

# La machine climatique : bases physiques et principales caractéristiques du climat terrestre

## *Partie 2 : modèles et changement climatique*



J-Y Grandpeix (d'après J-L Dufresne)

CNRS / IPSL / LMD

[jyg@lmd.jussieu.fr](mailto:jyg@lmd.jussieu.fr)

<http://www.lmd.jussieu.fr/~jyg>

Textes de JLD : <http://www.lmd.jussieu.fr/~jldufres>

# PLAN

Introduction : contexte et enjeux.

Effet de serre

Physique du climat

Modèles

Changement climatique



Syukuro Manabe

*[Photo : La Météorologie]*

D'où le deuxième modèle (1967) qui représente la rétroaction vapeur d'eau et permet aux deux auteurs de déterminer une sensibilité climatique de 2.3 K pour un doublement de CO<sub>2</sub>.

En 1975, Manabe et Wetherald détermine la sensibilité climatique avec un modèle 3D de l'atmosphère, utilisant toujours l'ajustement convectif pour représenter la convection.

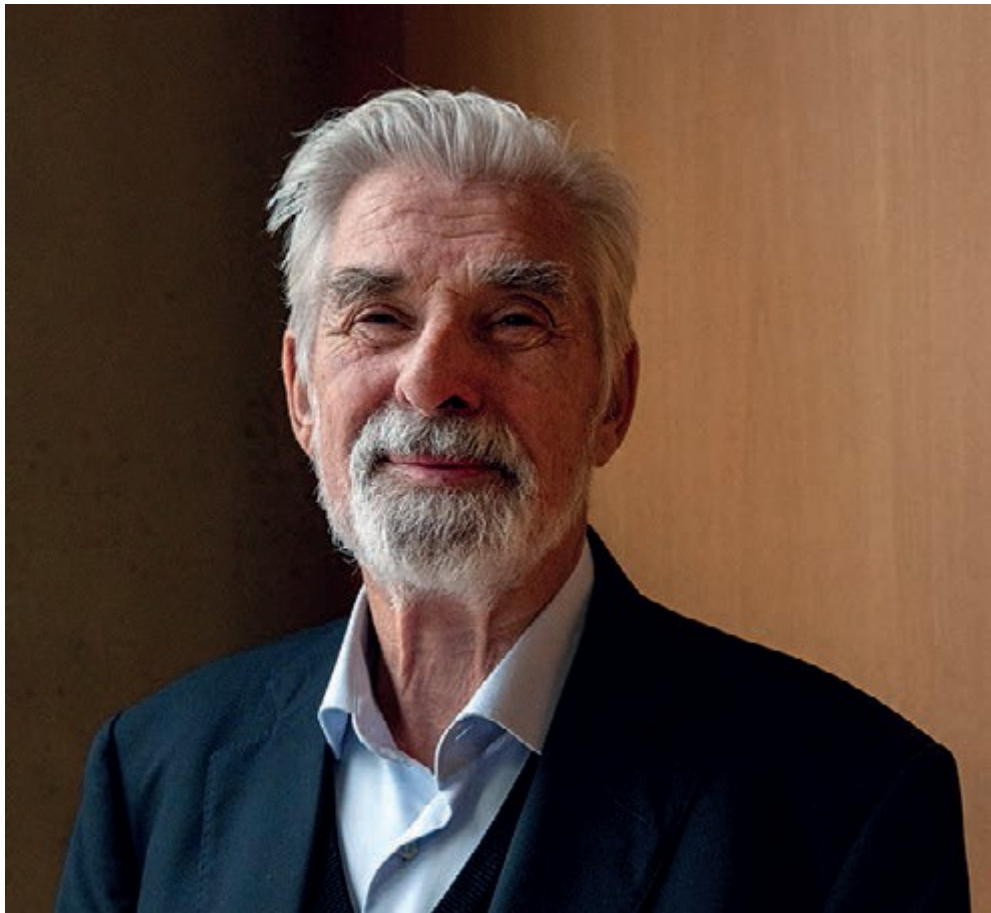
“Le génie de Manabe réside dans sa capacité d'abstraction, de faire sortir d'une situation Complexe les seuls aspects nécessaires pour que le modèle ressemble aux observations.”

(V. Balaji)

GFDL (Geophysical Fluid Dynamics Laboratory) :  
1959 ...

Premier modèle unidimensionnel en 1964 avec Strickler. Idée centrale que le chauffage de la surface conditionne les mouvements verticaux. Le gradient adiabatique humide (-6K/km) est imposé comme limite de  $dT/dz$  : si  $dT/dz$  devient plus négatif que -6K/km, il est ramené à cette valeur en mélangeant les couches d'atmosphère concernées : cet “ajustement convectif” représente tout l'effet des processus convectifs.

Ensuite, il réalise avec Wetherald que c'est l'humidité relative qui est constante dans les processus convectifs et non l'humidité spécifique.



Klaus Hasselmann

Klaus Hasselmann a créé l'Institut Max Planck de Hambourg dans les années 1960 au moment où il développait sa théorie stochastique du climat : il considérait que le climat était décrit par des variables dont le comportement résulte de la superposition de processus lents et stables et d'un bruit stochastique (la météorologie).

Il a développé une théorie de ce genre de système et en a tiré une méthode pour extraire les signaux révélateurs du changement climatique : la méthode des "optimal fingerprints". Cette méthode a été très utilisée pour la détection et attribution du changement climatique.

À part son rôle d'inventeur des "fingerprints", Hasselmann a eu un rôle très important dans le développement de la modélisation climatique en Allemagne et, d'une façon plus générale, dans l'animation scientifique.

*[Photo : La Météorologie]*

## Modélisation, climat et météorologie - 1

But de la modélisation climatique : simuler le climat terrestre et son évolution  
==> simuler l'état moyen des enveloppes superficielles (atmosphère, océan, végétation ...) ainsi que leurs variabilités spatiales et temporelles en tout point de la surface de la Terre.

## Modélisation, climat et météorologie - 2

### Stratégie :

Système très complexe ==> plusieurs approches :

- Modèle de Circulation Générale (GCM)
- Modèles d'échelle fine (LES) ou de méso-échelle (CRM)
- Modèles simples de climat

Système hétérogène ==> différents types de modèles pour différents composants du système climatique (atmosphère, océan, banquise, hydrologie, végétation, ...)

## Les modèles de circulation générale (GCMs)

Les modèles de circulation générale sont des outils permettant la simulation numérique de l'évolution au cours du temps de l'état de l'atmosphère (pour les AGCMs) ou de l'océan (pour les OGCMs).

Ils sont construits à partir de principes physiques.

Calage sur observations présentes → incertitudes

Manque d'observations dans certains domaines → incertitudes

====> question de la crédibilité et de la confiance.

Pour augmenter la confiance :

- paléo-climats
- autres planètes
- modèles variés (GCM, codes méso-échelle, modèles simples)
- "comprendre" comment le climat fonctionne (comparaison à des modèles simples, études de rétroactions).

La **philosophie générale** a été définie par Charney en 1950 : travailler avec des modèles incomplets et imparfaits et les améliorer pas par pas.

# Modélisation météorologique/climatique

- *un objet d'étude commun, des objectifs d'étude différents*  
même outil de modélisation de base, mais avec des approximations différentes pour répondre à des objectifs différents:
  - météo: problème de prévisibilité, de définition d'état initial
  - climat: problème de solution « asymptotique », de sensibilité à des perturbations
- *prévision météorologique / projection climatique*  
ou comment faire du climat quand on ne sait pas prévoir le temps à plus de quelques jours  
ex: variation d'un jour à l'autre / variation d'une saison à l'autre  
hypothèse de base de la climatologie: le climat est une superposition d'une composante déterministe et d'une composante purement aléatoire



# Modélisation météorologique/climatique

- *un objet d'étude commun, des objectifs d'étude différents*  
même outil de modélisation de base, mais avec des approximations différentes pour répondre à des objectifs différents:
  - météo: problème de prévisibilité, de définition d'état initial
  - climat: problème de solution « asymptotique », de sensibilité à des perturbations
- *prévision météorologique / projection climatique*  
ou comment faire du climat quand on ne sait pas prévoir le temps à plus de quelques jours  
ex: variation d'un jour à l'autre / variation d'une saison à l'autre  
hypothèse de base de la climatologie: le climat est une superposition d'une composante déterministe et d'une composante purement aléatoire. Affirmation peut-être critiquable.

## Les mondes des modèles

---

apparences

---

théories (physique, chimie, biologie)

---

mathématique

---

numérique

---

informatique

---

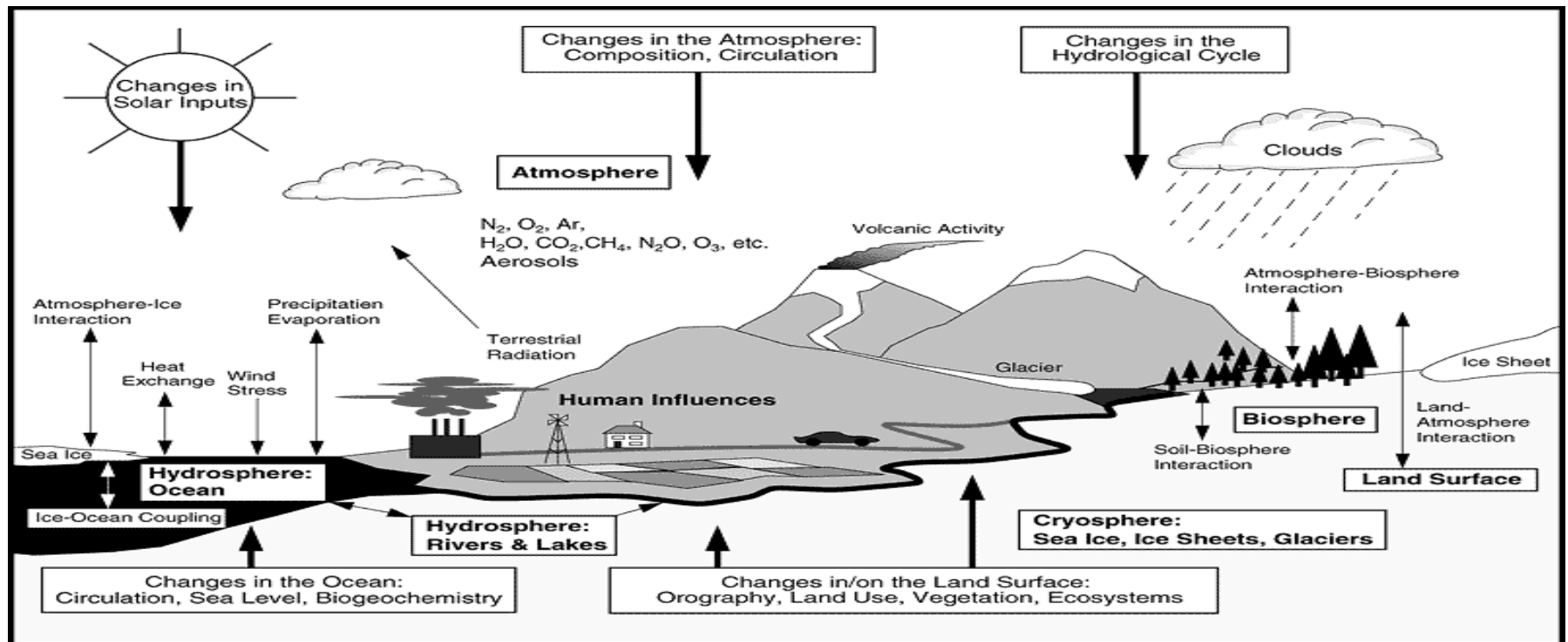
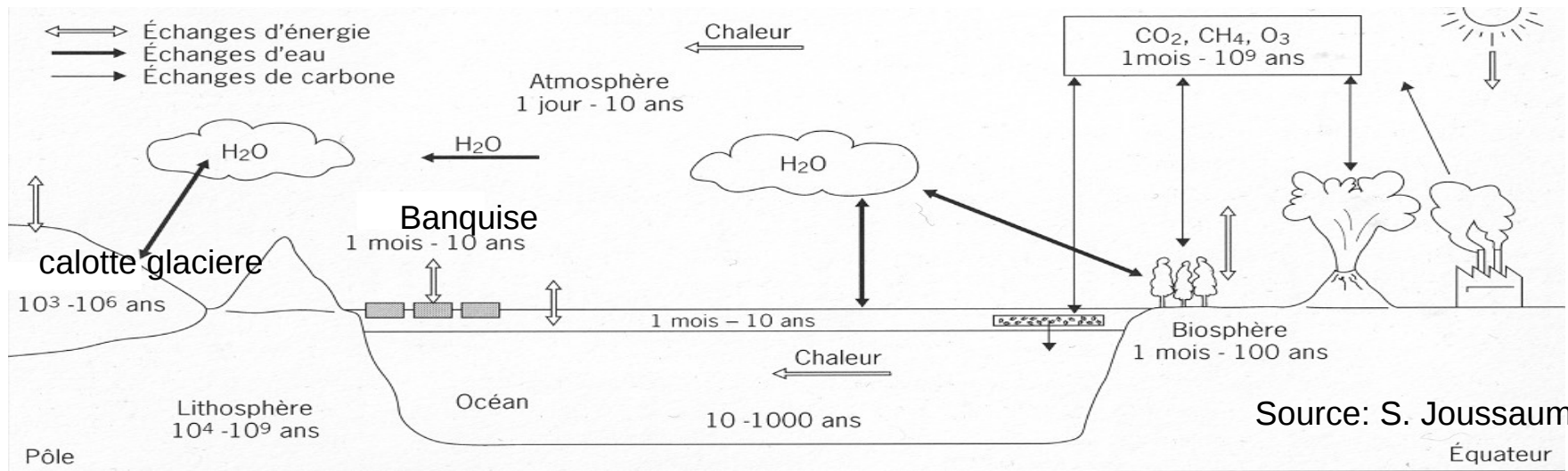
Mathématiques = langage commun

- nous considérons les représentations mathématique et numérique des modèles

**Modèle = ensemble d'équations**

- toujours essayer de mettre en évidence les liens avec les couches supérieures
- (Sous-)Système = modèle  $\oplus$  variables

# Modélisation du climat : mondes des apparences et physique



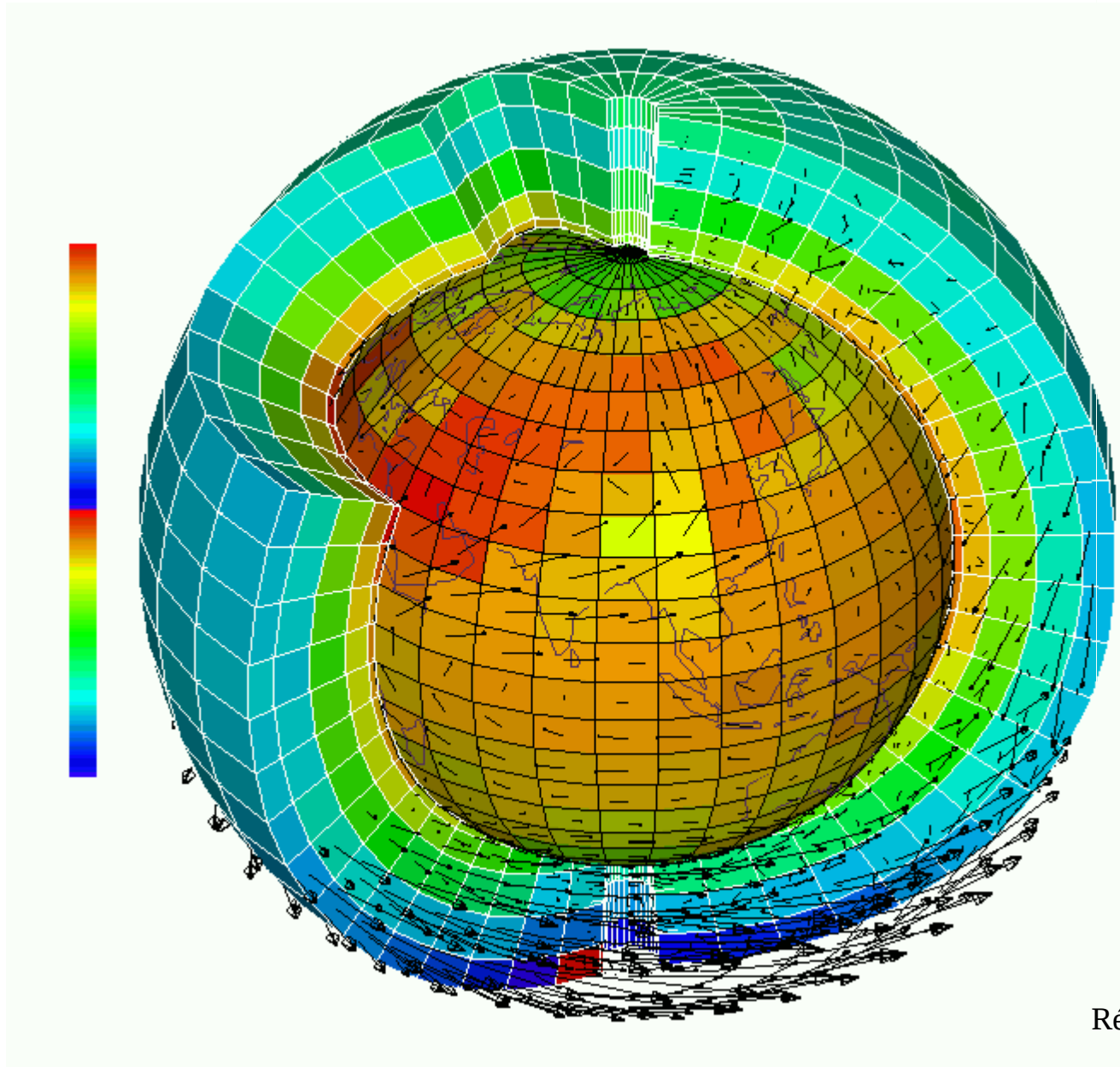
## Les deux concepts clefs de la modélisation climatique

- **Découpage** en modèles "élémentaires", ce qui permet (1) de travailler avec des modèles partiels de taille gérable, (2) de compliquer peu à peu le modèle ;
- **Couplage et raccordement** avec les dynamiques atmosphérique et océanique (et, un peu, entre ces modèles élémentaires).

