

Paléoclimats et sensibilité climatique-1

Pascale Braconnot

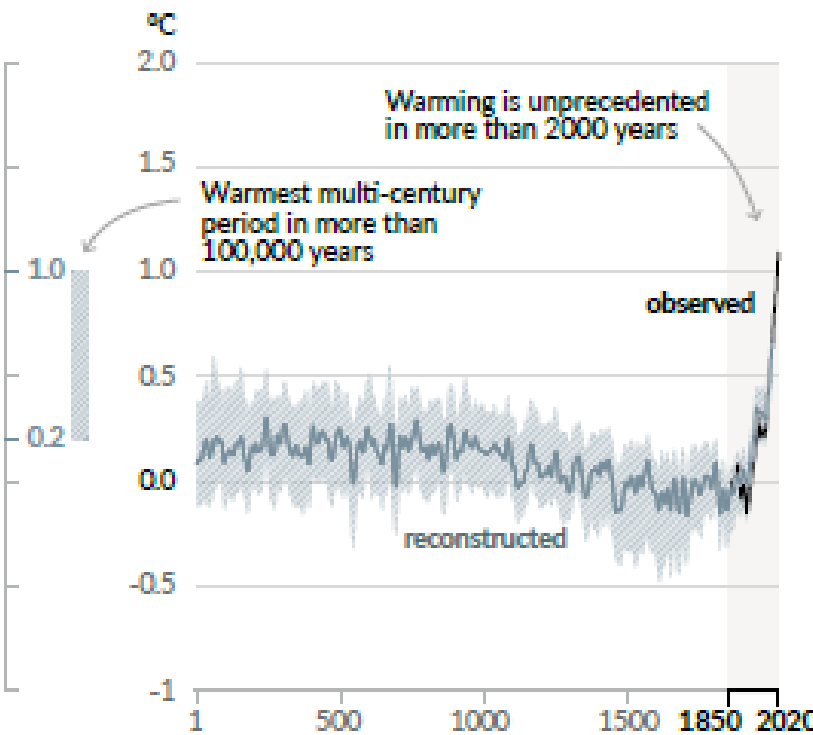
Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement – Institut Pierre
Simon Laplace, France

Une grande diversité de climats

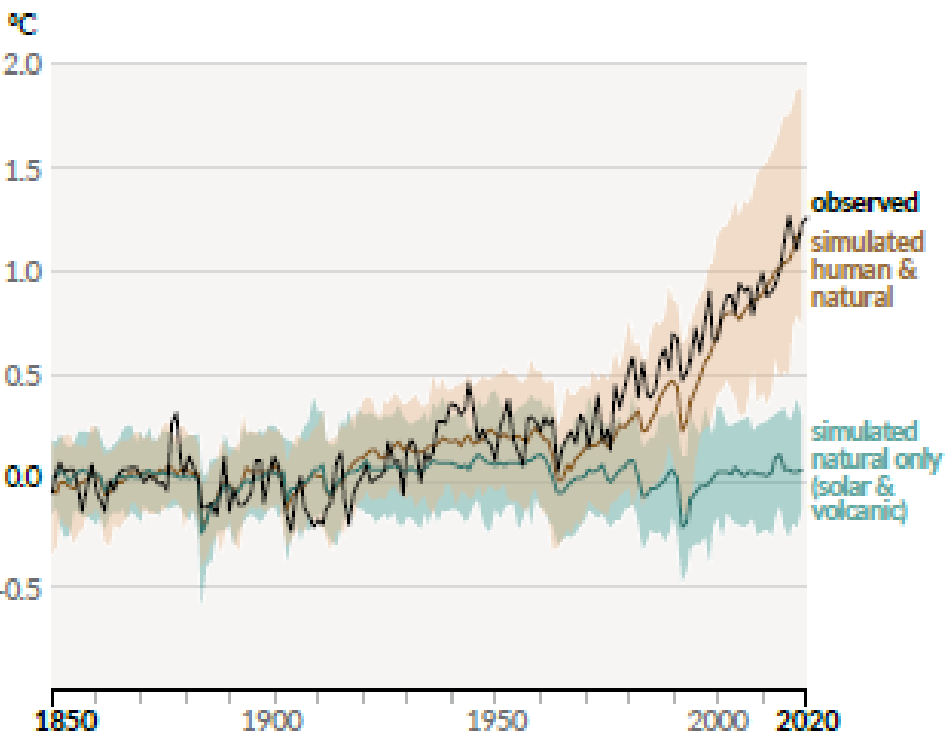
Mettre en contexte le réchauffement actuel et l'action de l'homme

Changes in global surface temperature relative to 1850-1900

a) Change in global surface temperature (decadal average) as reconstructed (1-2000) and observed (1850-2020)

