Distinction entre les performances des modèles et l'utilité de l'information produite
  - De nombreuses applications déjà présentes ou en devenir

# Questions ?



*l'effet Papillon ...*



# Une nouvelle Europe du vin ?

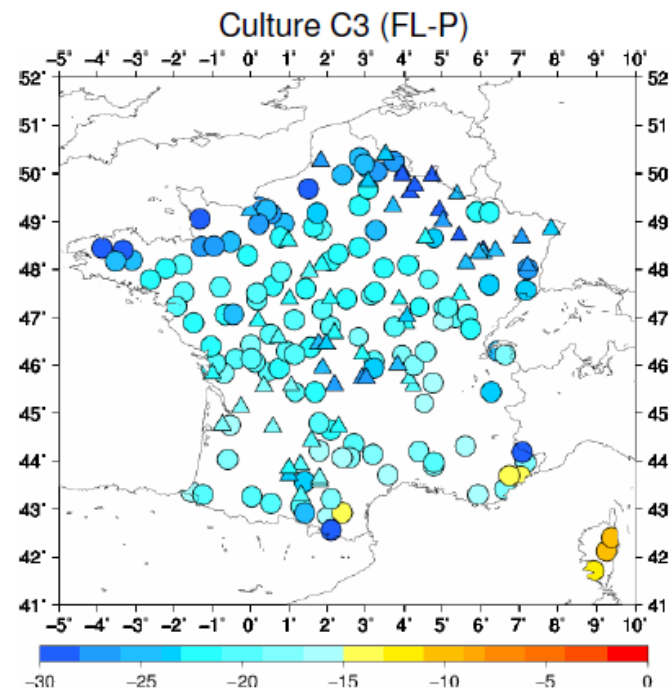
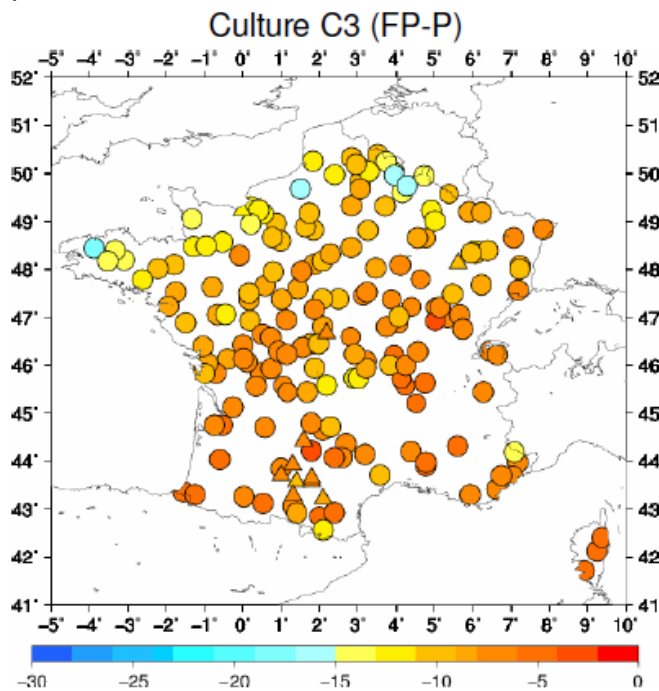


SYLVIE DAUDAL POUR SCIENCES ET Avenir

# Résultats

## ■ Partout en France

- **FP** : bon accord en toute saison de l'impact dérivé des divers modèles de climat sur
  - le **début de cycle et la date du LAImax (plus précoces)**
  - le **nombre de jours avec sol sec (SWI < 0.3)**, jusqu'à +30 j/an
  - le **nombre de jours avec sol à saturation (SWI > 1)**, jusqu'à -30 j/an
- **FL** : meilleur accord sur la **date du LAImax (plus précoce)** que sur le début de cycle, pour céréales et prairies



Date du  
LAImax  
des  
céréales