La façon de voir de Charney semble fonctionner, vraisemblablement parce que les "dynamiques" sont les parties les plus solides, les plus théorisées, des modèles climatiques.

# Modélisation numérique 3D du climat

Discrétisation et résolution numérique



Réalisation: L. Fairhead,  
LMD/IPSL/CNRS

# Modèles de circulation générale (GCM)

## Equations de GCM atmosphérique (extraits)

### Equations dynamiques en coordonnées pression

$$\left\{ \begin{array}{l}
 \partial_t \vec{V} = \underbrace{-(\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V}}_{\text{transport}} - \underbrace{\omega \partial_p \vec{V}}_{\text{gravité}} - \underbrace{\nabla \Phi}_{\text{Coriolis}} - \underbrace{f \vec{k} \times \vec{V}}_{\text{Coriolis}} + \underbrace{\vec{S}_V}_{\text{Sources}} \\
 \vec{\nabla} \cdot \vec{V} + \partial_p \omega = 0 \\
 \partial_t q = -\vec{V} \cdot \nabla q - \omega \partial_p q + \underbrace{S_q}_{\text{Sources}}
 \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l}
 \Phi = gz \quad \text{geopotentiel} \\
 \omega = \partial_t p \quad \text{vitesse vert.} \\
 q = \text{humidité spécifique}
 \end{array} \right. \quad (1)$$

$\vec{S}_v$  et  $S_q$ : termes source déterminés par les **paramétrisations physiques** :

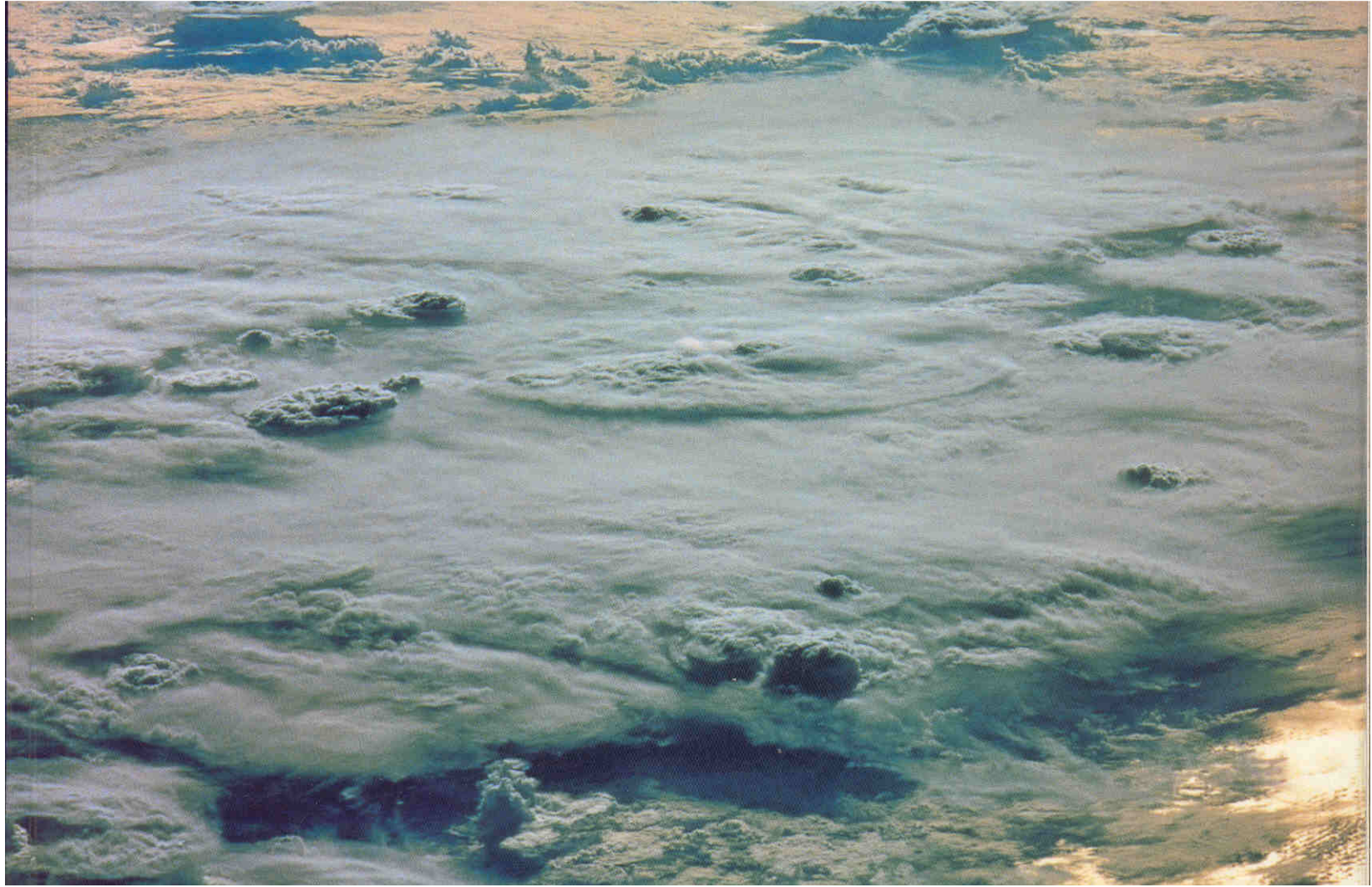
- couche limite planétaire
- convection profonde (Gros cumulus et cumulonimbus)
- nuages
- processus radiatifs
- orographie
- sol . . . . .

Parallèlement, le code informatique est divisé en deux parties :

La “dynamique” qui résoud les équations de la dynamique.

La “physique” qui contient toutes les paramétrisations





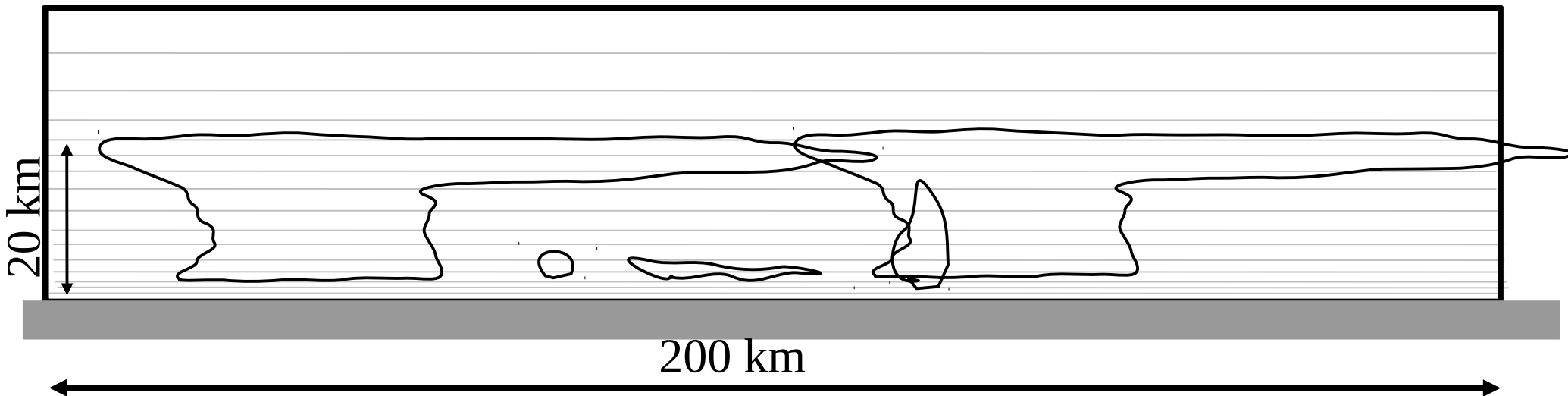
*Système convectif sur l'Afrique de l'ouest, vu de la Navette Spatiale*



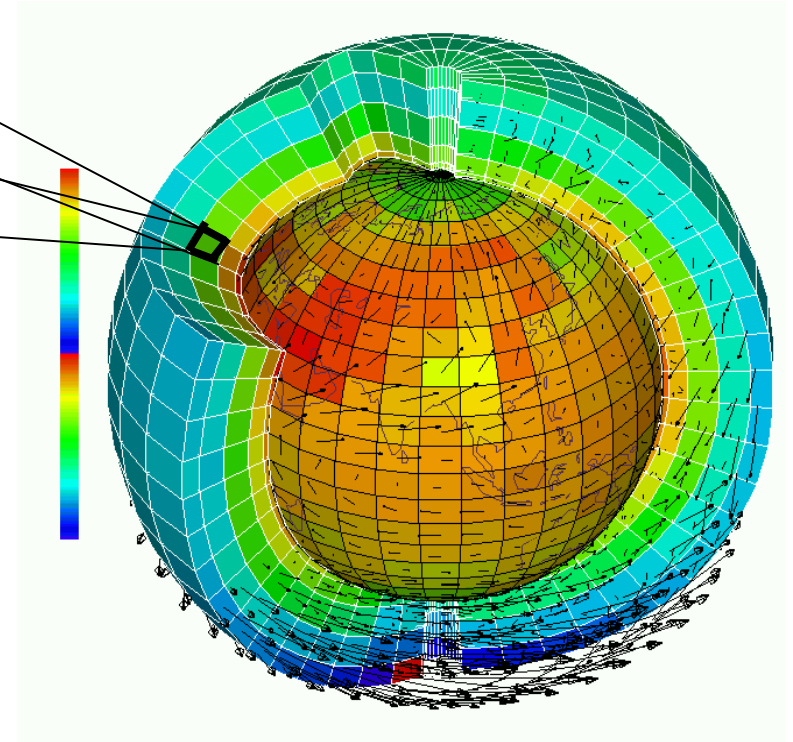
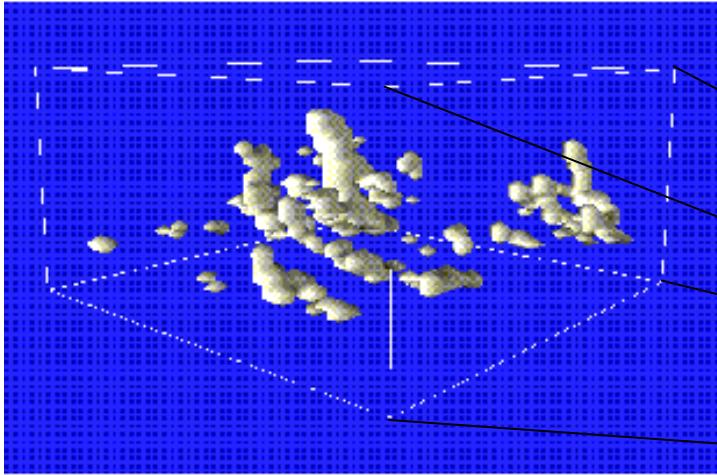
# Discrétisation

- Incrément temporel : de quelques minutes à une demi-heure, selon la technique d'intégration.
- Grille horizontale : maille allant de 100 à 300 km.
- Grille verticale : maille allant de 20m (ou moins) au niveau du sol, à quelques kilomètres dans la stratosphère.

## Colonne atmosphérique typique:

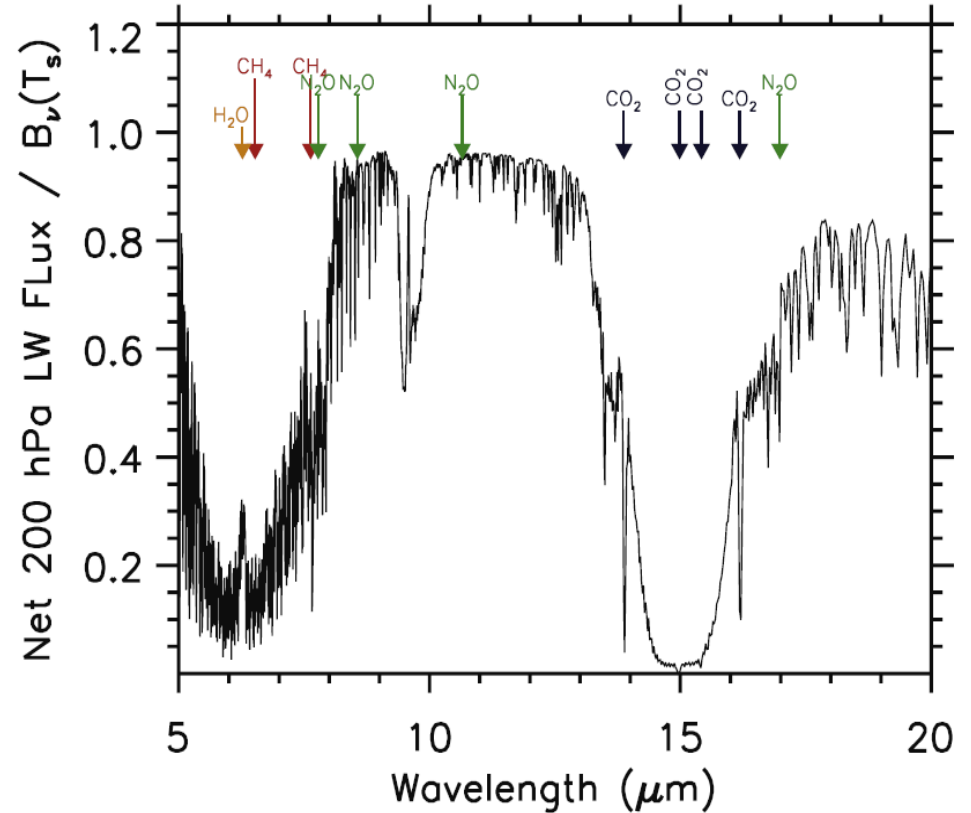
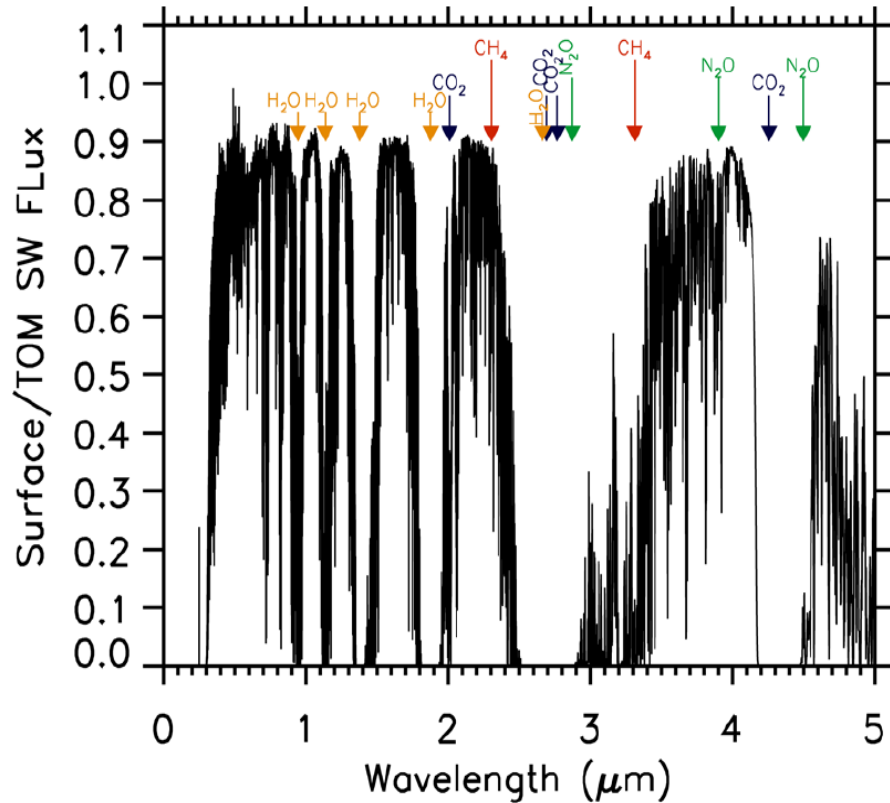


# Discrétisation



Modélisation des phénomènes sous-maillles,  
ou paramétrisation

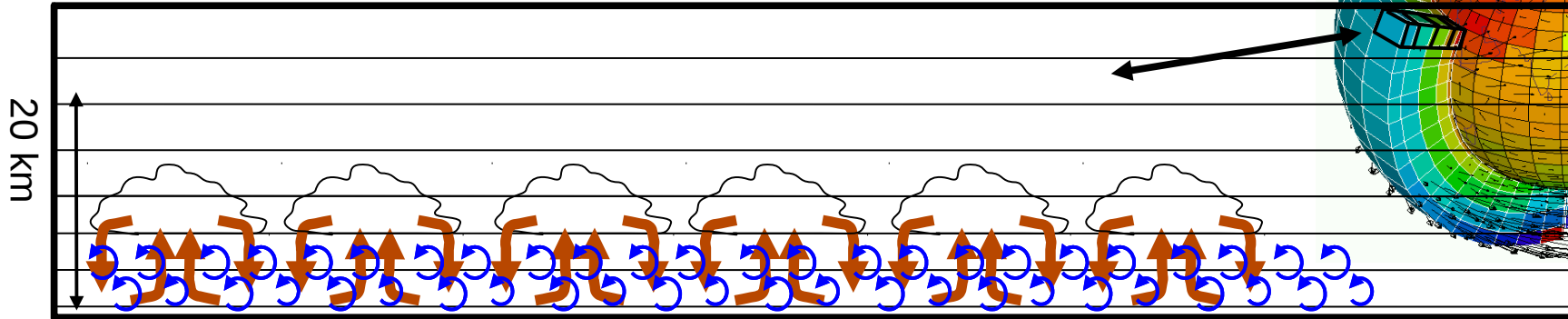
# Rayonnement



[Collins et al.,  
2006]

- Développement de modèles réduits, bandes larges, ajustés sur les résultats de modèles de références (modèle raie par raie)
- Modèles réduits : doivent être redéfinis pour les différentes planètes

Dans une colonne du modèle, il y a de la turbulence homogène et aussi des structures à l'échelle de la couche limite.