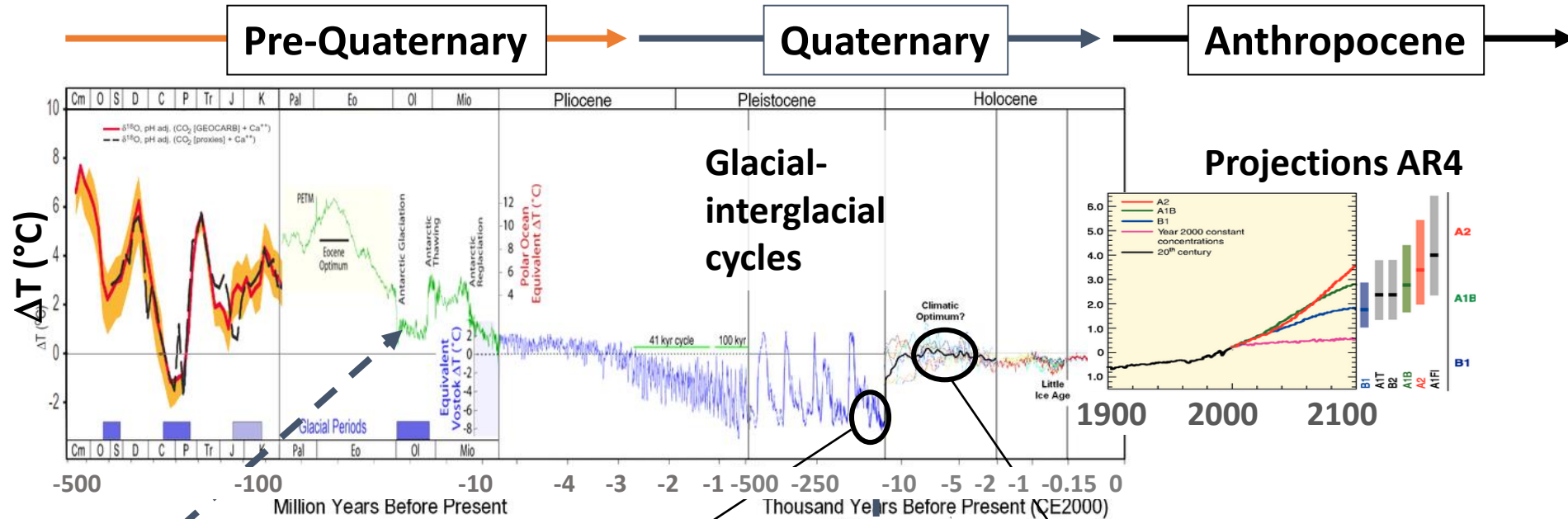


b) Change in global surface temperature (annual average) as observed and simulated using human & natural and only natural factors (both 1850-2020)



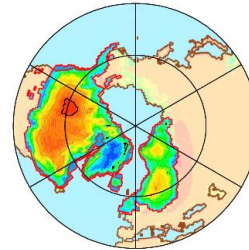
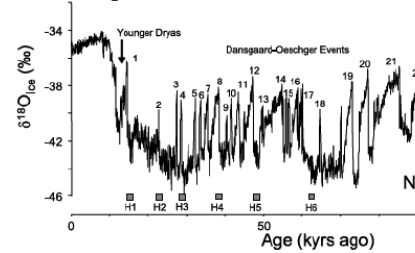
SPM1

Des changements de grande ampleur



Eocene-Oligocene transition

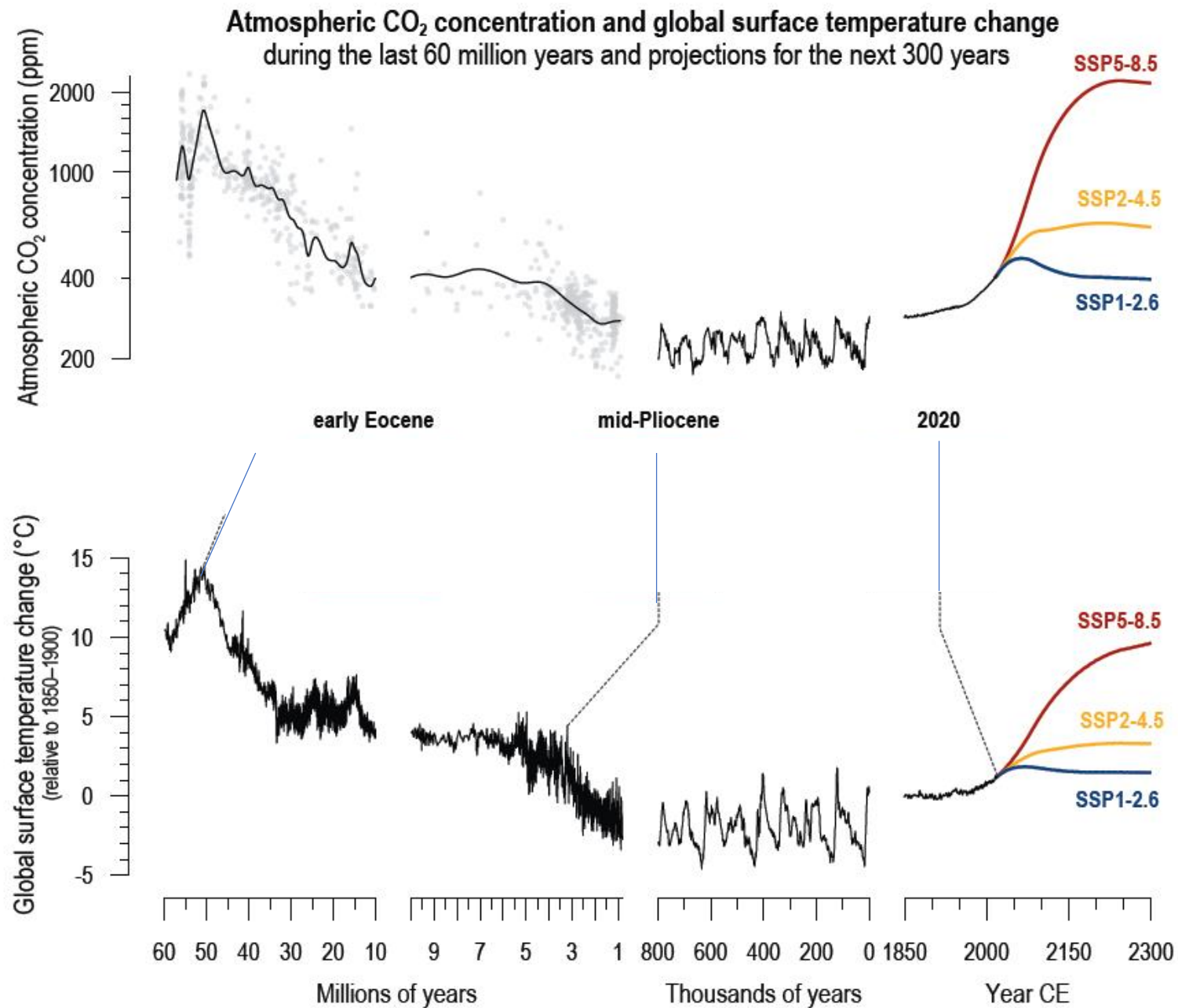
Abrupt events



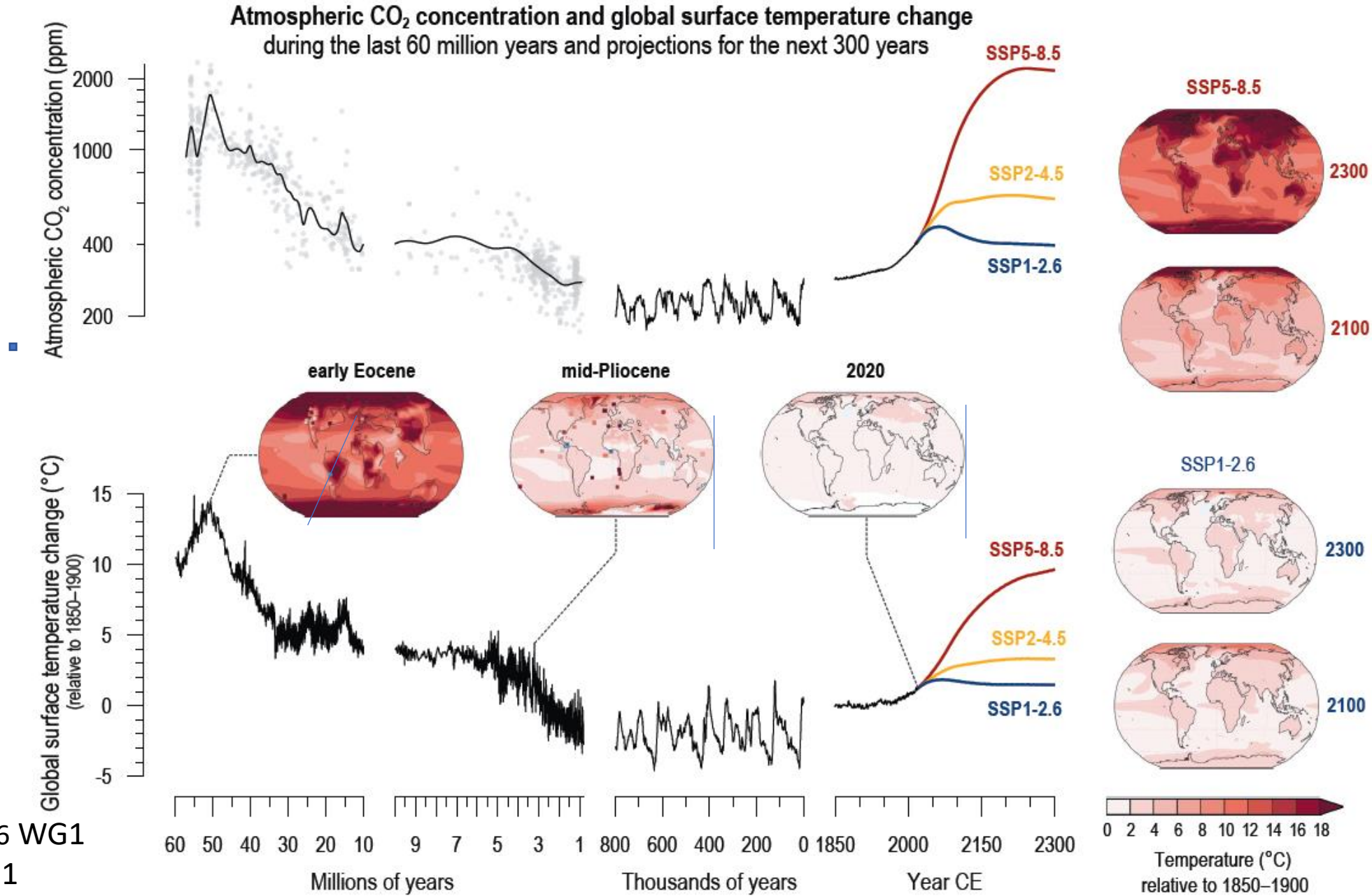
Last Glacial Maximum

Mid Holocene
Forest tundra limit further north, « Green Sahara »

Variations conjointes Température et CO2



Des caractéristiques communes



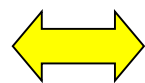
HN/HS
Continent/ocean
Amplification polaire

Le système à considérer et ses constantes de temps

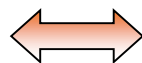
En paléo : on regarde par rapport à une situation sur le long terme pour une période donnée

Certains éléments qui sont des rétroactions (ex : calottes) sont assimilés à des « forçages »