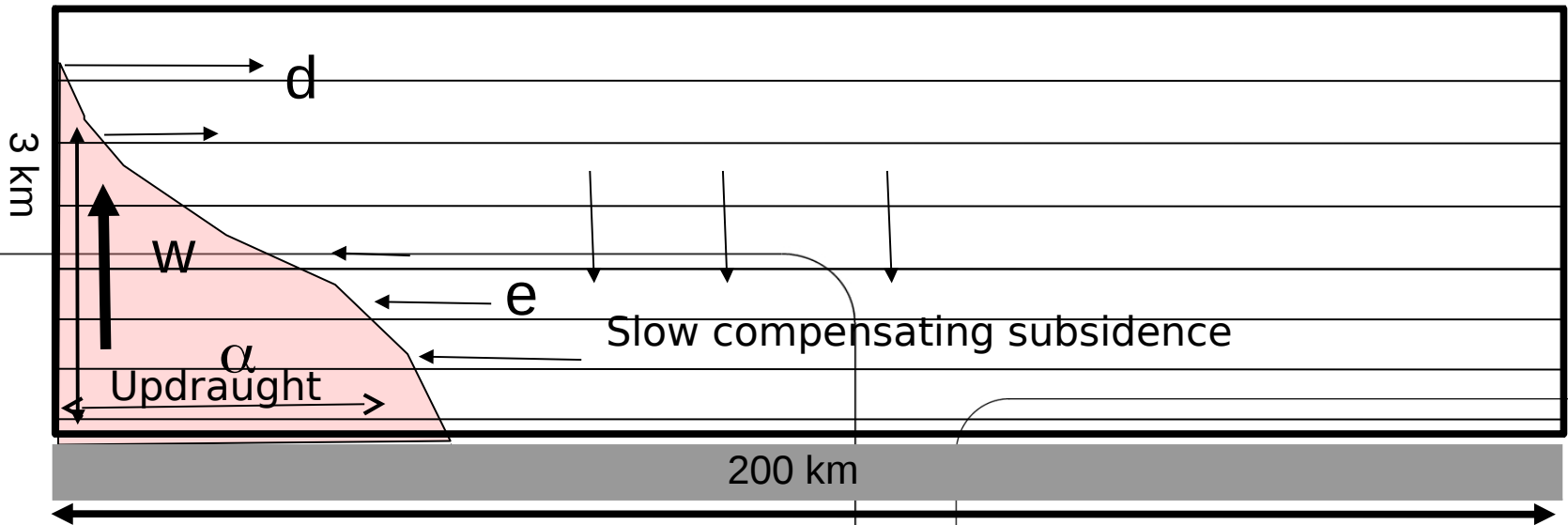


[F. Hourdin, C. Rio]

**“Le modele du thermique”:**

Each column is split in two parts:  
Ascending air from the surface and  
subsiding air around it.

The model represents a mean plume  
(the thermal) and a mean cloud.



**Internal variables of the parametrization :**

- $w$  = mean vertical velocity of ascending plumes
- $\alpha$  = fractionnal area covered by the updraughts
- $e$  = lateral input rate of air into the plume (entrainment)
- $d$  = output rate of air from the plume (detrainment)
- $q_a$  = concentration of constituent  $q$  in the updraughts

**Source term for the explicit equations :**

$$S_q = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial z} \overline{\rho w' q'} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial z} \left[ \rho K_z \frac{\partial q}{\partial z} \right] - \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial z} [f(q_a - q)]$$

**Turbulent Diffusion**

**Transport by the thermal plume model**

- Mass conservation

$$\frac{\partial f}{\partial z} = e - d \quad \text{where } f = \alpha \rho w$$

- Mass conservation of constituent  $q$

$$\frac{\partial f q_a}{\partial z} = e q - d q_a$$

- Equation of movement

$$\frac{\partial f w}{\partial z} = -d w + \alpha \rho B$$

- where  $B$  is the buoyancy :

$$B = g \frac{\theta_{va} - \theta_v}{\theta_v}$$

- and the complex part lies in the expression of  $e$  and  $d$  :

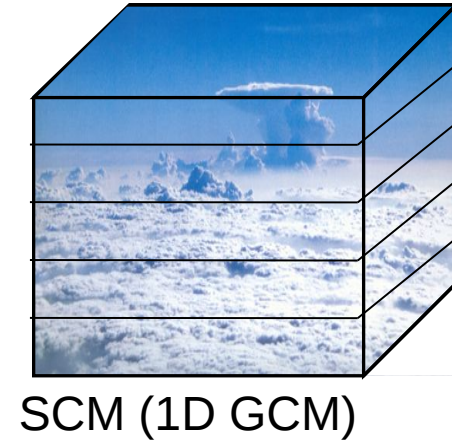
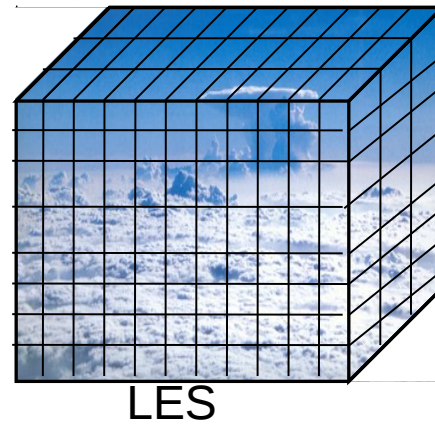
$$e = f \max \left( 0, \frac{\beta}{1+\beta} \left( a_1 \frac{B}{w^2} - b \right) \right)$$

$$d = \dots$$

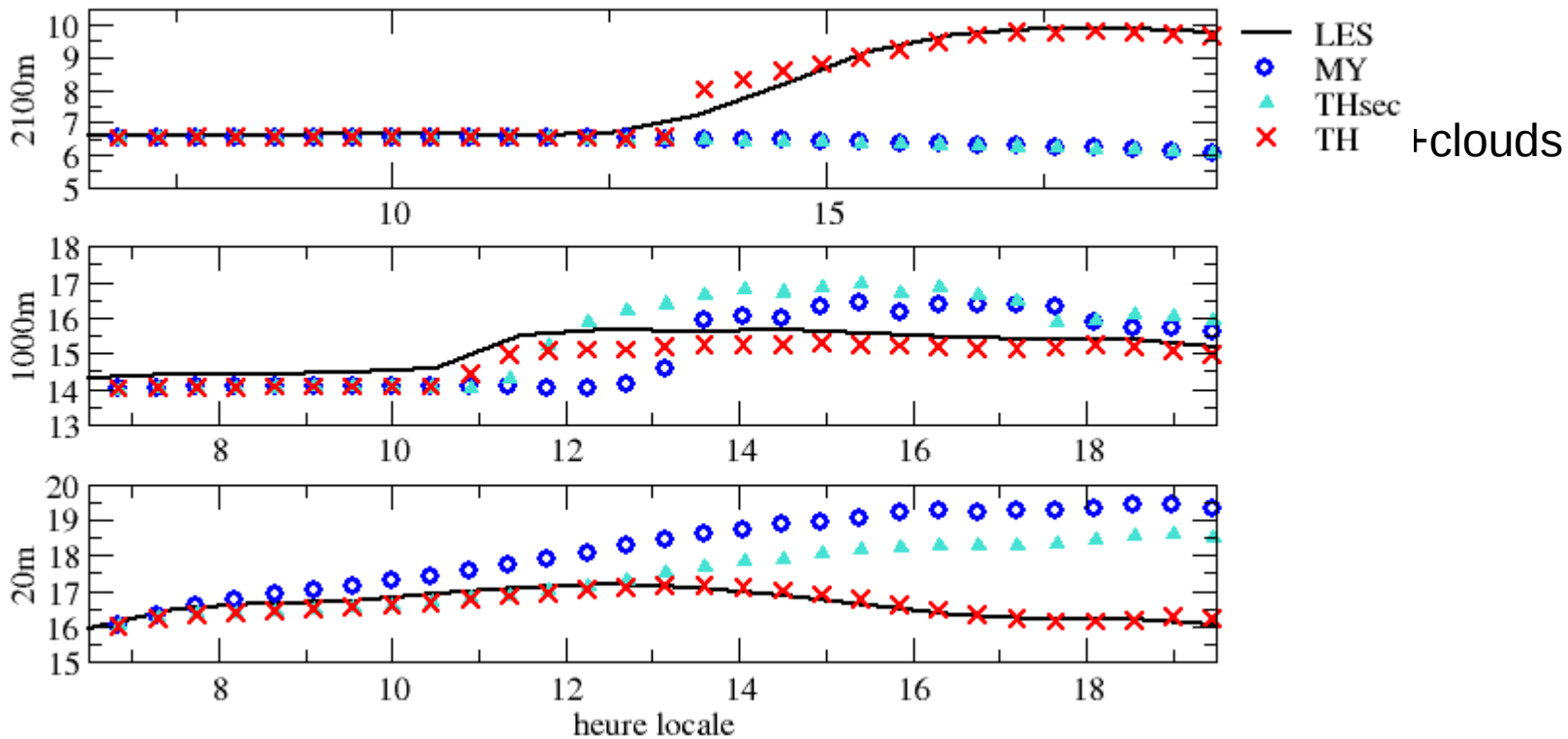
Etc ...

# 1D test of the cloudy thermal plume model

Continental diurnal cycle with cumulus  
ARM EUROCS case (US Oklahoma)  
Rio et al. 2008

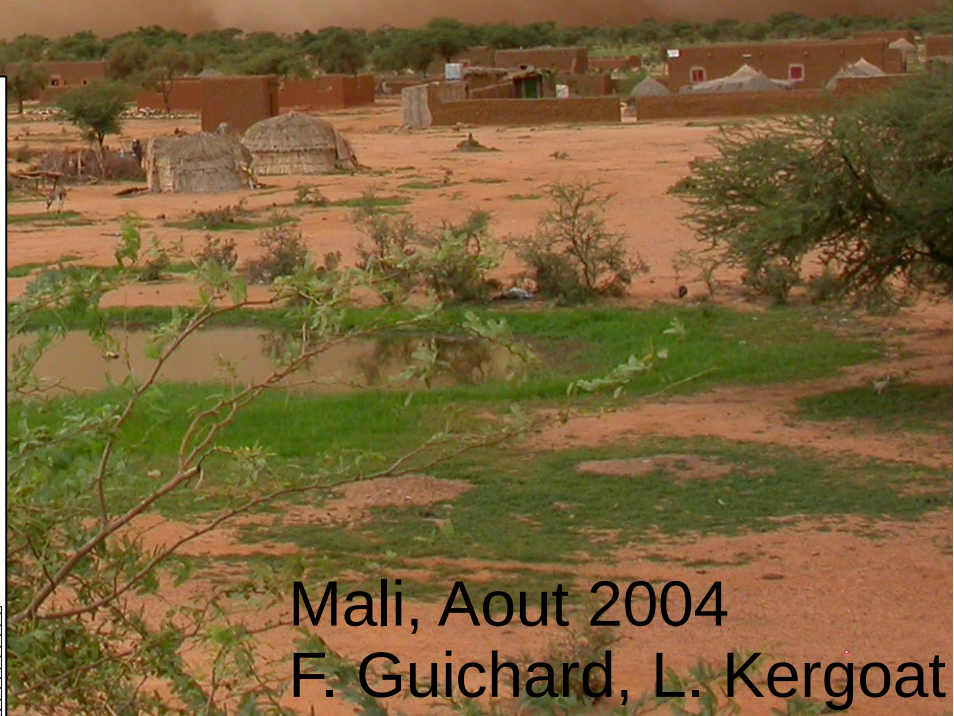
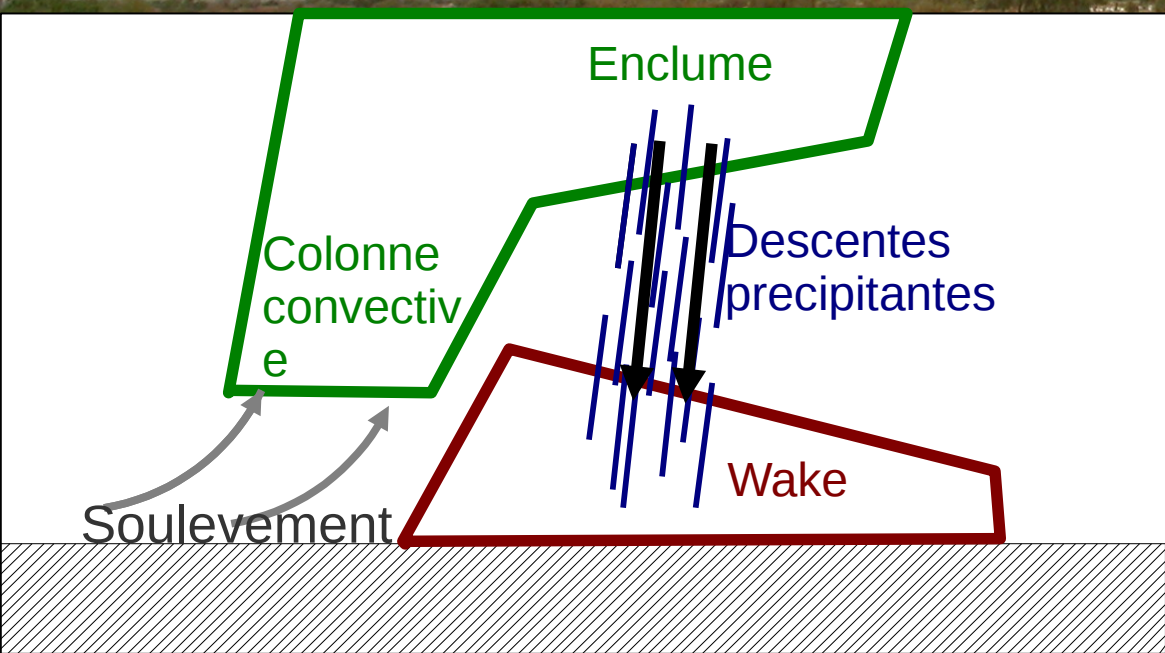
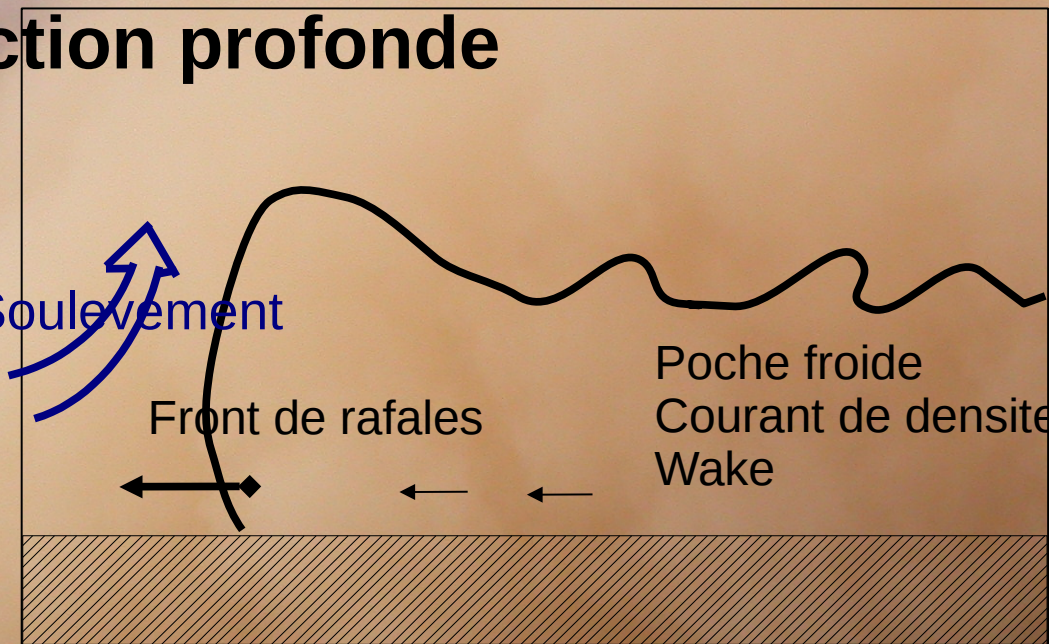


Specific humidity (g/kg)





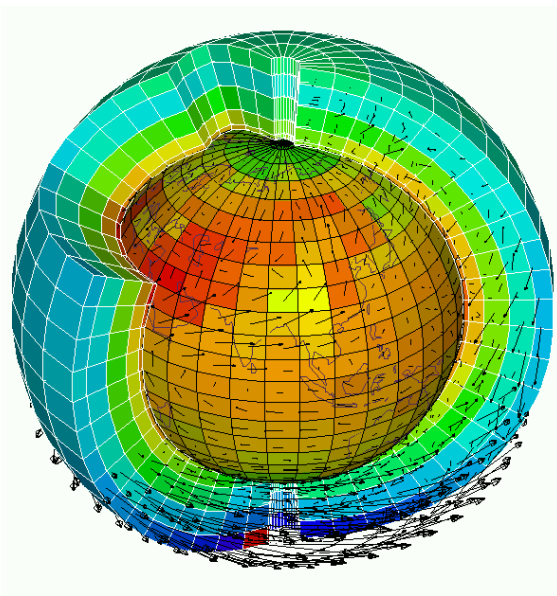
# Exemple de parametrisations : courants de densite et convection profonde



Mali, Aout 2004  
F. Guichard, L. Kergoat

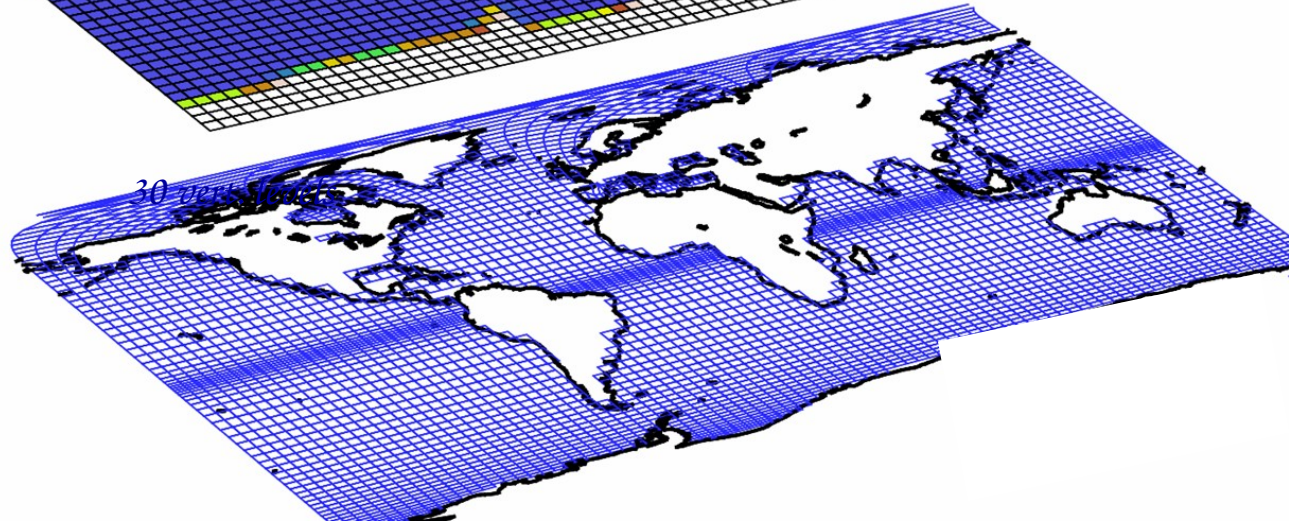
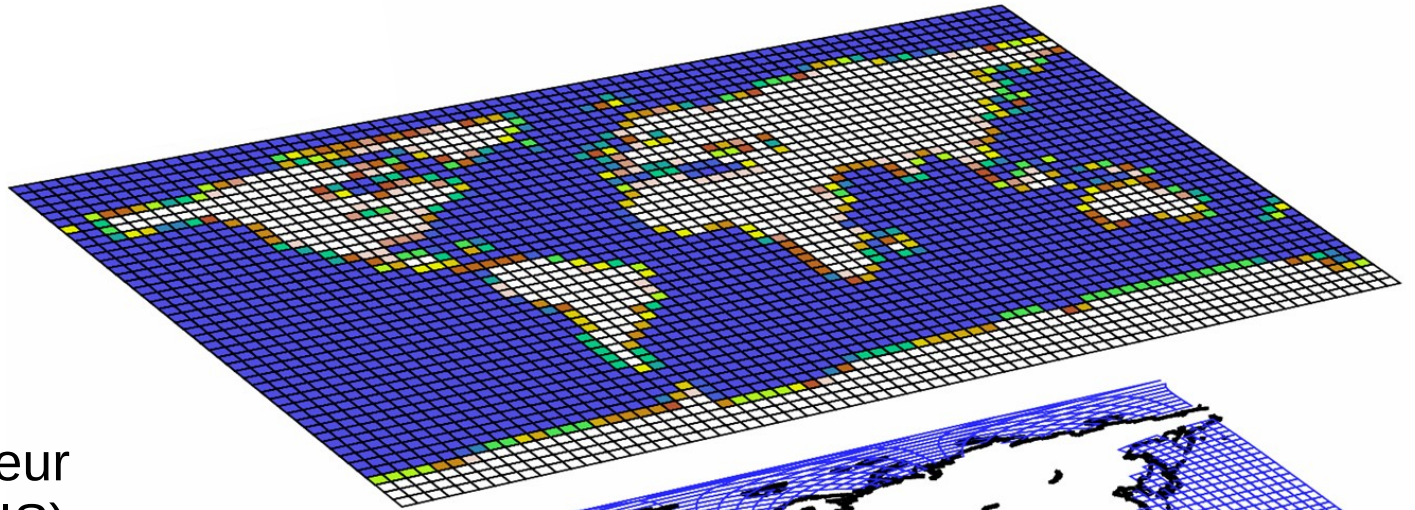


# Modèle climatique de l'IPSL



Atmosphère et surf. continentale  
(LMDZ - ORCHIDEE)

coupleur  
(OASIS)



Océan et glace de mer  
(ORCA-LIM)

Résolution:

Atm:  $3.75^{\circ} \times 2.5^{\circ}$  (~350 km)

Oce:  $2^{\circ} \times 2^{\circ}$



# Comment « tourne » un modèle?

- On part d'un ***état initial***, et on effectue une simulation avec des conditions aux limites (des forçages) fixes ou variables avec le temps

Méthode:

- **Réalisation de simulations numériques** avec différentes conditions aux limites (différents forçages) ou différentes conditions initiales
- **Analyses statistiques des résultats** de simulations
- **Exemple:** simulation de l'évolution du climat de 1850 à 2100 sous l'effet d'un accroissement des gaz à effet de serre

## PLAN

Introduction : contexte et enjeux.

Effet de serre

Physique du climat

Modèles

Changement climatique

Analyses de rétroactions et incertitudes

AR6 : résultats confirmés ou infirmés

Les nouveautés de l'AR6

# Bilan radiatif terrestre et retroactions

## Bilan radiatif terrestre et rétroaction - 1

- Bilan radiatif terrestre :

$$\begin{array}{ccccccc} R & = & \Phi_{SW,in} & - & \Phi_{SW,out} & - & \Phi_{LW,out} \\ W \ m^{-2} & & \text{solaire entrant} & & \text{solaire réfléchi} & & \text{ray. infra-rouge} \end{array}$$

(à l'équilibre,  $R = 0$ )

- Accroissement  $[CO_2]$  à température, humidité, nuages ... fixés
  - diminution  $\Phi_{LW,out}$
  - accroissement  $R$  (chauffage de la planète) =  $\Delta Q > 0$ .
  - l'énergie interne de la planète s'accroît progressivement :

$$\frac{d [En. tot.]}{dt} = \Delta Q$$

- Réponse de la planète au chauffage = accroissement de la température de surface  $T_S$ .
- Pour un accroissement  $\Delta T_S$  de  $T_S$ , le flux IR sortant  $\Phi_{LW,out}$  s'accroît de :

$$\Delta \Phi_{LW,out} = - \lambda \Delta T_S$$

(le signe "-" est introduit pour que les rétroactions positives soient associées à des  $\lambda$  positifs)

## Bilan radiatif terrestre et rétroaction - 2 : rétroaction de Planck

Changement uniforme sur la verticale de la température troposphérique :

$$\Delta T(z) = \Delta T_S.$$

Les modèles d'atmosphère s'accordent sur :

$$\Delta \Phi_{LW,out} (W m^{-2}) = 3.2 \Delta T_S (K)$$

d'où la rétroaction de Planck :  $\lambda_P = -3.2 W m^{-2} K^{-1}$  ce qui est très proche de ce que donne un corps noir à l'équilibre :

$$\left\{ \begin{array}{l} \Phi_{LW,out} = \sigma T_E^4 \\ T_E = 255K \end{array} \right. \longrightarrow \begin{array}{l} \frac{\Delta \Phi}{\Delta T_E} = 4\sigma T_E^3 \\ = 3.8 W m^{-2} K^{-1} \end{array} \quad (1)$$

### Bilan radiatif terrestre et rétroaction - 3

- D'une façon plus générale on va écrire la variation du bilan radiatif :

$$R = \Delta Q + \lambda \Delta T_S \quad (\lambda < 0)$$

où  $\lambda (W m^{-2} K^{-1})$  désigne la force de rétroaction due à divers processus.

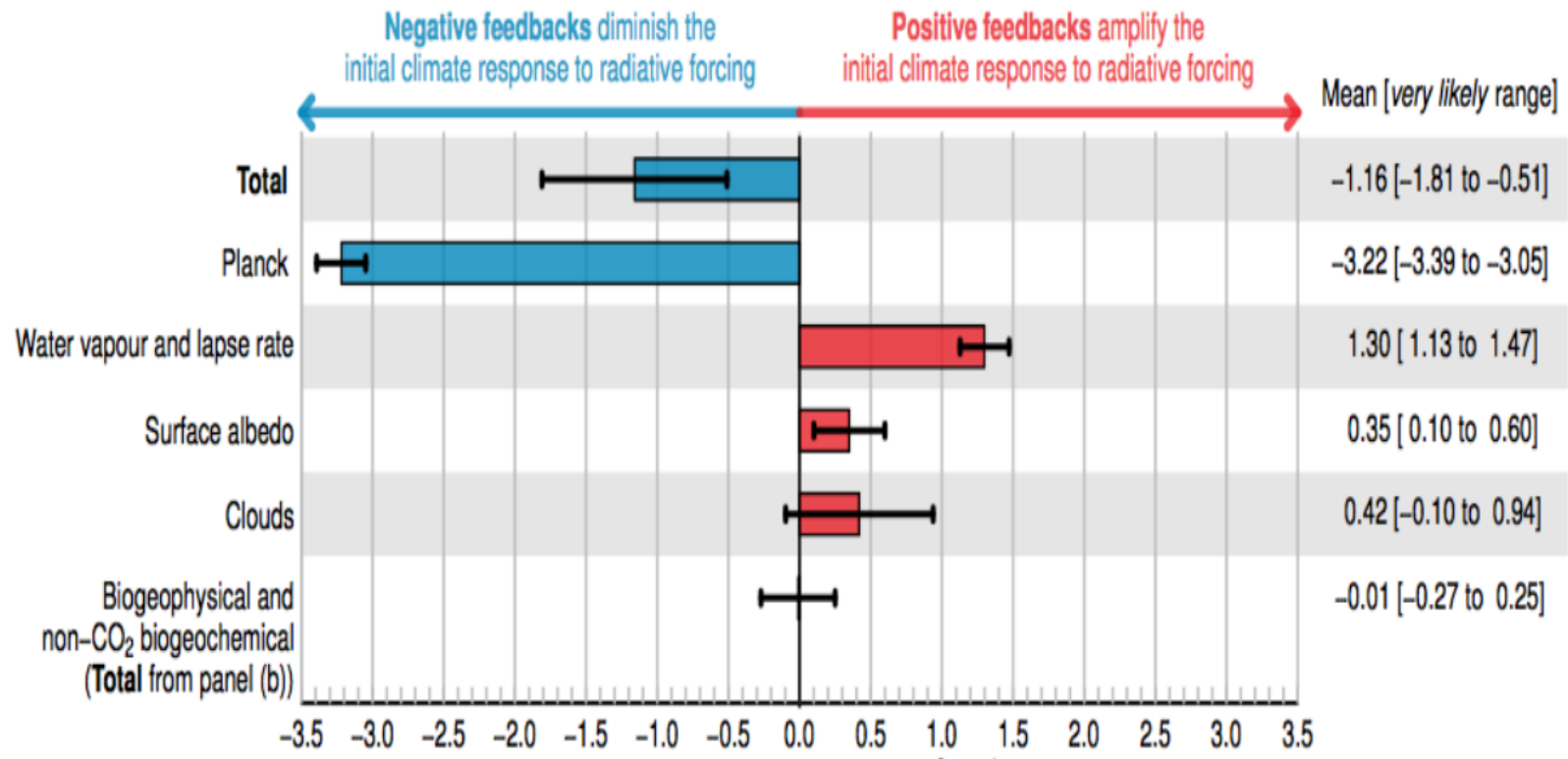
Le système part d'un bilan déséquilibré ( $R = \Delta Q$ ) et évolue progressivement vers un état d'équilibre :

$$R = 0 \quad \Longrightarrow \quad 0 = \Delta Q + \lambda \Delta T_S$$

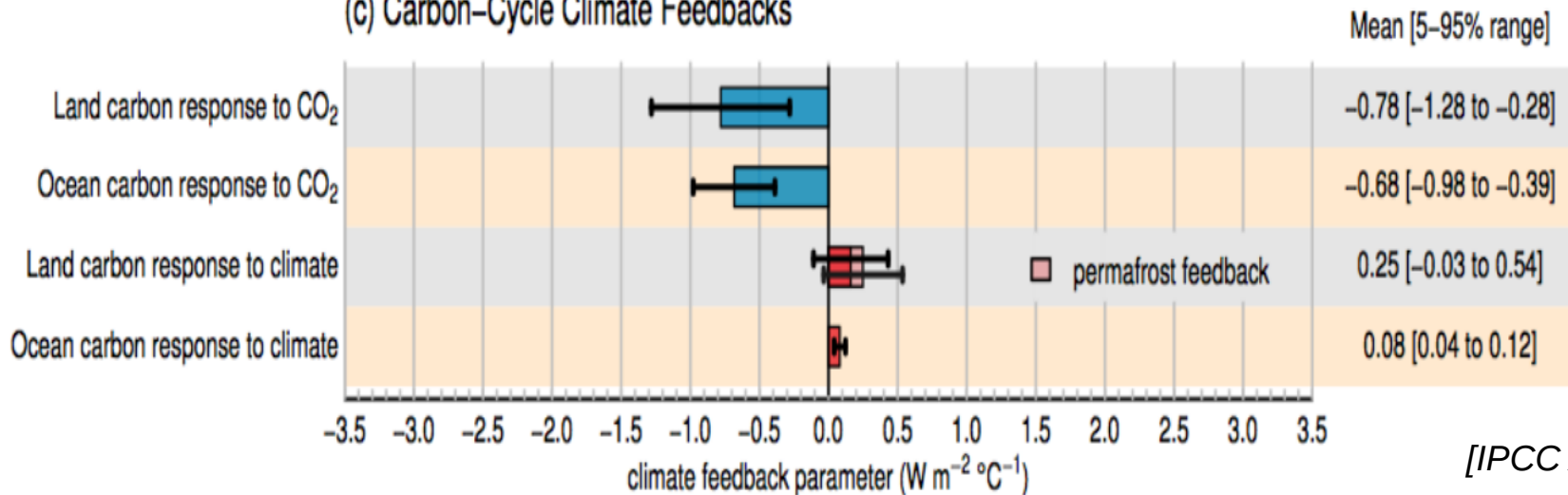
- Processus contribuant à la force de rétroaction  $\lambda (W m^{-2} K^{-1})$  :
  - Planck (pour  $\Delta T$  uniforme dans l'atmosphère).  $\lambda_P = -3.2 W m^{-2} K^{-1}$
  - vapeur d'eau :  $\lambda_{WV} \simeq 1 W m^{-2} K^{-1}$
  - albedo :  $\lambda_A \simeq 0.2$  à  $0.5 W m^{-2} K^{-1}$
  - nuages :  $\lambda_C \simeq 0$  à  $1.2 W m^{-2} K^{-1}$
- Et :  $\lambda = \lambda_P + \lambda_{WV} + \lambda_A + \lambda_C$