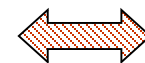
Calotte joue sur Orographie
Albédo de surface
Température
d'émission car
changement d'altitude



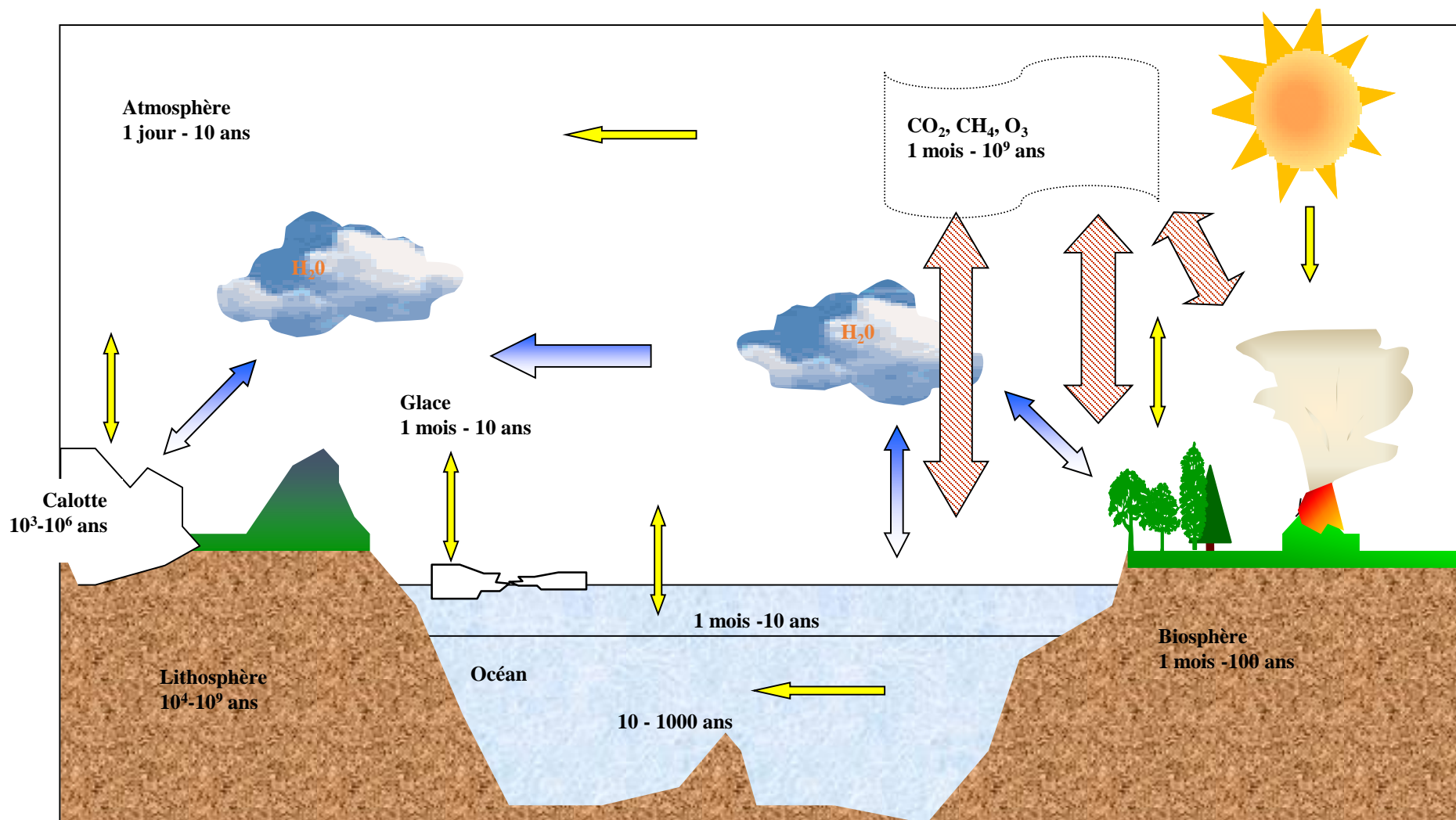
Echanges d'énergie



Echanges d'eau

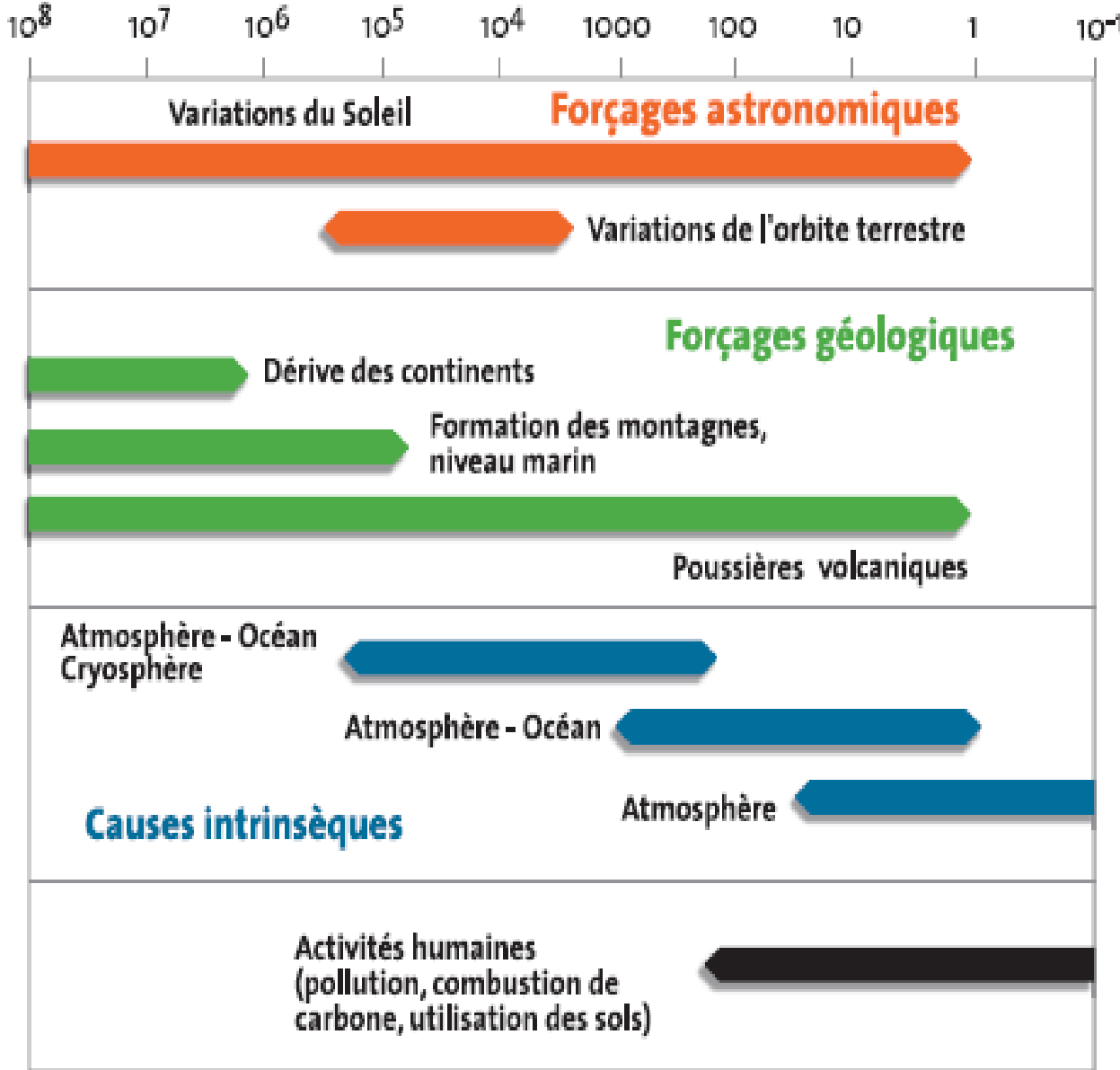


Echanges biogéochimiques

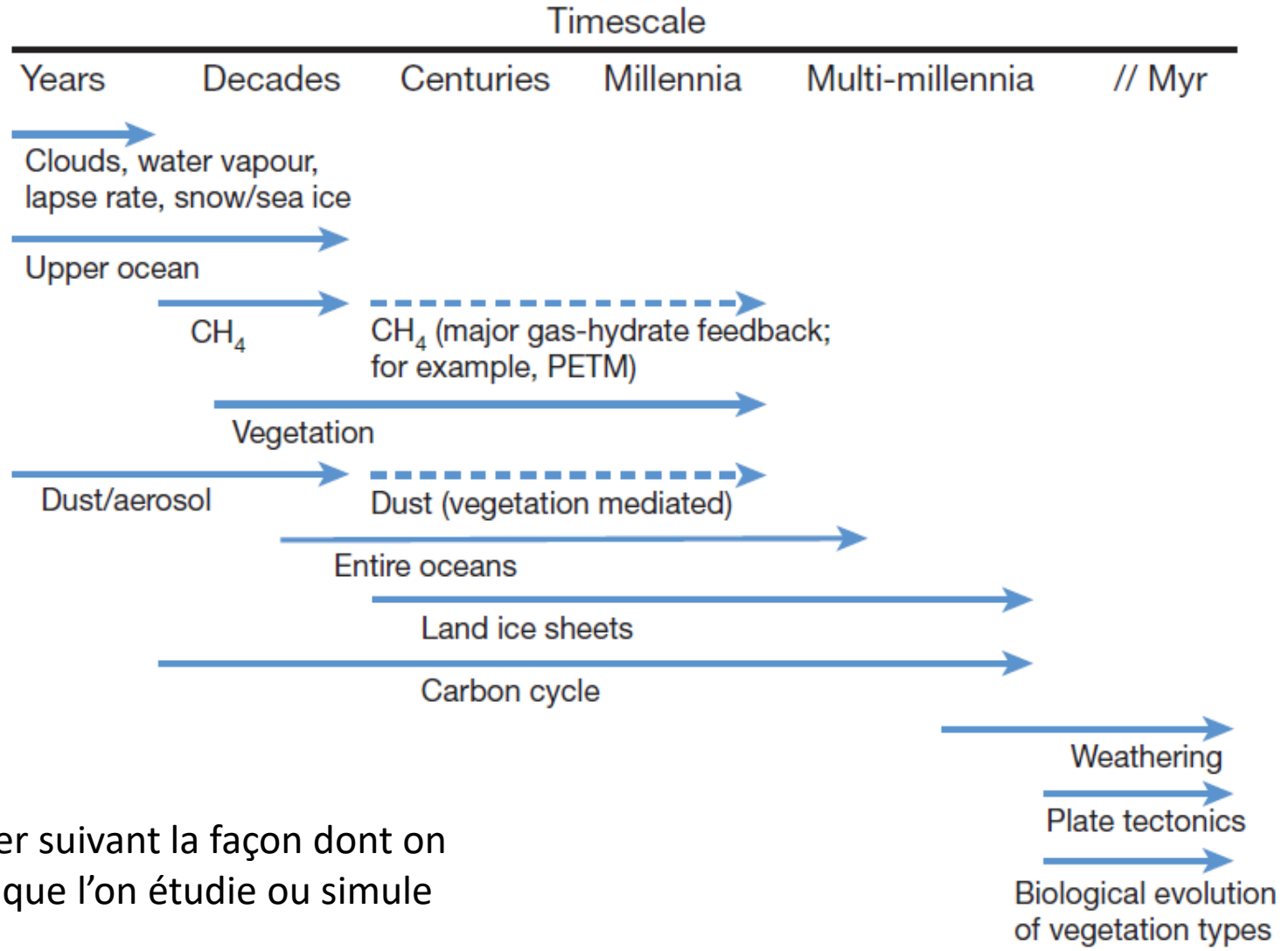


Constantes de temps et « forçages »

Temps caractéristique (années)