# Where does the uncertainty in warming come from?

(a) Feedbacks in the Climate System



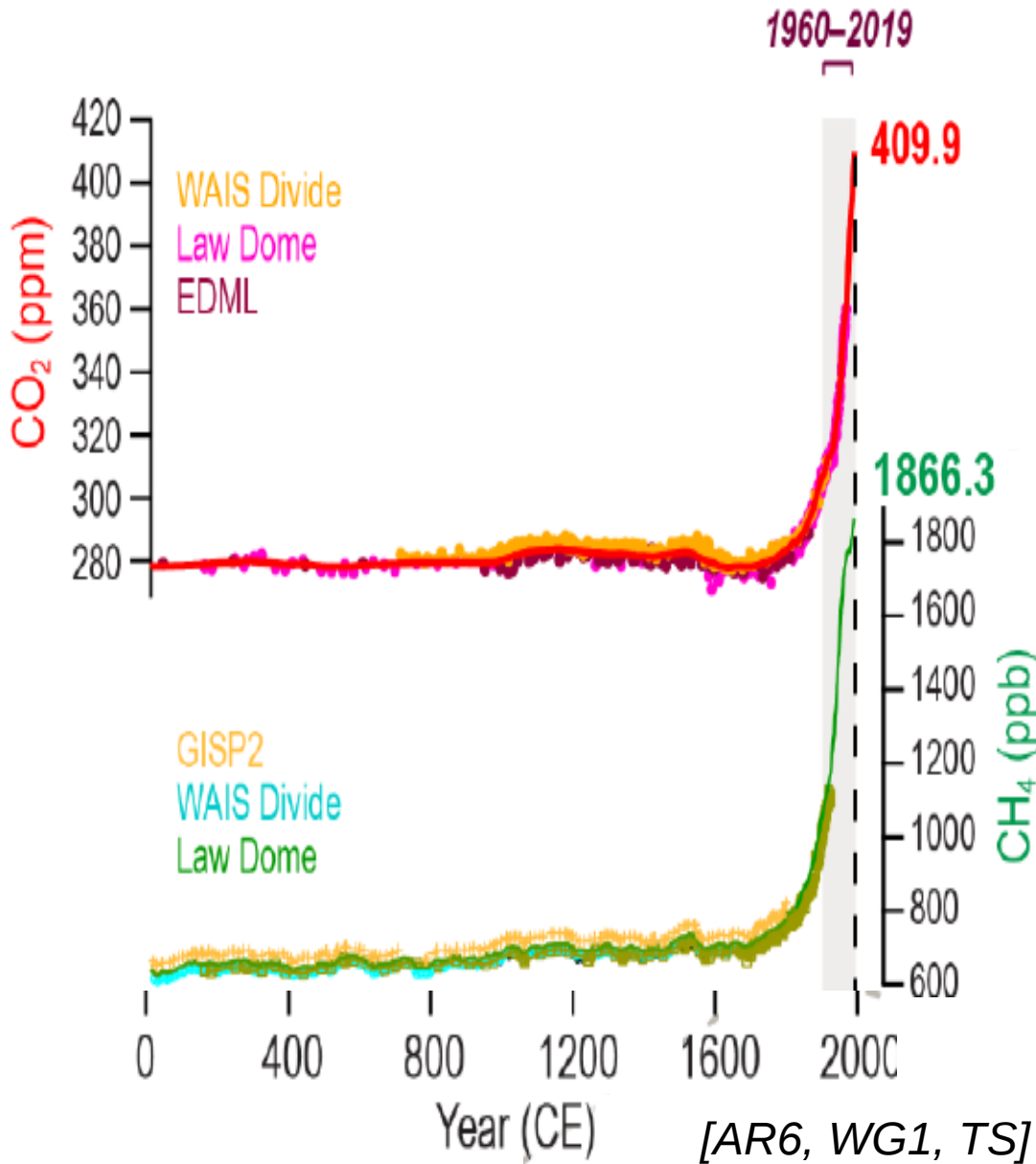
(c) Carbon-Cycle Climate Feedbacks



AR6 : résultats confirmés ou infirmés



# Les activités humaines perturbent le bilan d'énergie de la Terre

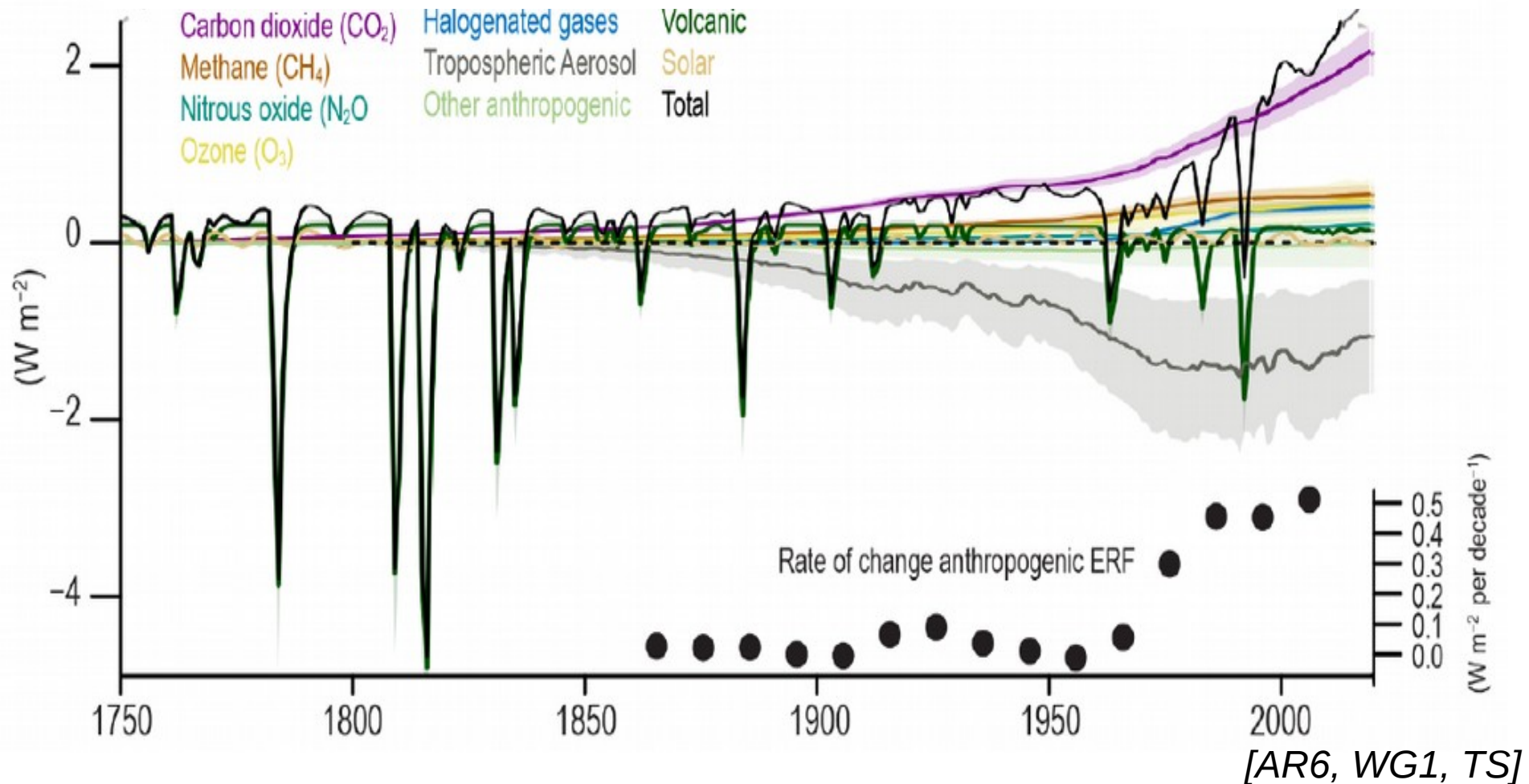


Les principaux gaz à effet de serre sont H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, O<sub>3</sub>, ...

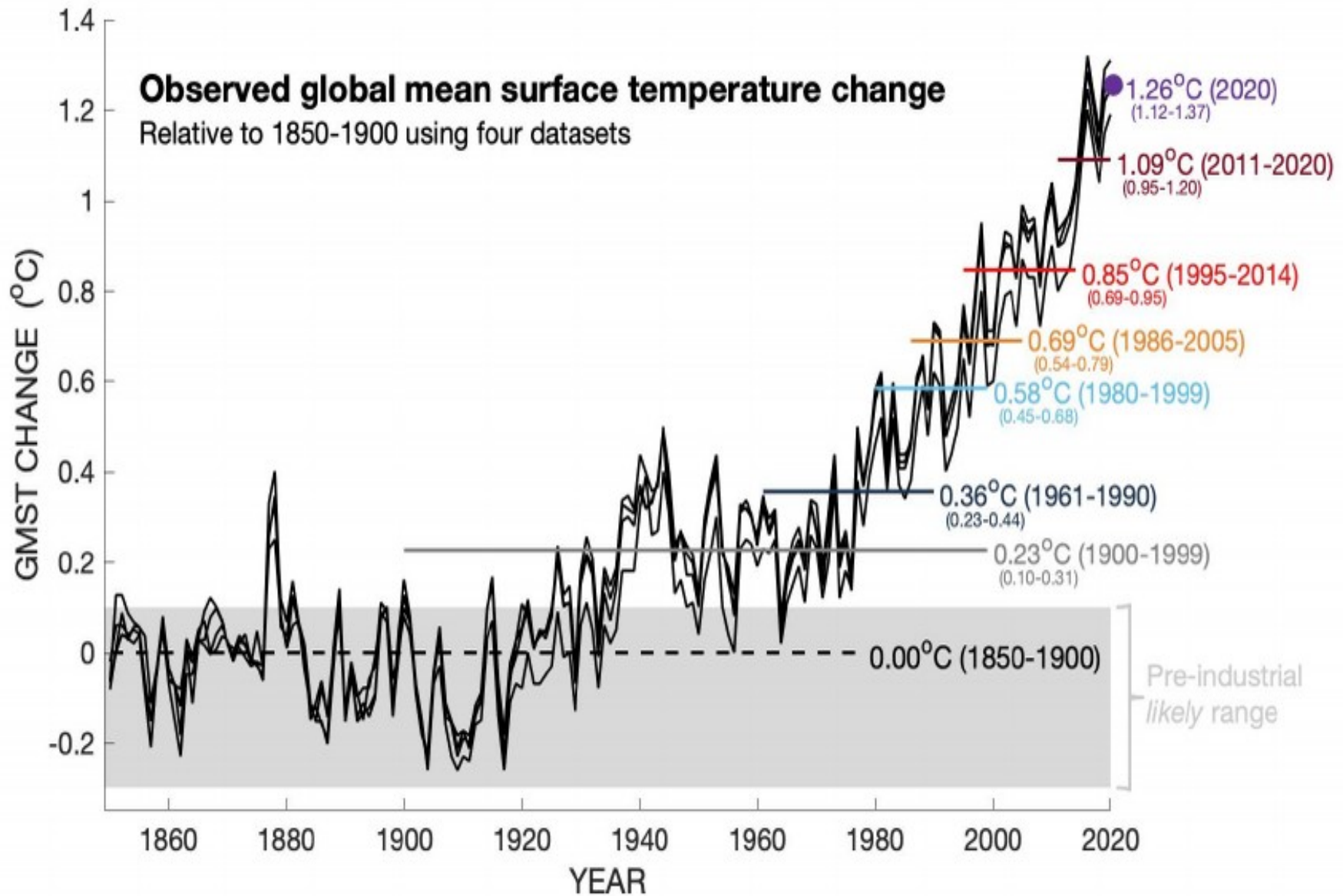
# Les activités humaines perturbent le bilan d'énergie de la Terre

Les principaux gaz à effet de serre sont  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{O}_3$ , ...

et ces perturbations sont plus élevées que les perturbations naturelles



# La température de la surface de la Terre augmente

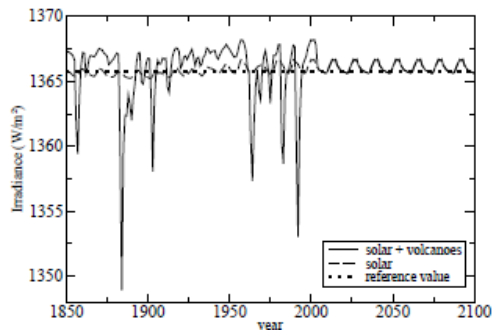


# Des modèles pour simuler et comprendre le climat

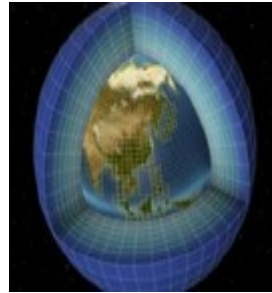
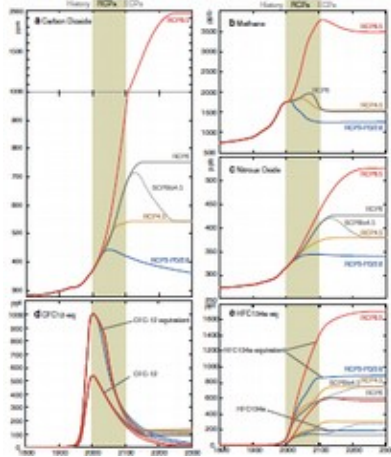
## Le modèle "Système Terre" de l'IPSL

### Forçages naturels et anthropiques

#### Soleil et volcans



#### Gaz à effet de serre ou chimiquement actifs

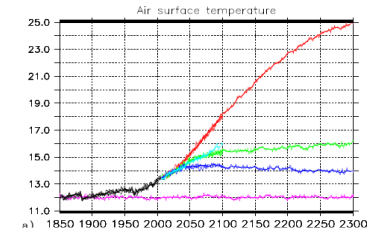


### Modèle de climat

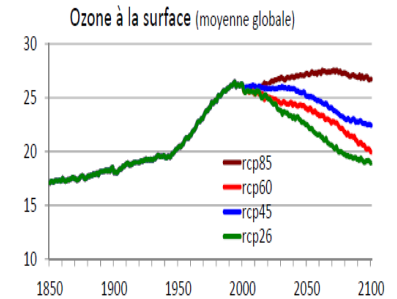
- Représentation 3D de l'atmosphère l'océan glaces de mer et surfaces continentales (couplages de différents modèles)
- Représentation du couplage avec les cycles biogéochimiques dans l'atmosphère l'océan et le continent