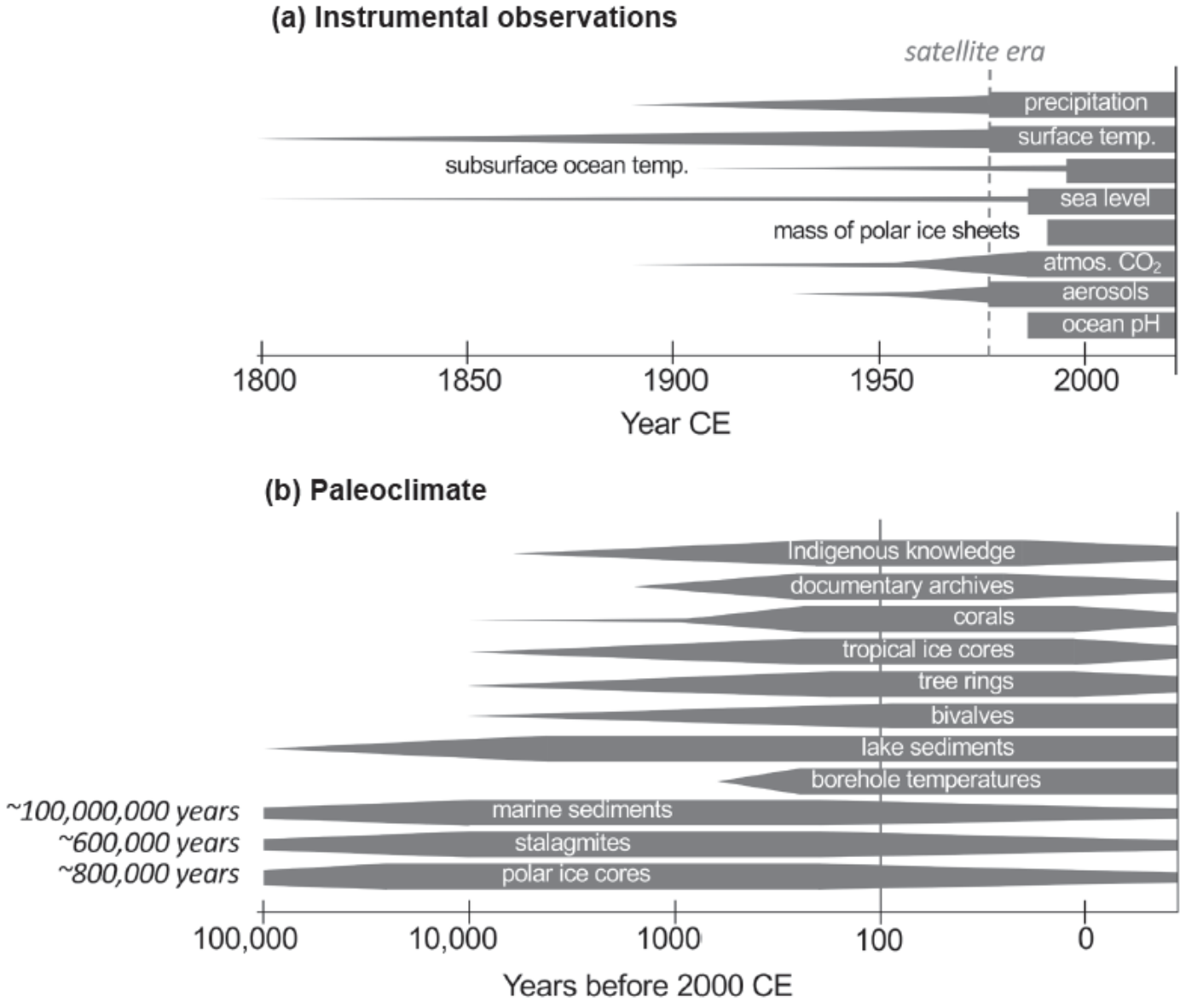


Rétroactions : constantes de temps



Nuances à apporter suivant la façon dont on définit le système que l'on étudie ou simule

Des sources de données complémentaires : différents types d'archives climatiques



AR6 WG1 Fig. 1.7

Différents objectifs suivant les études

- Sensibilité climatique (difficulté est d'estimer la partie CO₂ du signal)
- Rétroactions climatique : temps courts/temps long
- Réponse à différents « forçages » : compréhension
- Evaluation des modèles



De la perturbation radiative à la sensibilité climatique

Modèle simple : perturbation radiative

$$\Delta N = \Delta F + \lambda \Delta T + V$$

$\lambda = \sum \lambda_i$. somme de différentes rétroactions

Sur un temps « long » : « équilibre »

$$\Delta T = -\Delta F / \lambda$$

valide quelque soit ΔF .

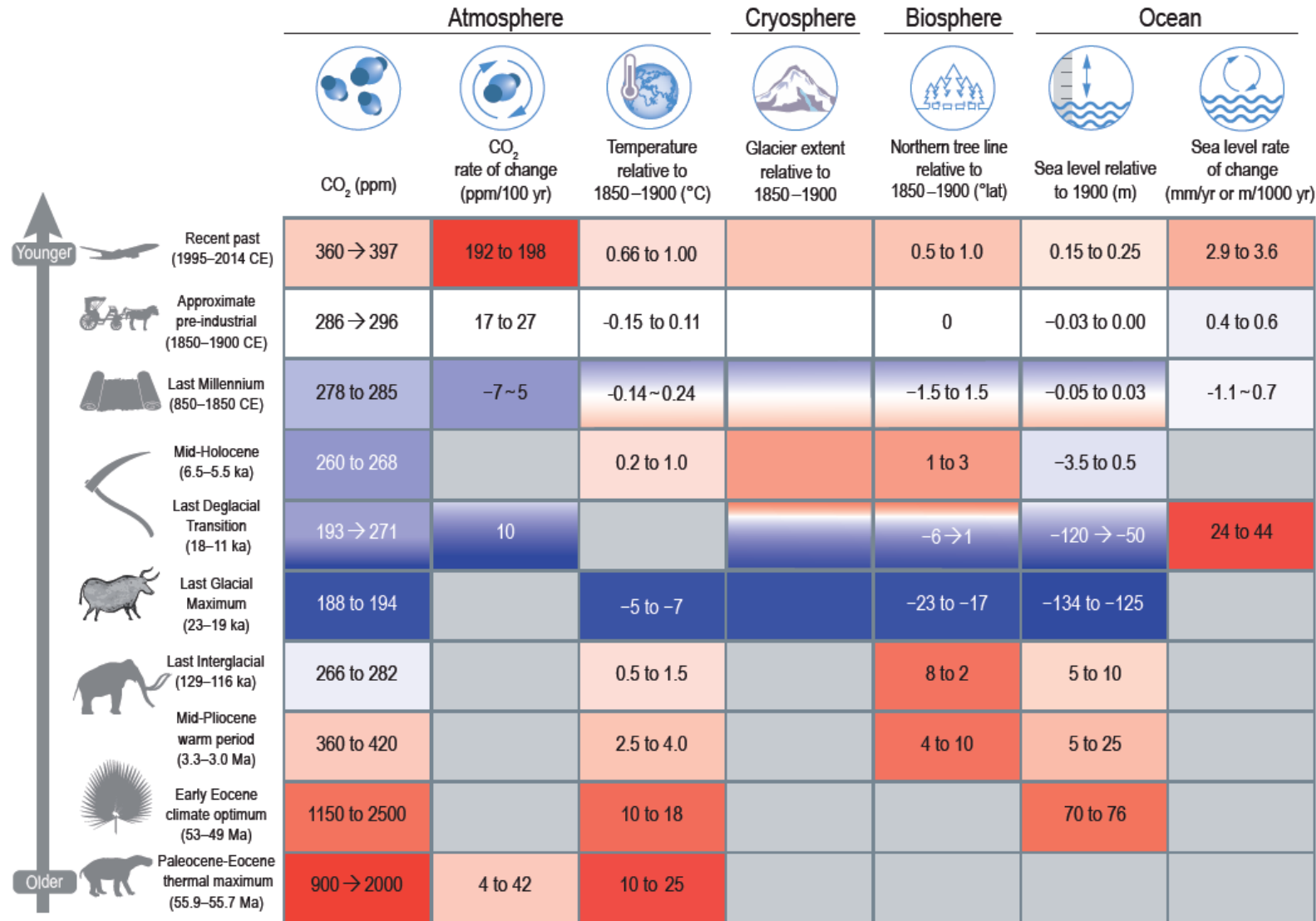
Adéquation avec la définition de la sensibilité climatique : ECS

$$S = -\frac{\Delta F_{2xCO_2}}{\lambda}$$

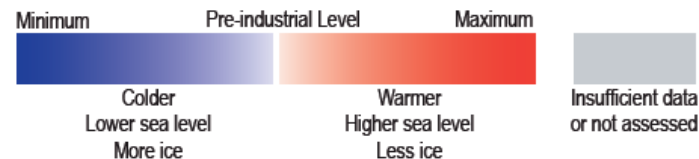
Définition issue d'un cadre idéalisé sans observations directes pour l'estimation

Attention aux notations!!! Car suivant les papiers (les personnes) λ et le σ peuvent représenter bien la même chose : ex rétroactions climatiques ou des choses différentes (ex $\sigma = 1/\lambda$: paramètre de sensibilité climatique)

Caractérisation pour quelques périodes climatiques



X to Y: very likely range, unless otherwise stated in FAIR data table
 X → Y: start to end of period, with no stated uncertainty
 X ~ Y: lowest and highest values, with no stated uncertainty