### Résultats

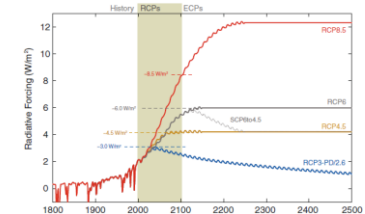
#### Changement climatique



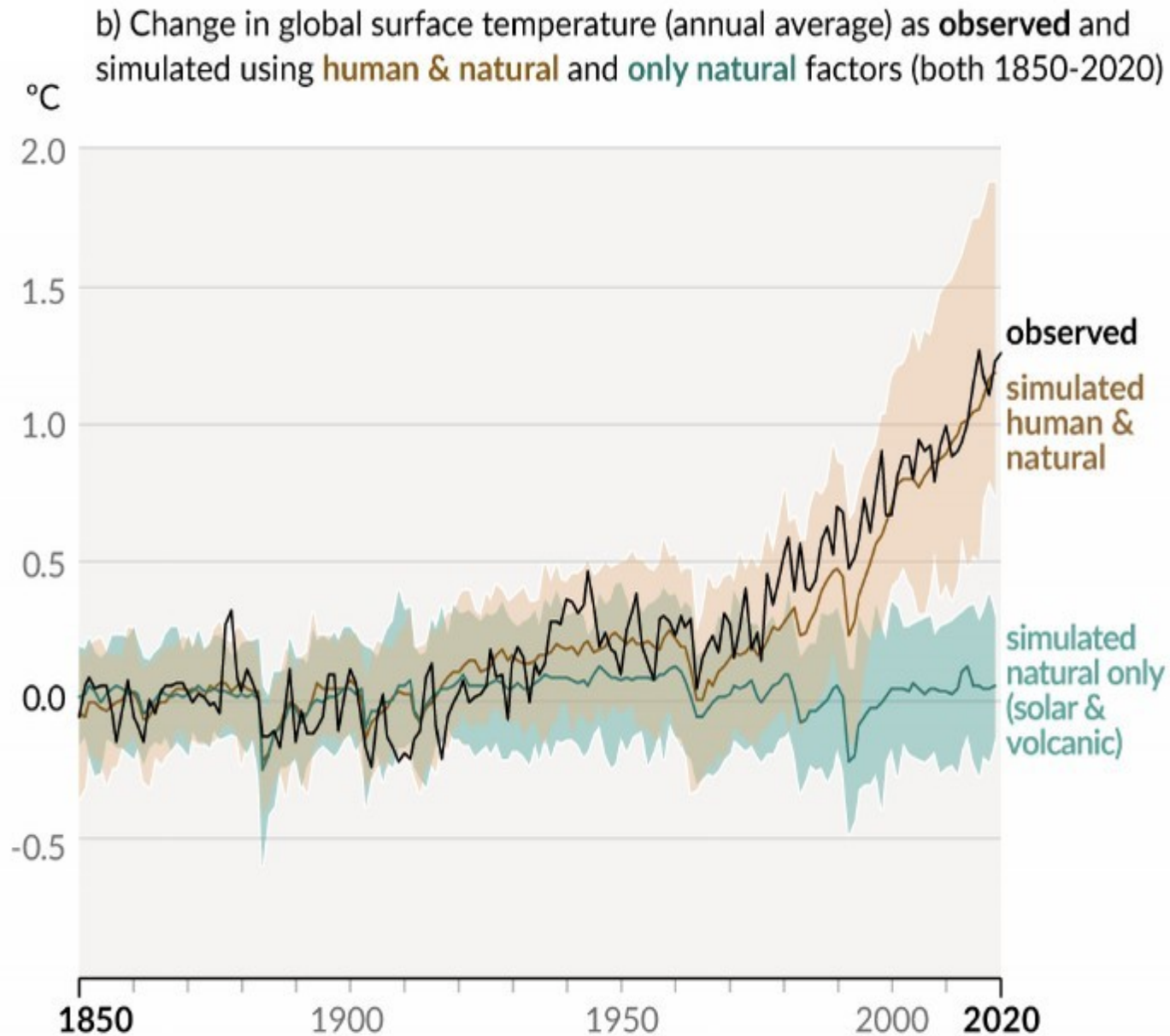
#### Composition de l'atmosphère



#### Forçage radiatif

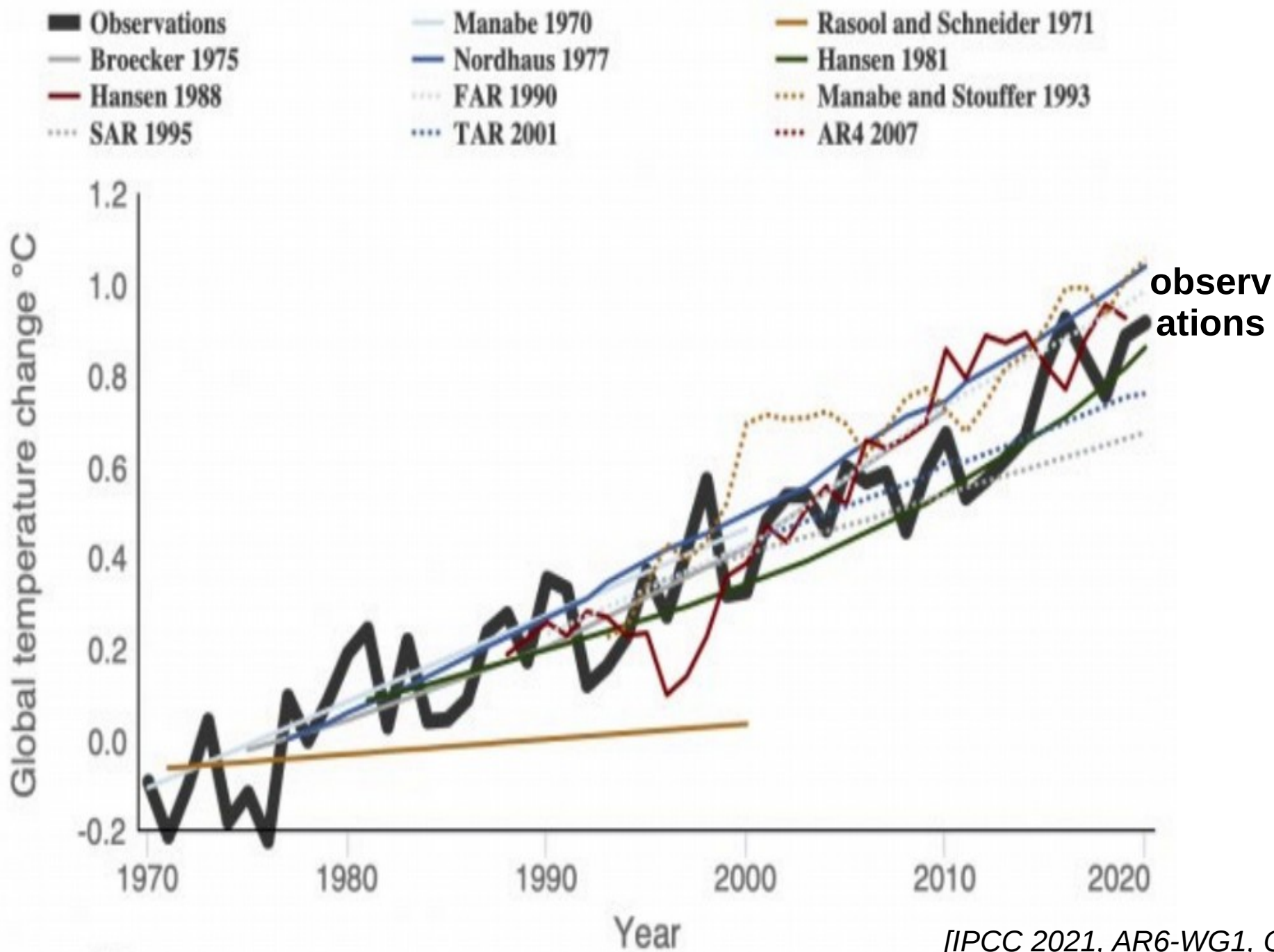


# et expliquer pourquoi la température de la Terre augmente

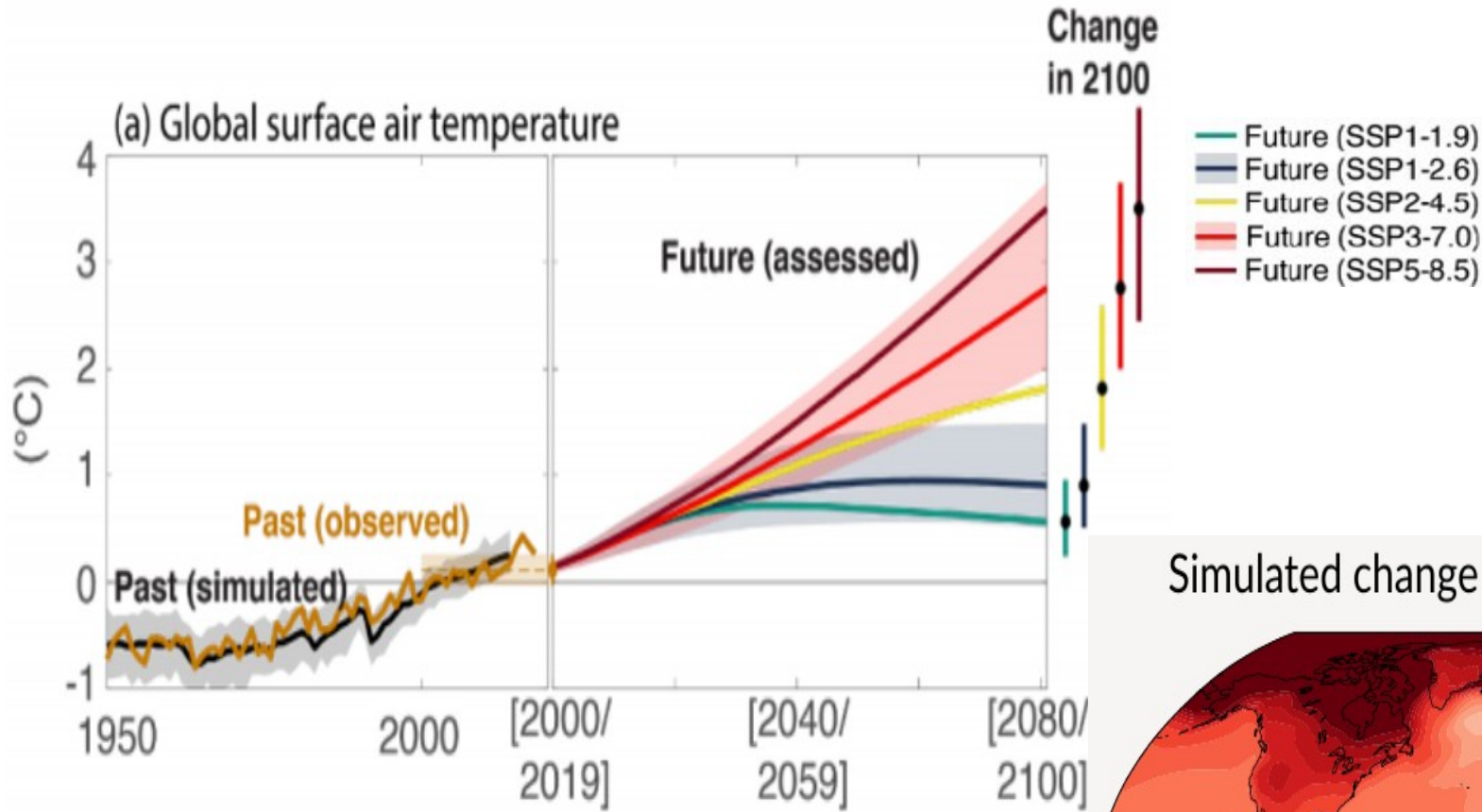




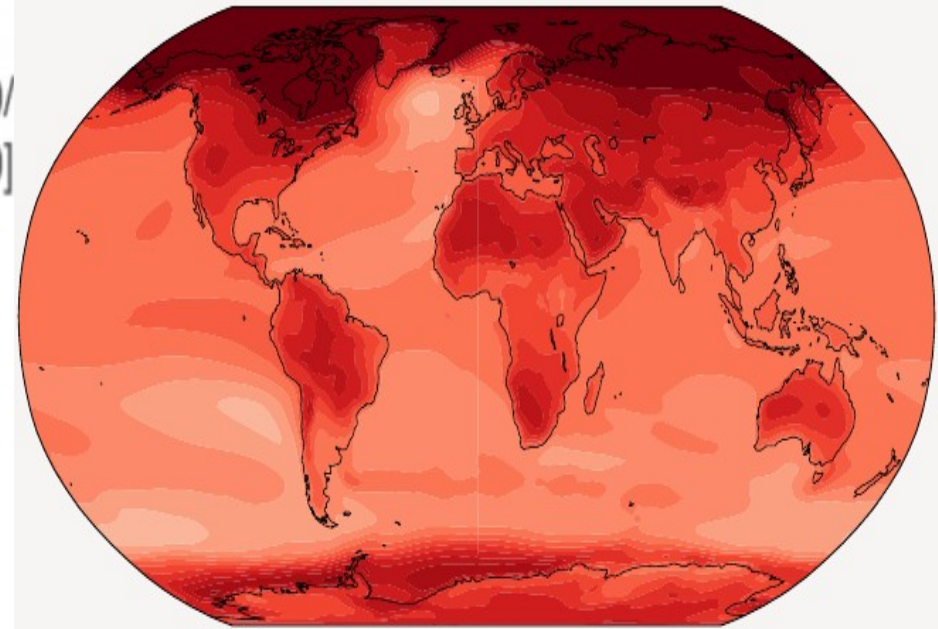
# Un réchauffement prévu...



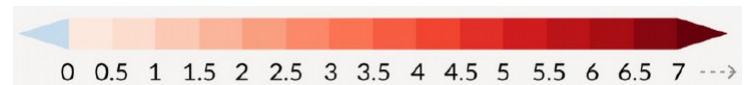
# et qui peut évoluer de façon très différente



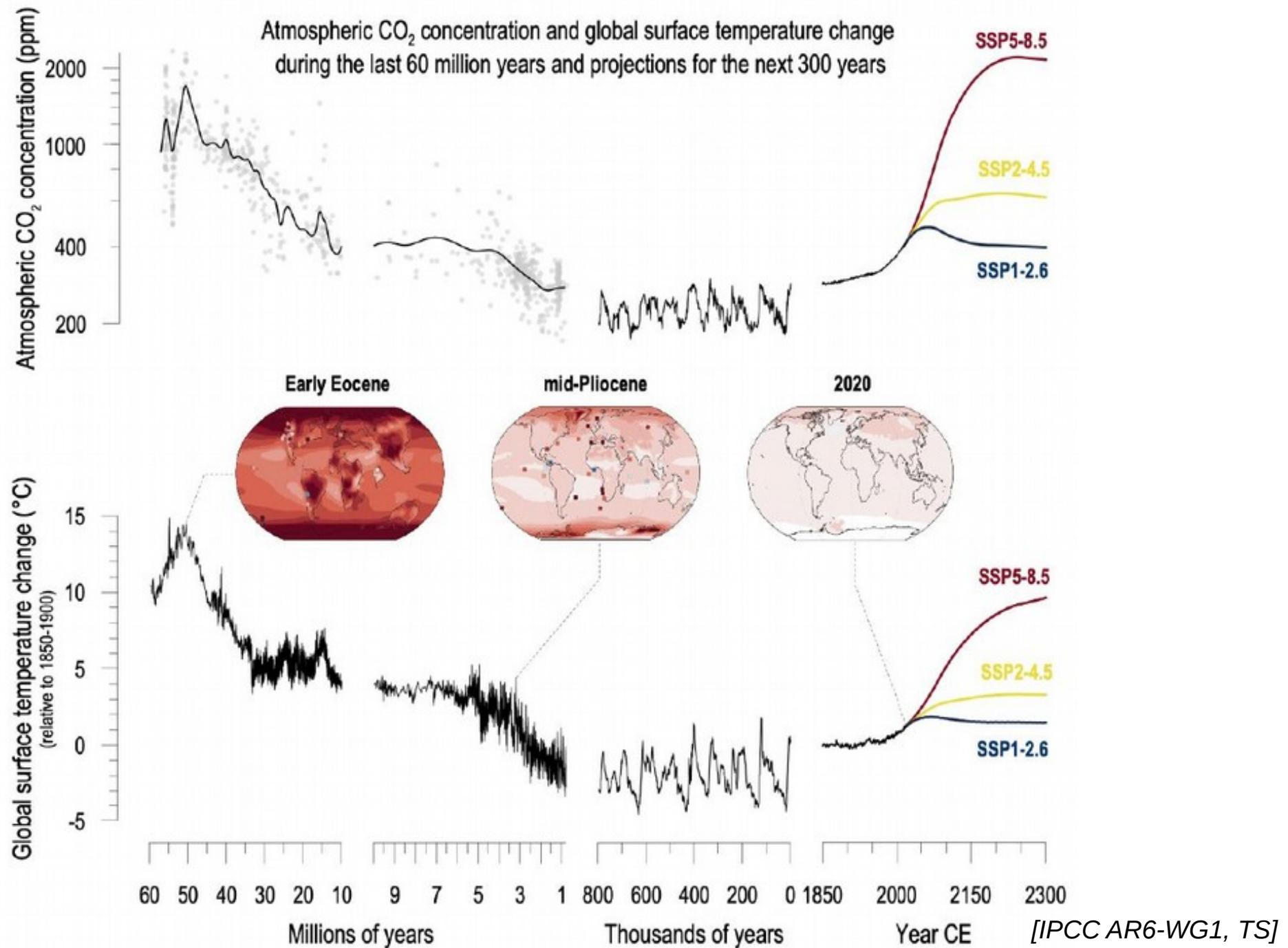
Simulated change at 4 °C global warming



[IPCC AR6-WG1, TS]



# Des changements importants au regard de ceux passés

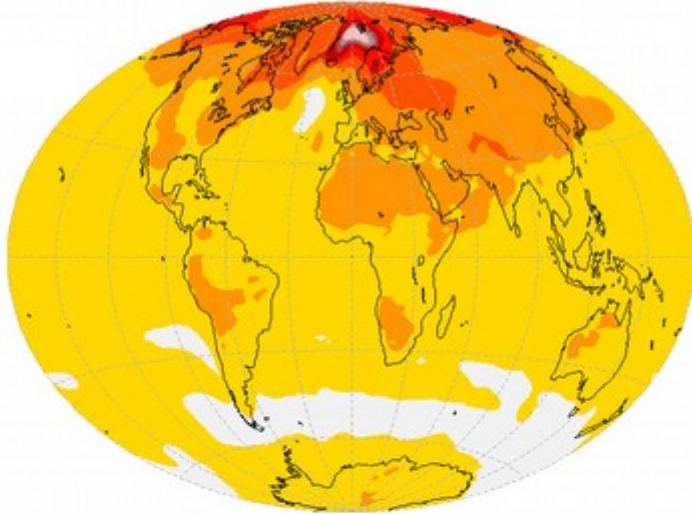




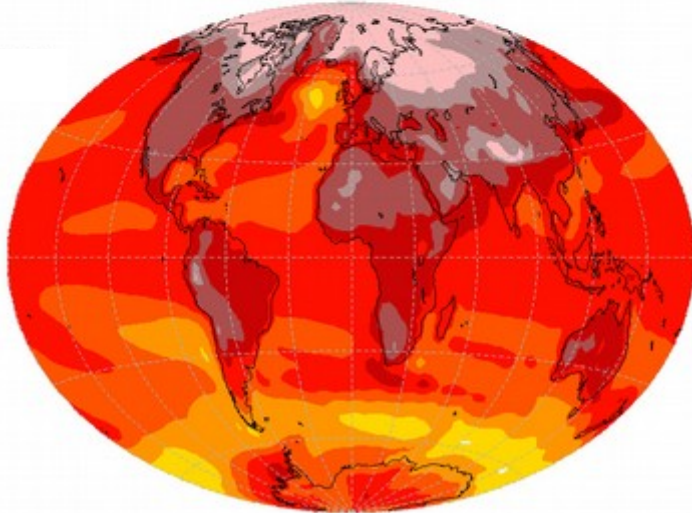
# Comparaison futures - paléoclimats

Différence entre **2100** et **1990**

**RCP2.6**

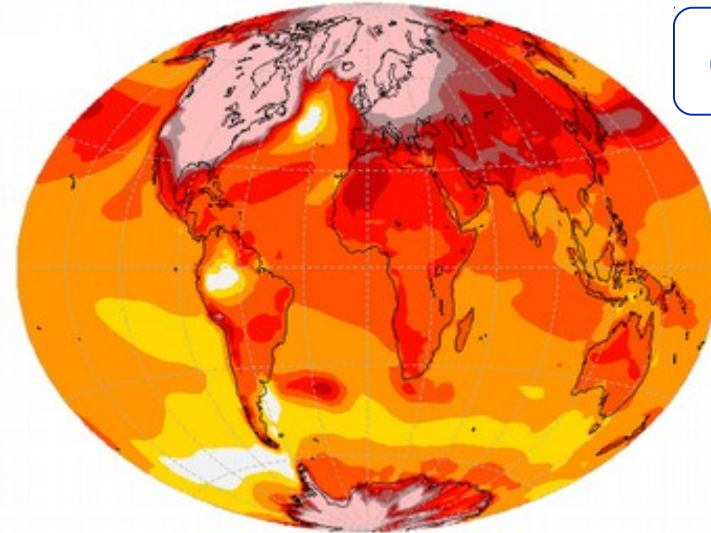


**RCP8.5**

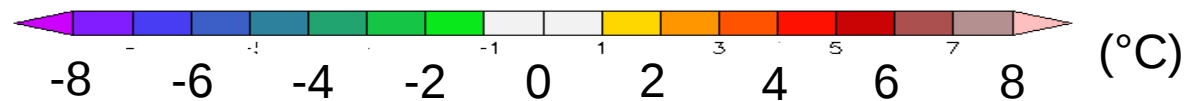


Différence entre la période **actuelle** et celle **dernier maximum glaciaire**

**Glaciaire**

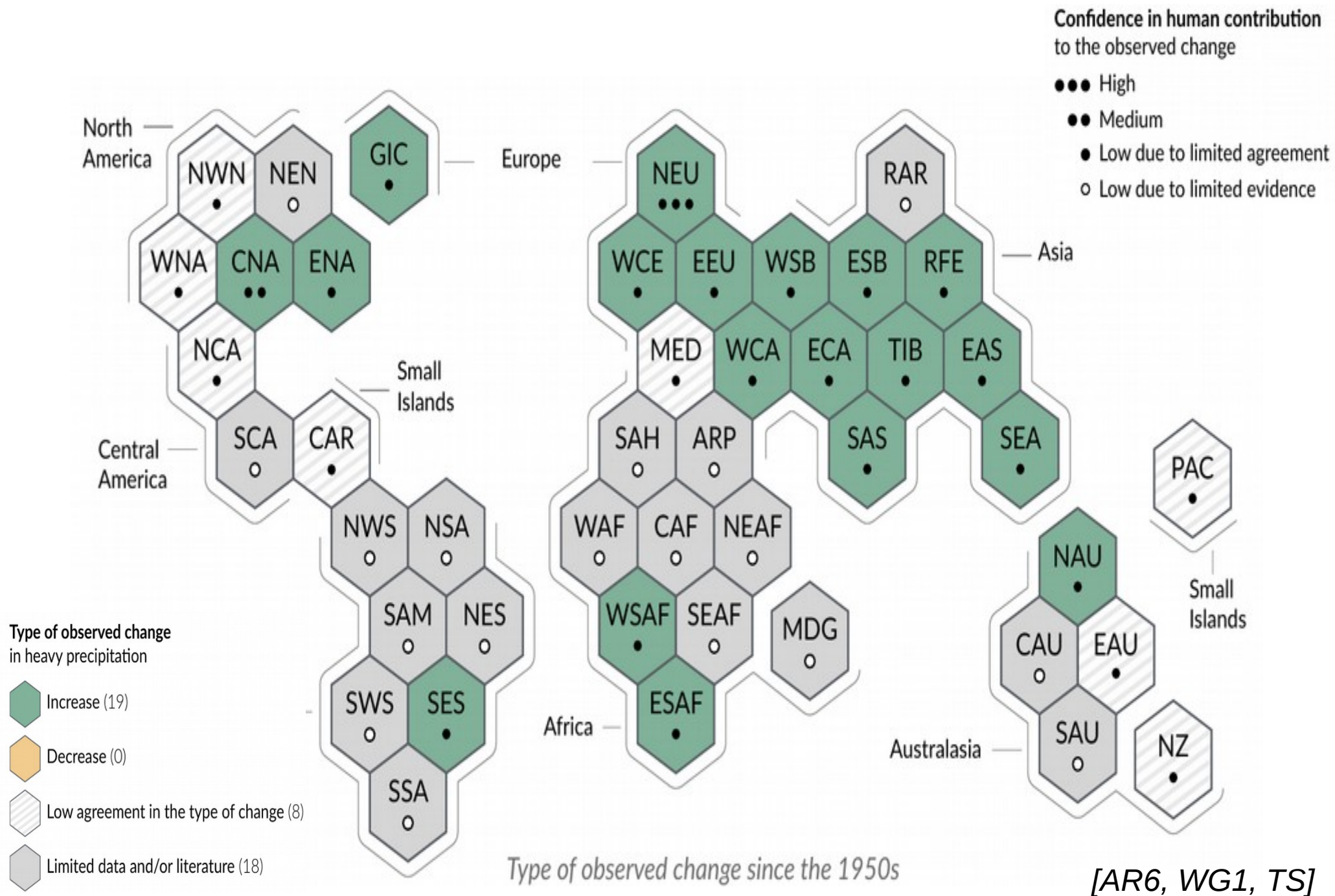


Modèle : IPSL-CM5A-LR



# Les nouveautés de l'AR6

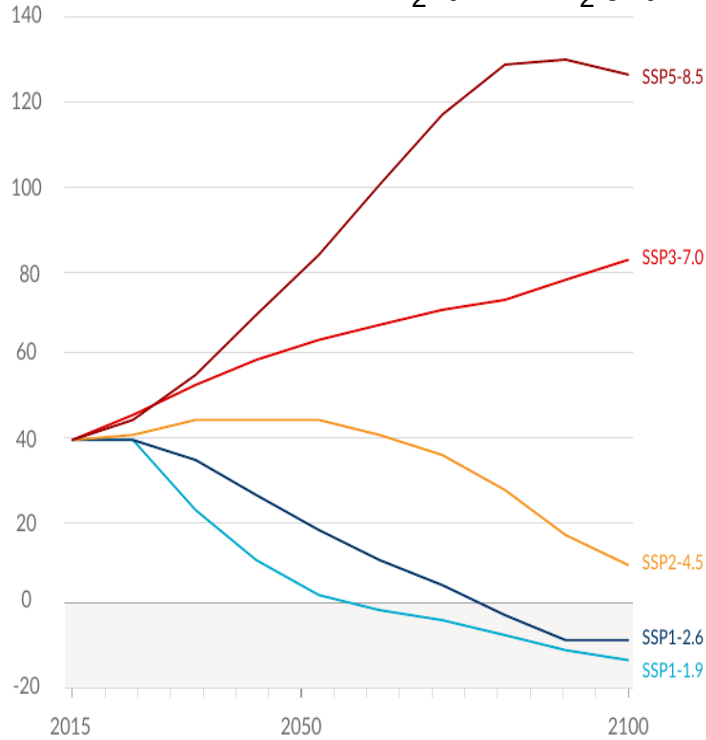
# Changement observé des fortes précipitations



# Des nouveaux scénarios

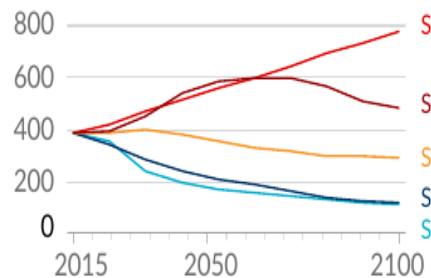
## Scénarios socio-économique (SSP)

### Émission de CO<sub>2</sub> (GtCO<sub>2</sub>/yr)



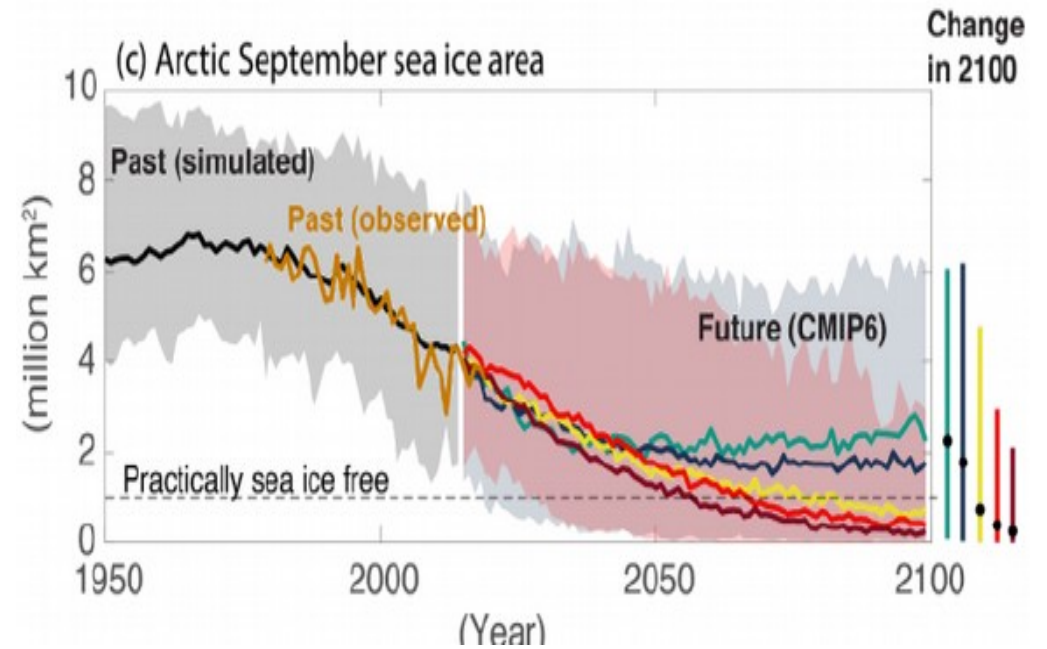
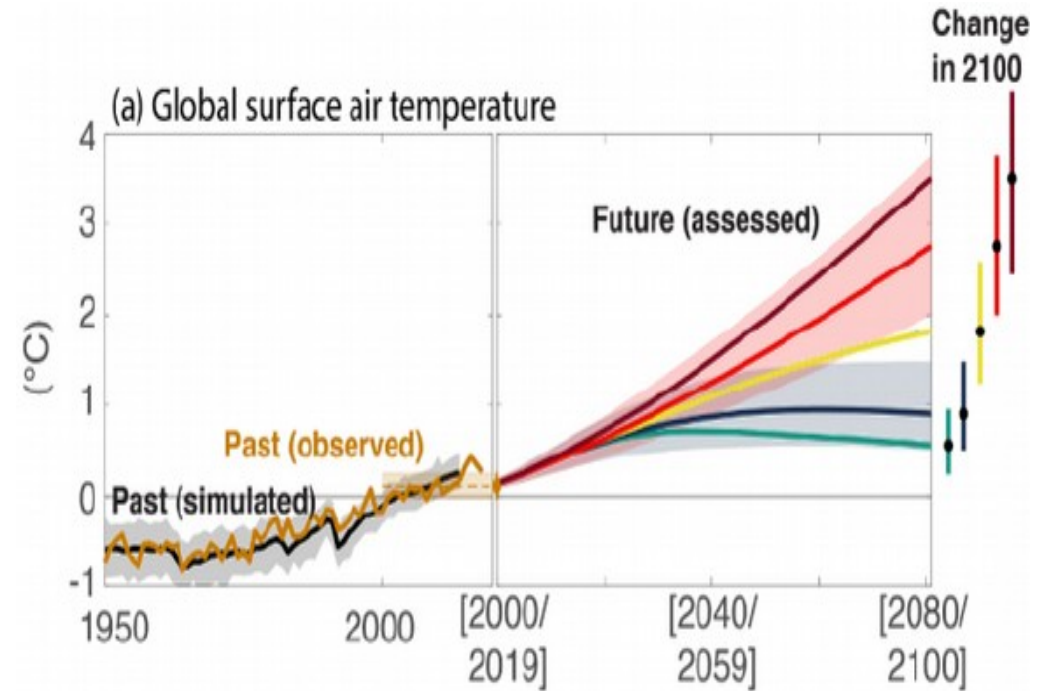
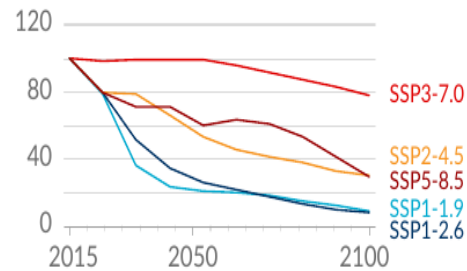
### Selected contributors to non-CO<sub>2</sub> GHGs

#### Methane (MtCH<sub>4</sub>/yr)



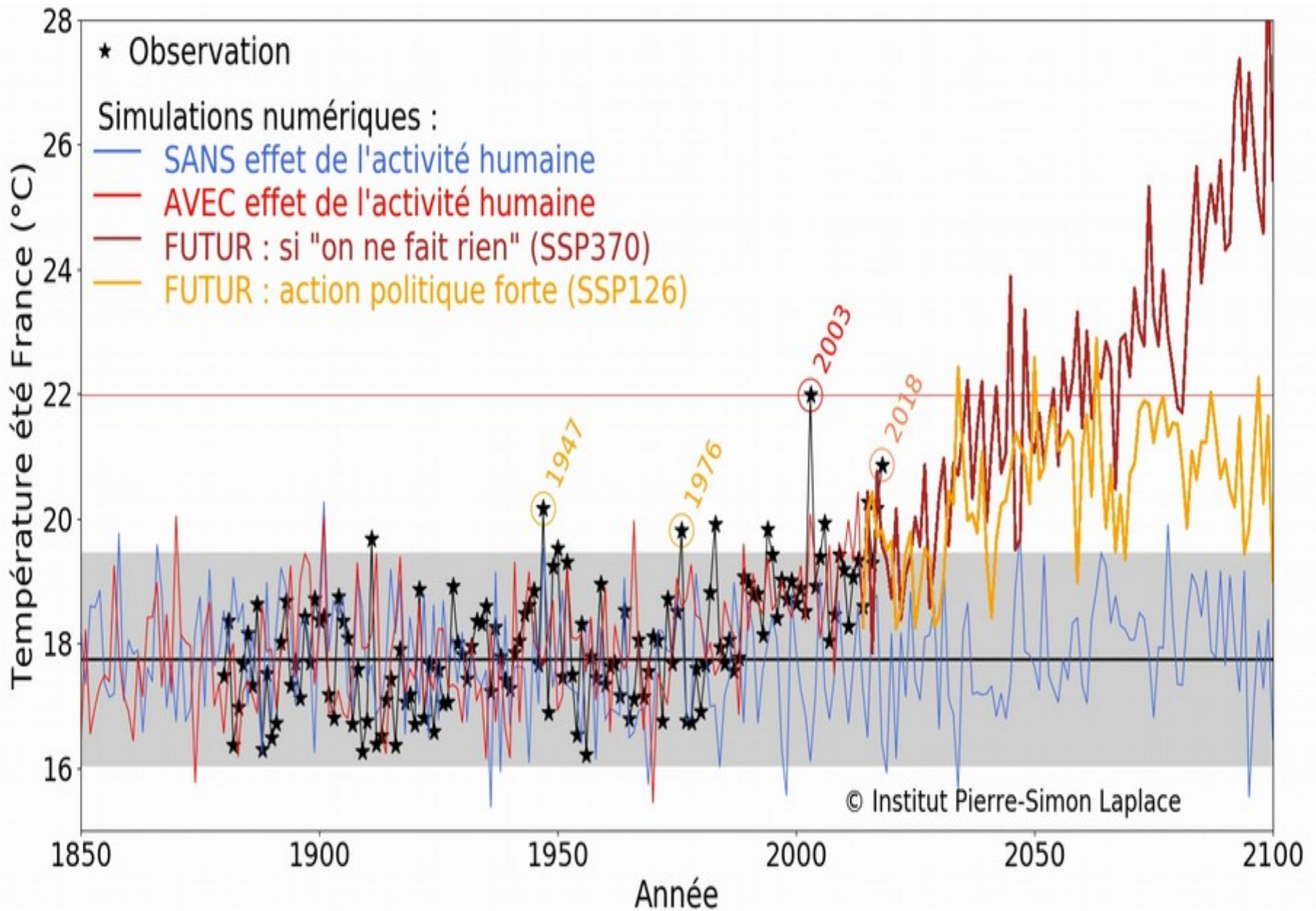
### One air pollutant and contributor to aerosols

#### Sulfur dioxide (MtSO<sub>2</sub>/yr)





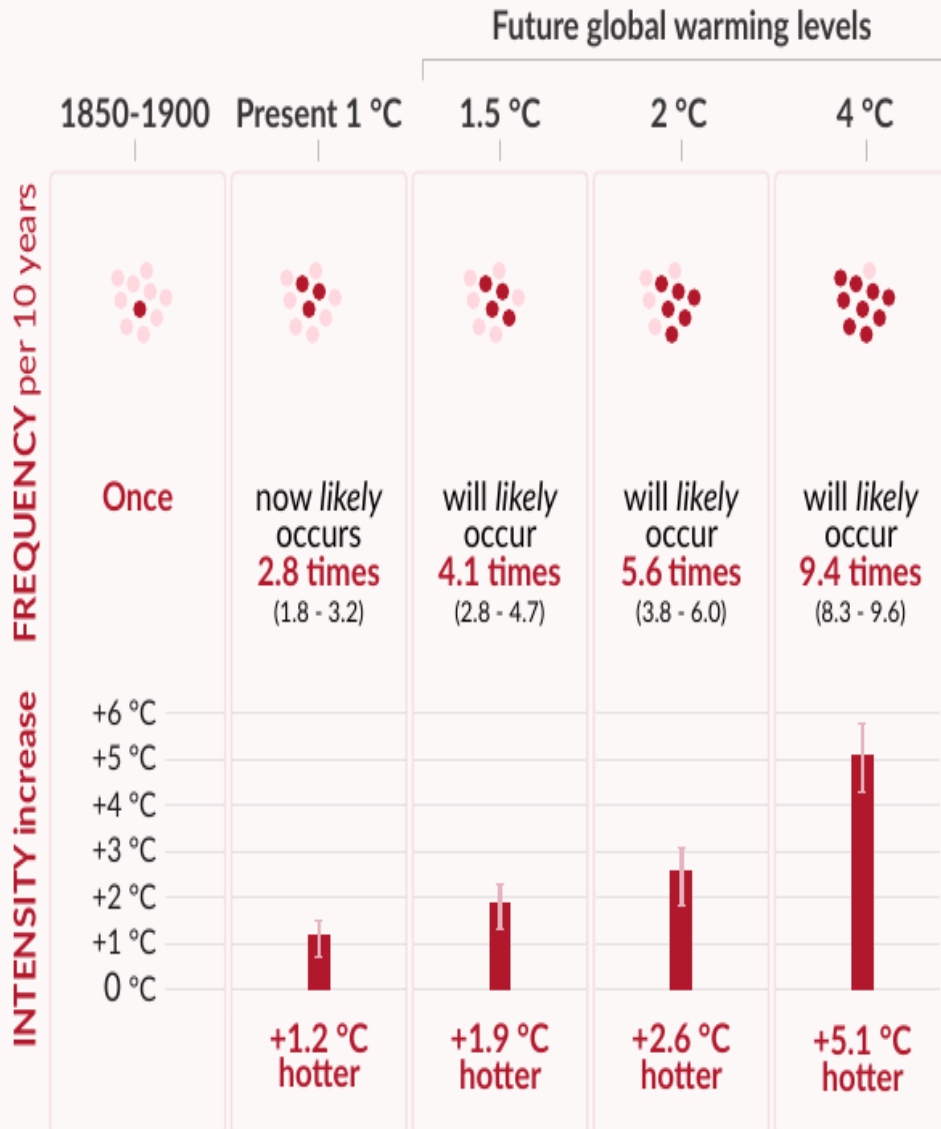
# Evolution des températures estivales en France (juin à août)



# Extrêmes de chaleur sur continents

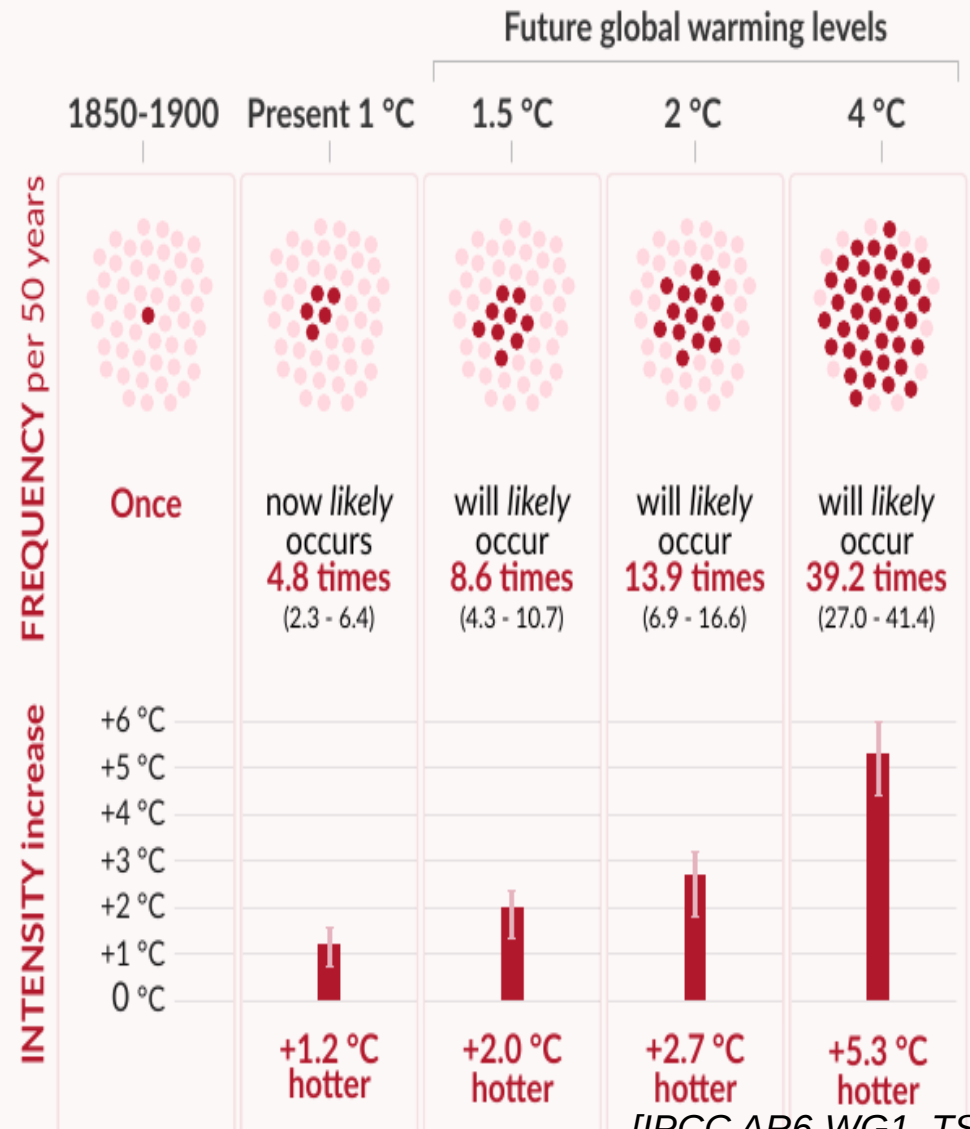
## 10-year event

Frequency and increase in intensity of extreme temperature event that occurred **once in 10 years** on average in a climate without human influence



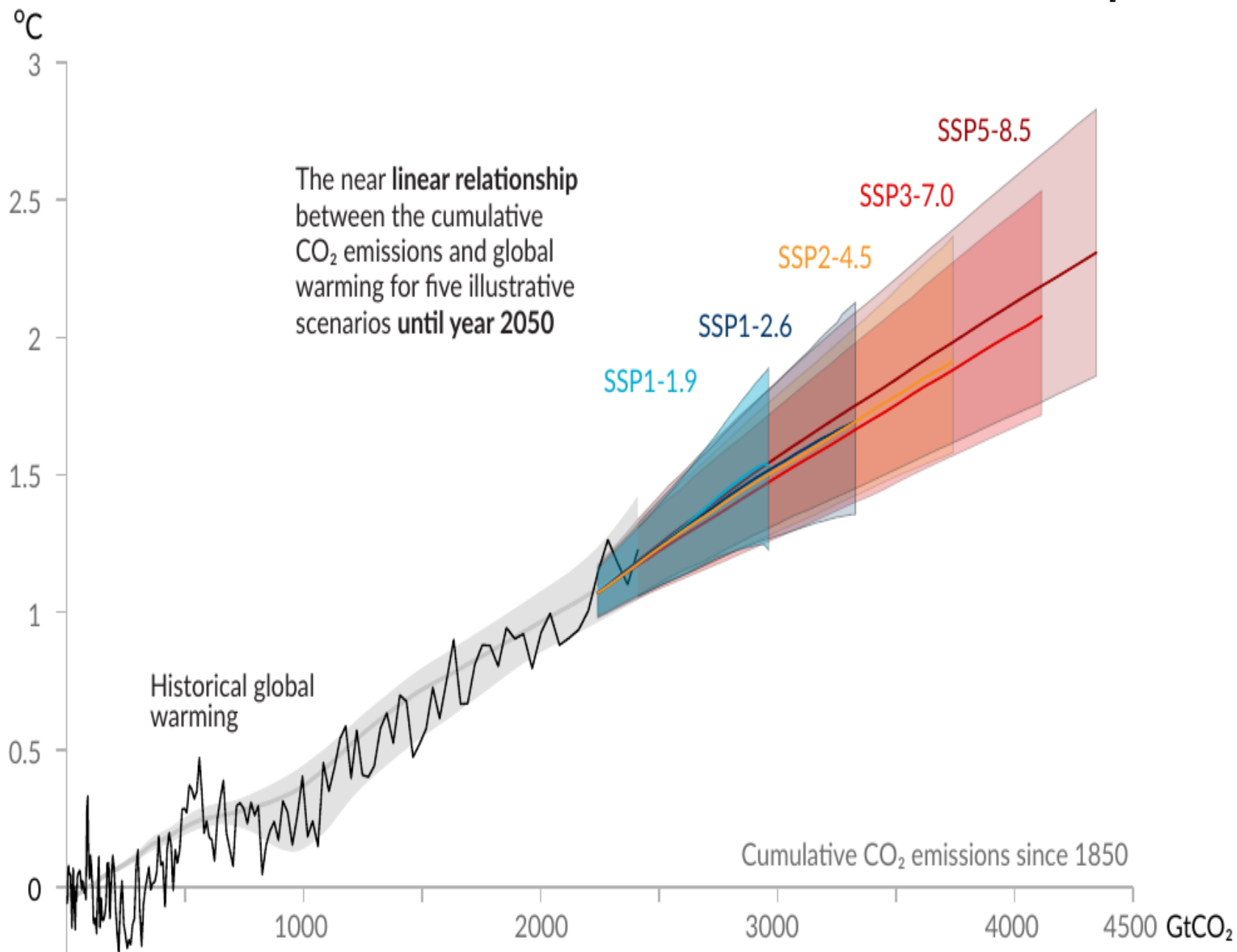
## 50-year event

Frequency and increase in intensity of extreme temperature event that occurred **once in 50 years** on average in a climate without human influence

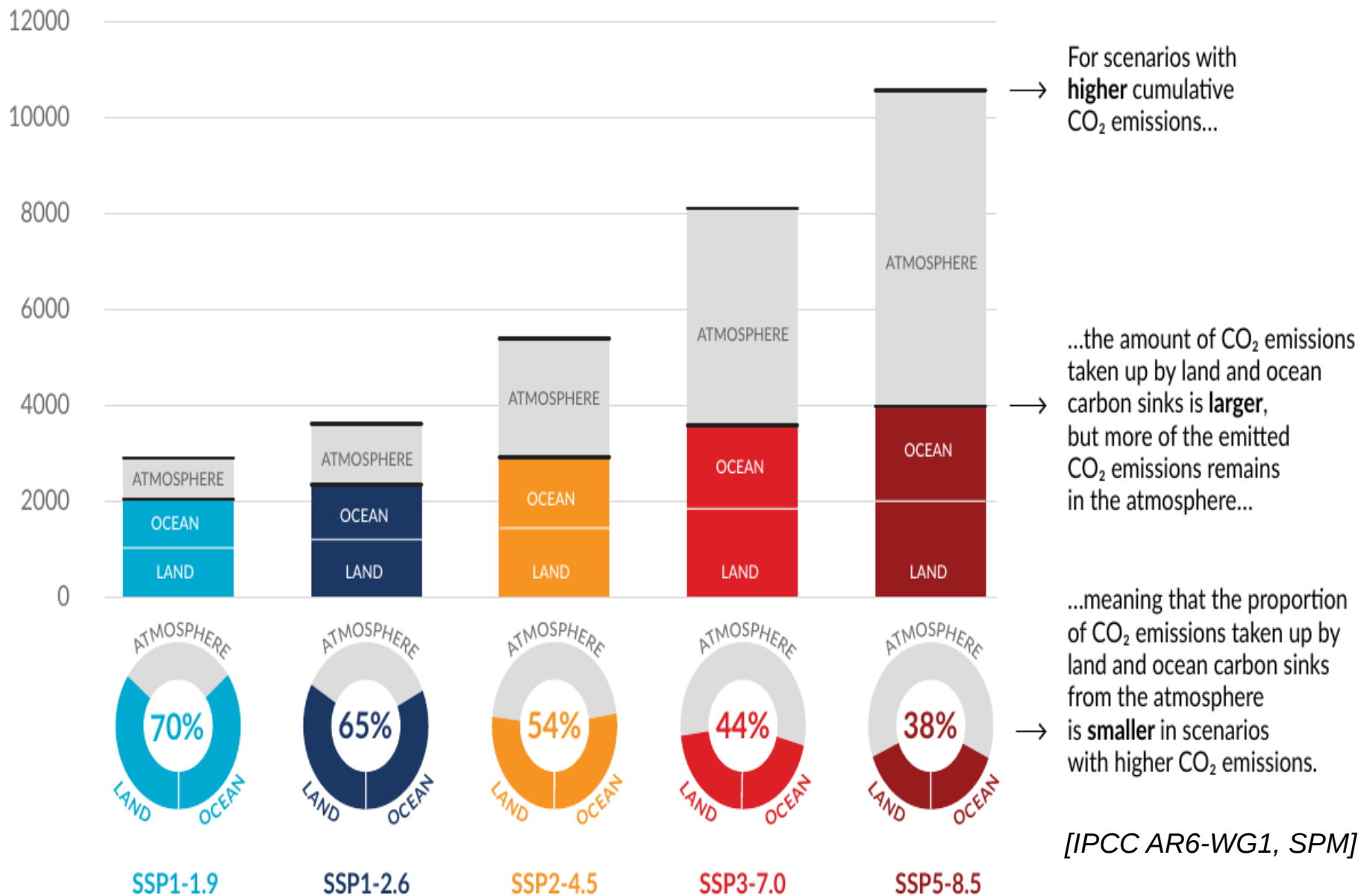


# Augmentation de la température à la surface du globe depuis 1850-1900 (°C) en fonction des émissions cumulées de CO<sub>2</sub>

[IPCC AR6-WG1, TS]



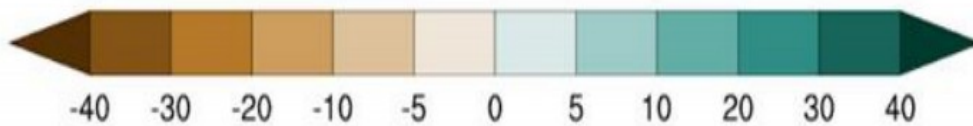
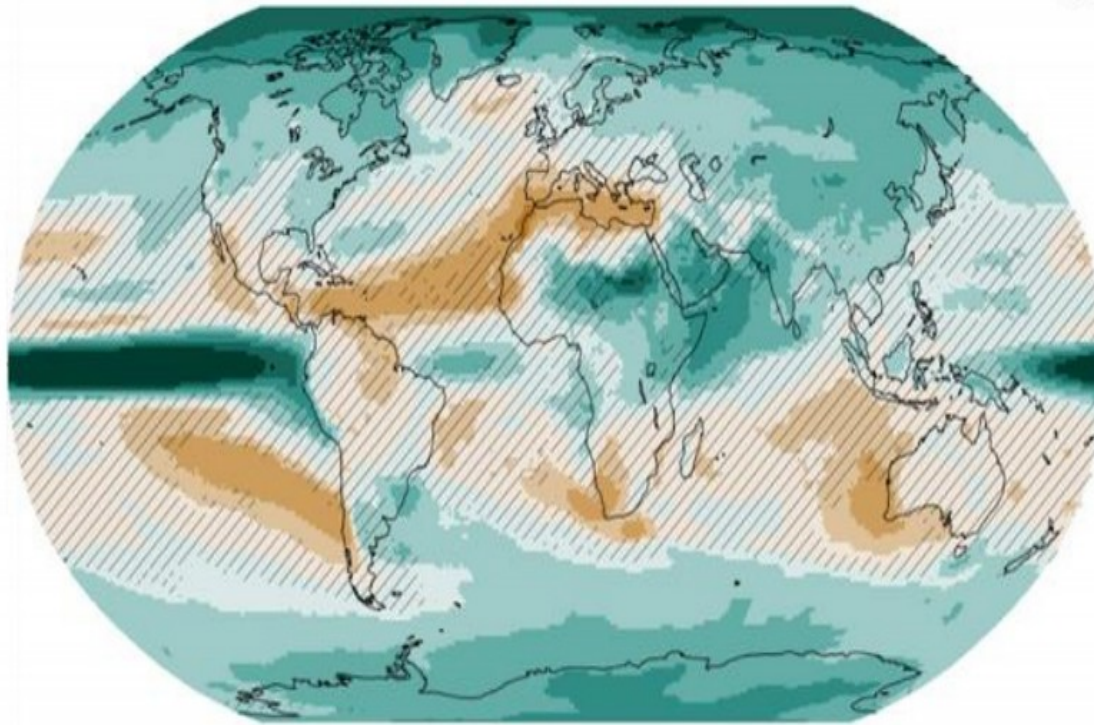
# Total cumulé des émissions de CO<sub>2</sub> absorbées par les terres et les océans (couleurs) et restant dans l'atmosphère (gris) selon cinq scénarios (de 1850 à 2100)





# Changements de précipitation

Scénarios SSP2-4.5, [2081-2100] vs [1995-2014]

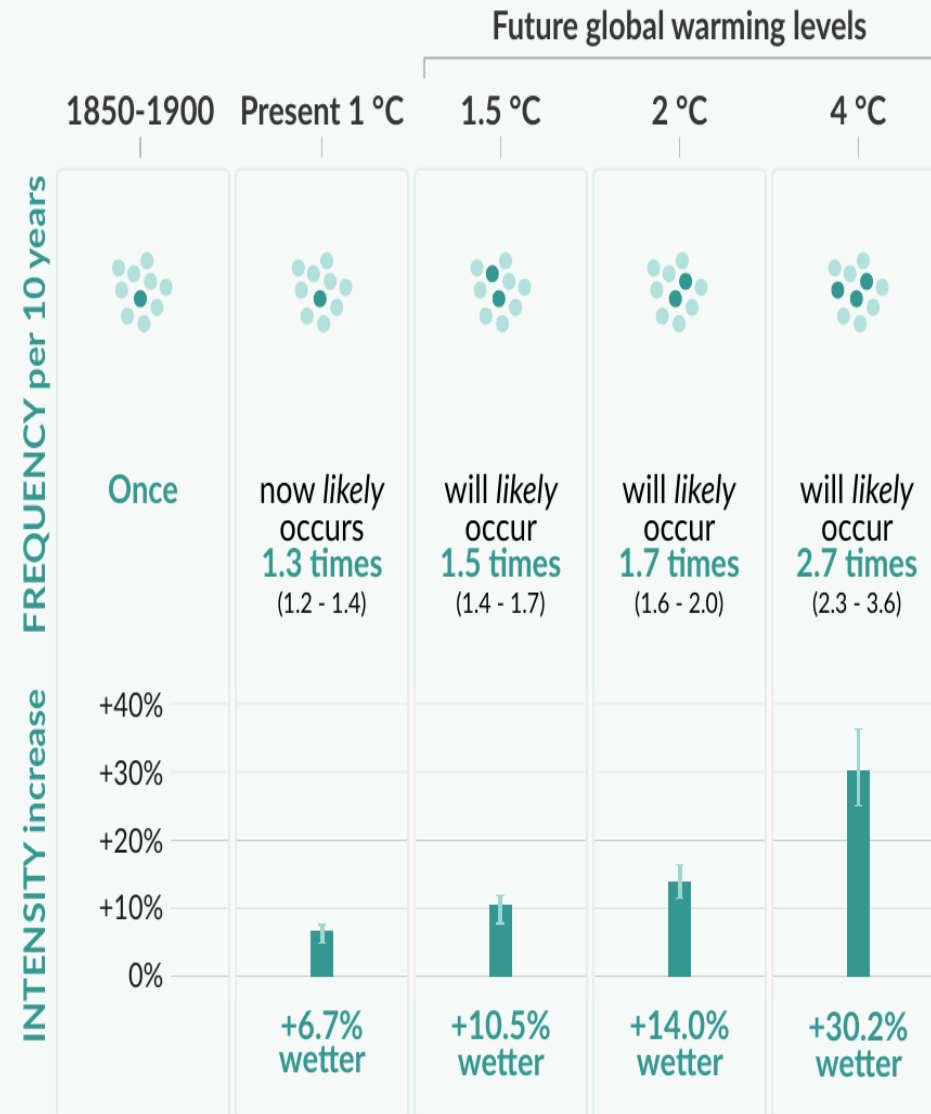


[IPCC AR6-WG1, TS]

## Heavy precipitation over land

### 10-year event

Frequency and increase in intensity of heavy 1-day precipitation event that occurred once in 10 years on average in a climate without human influence





[www.ipcc.ch](http://www.ipcc.ch)  
Technical summary  
Interactive atlas

Merci de votre attention