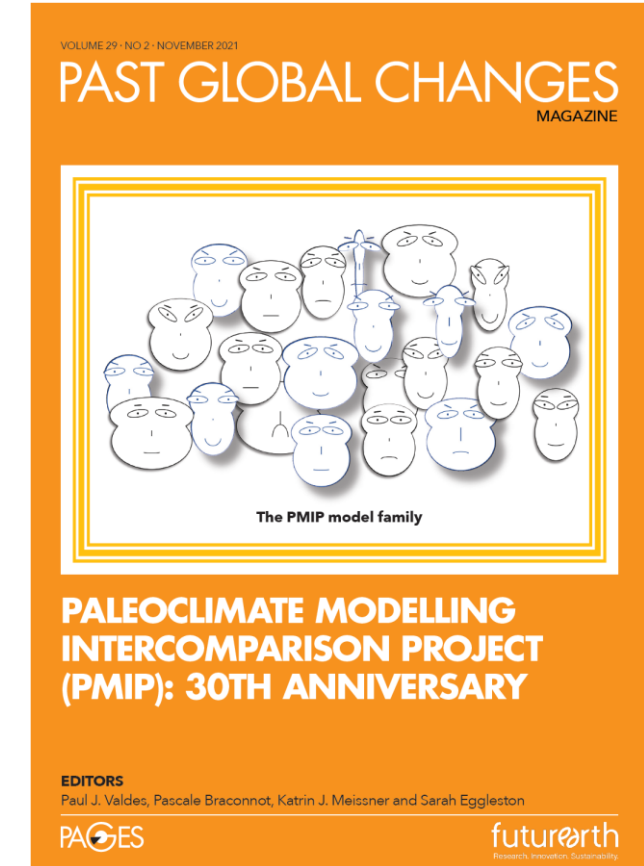
Paleoclimate Modeling Intercomparison project (PMIP)



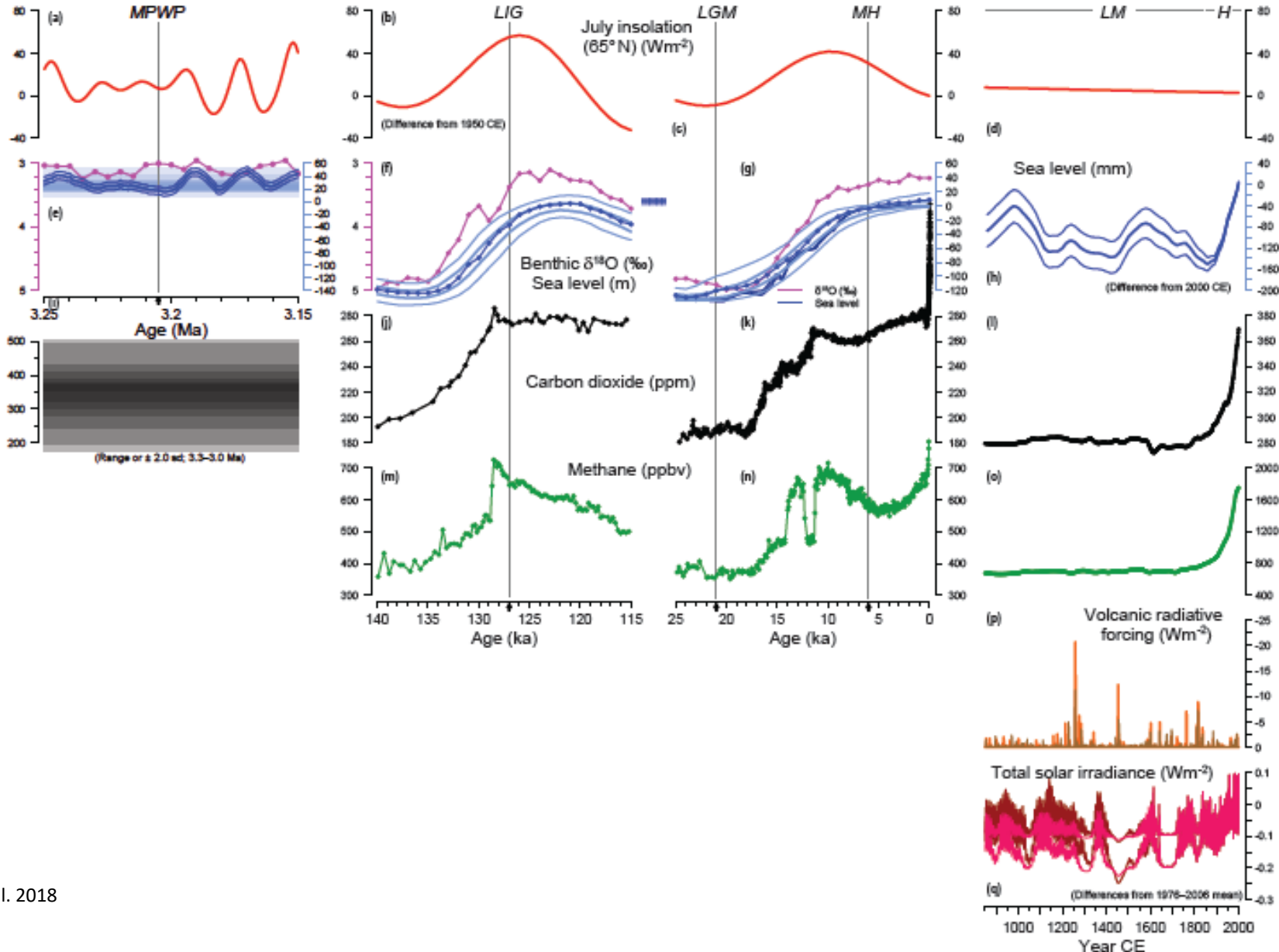
- Born in 1991



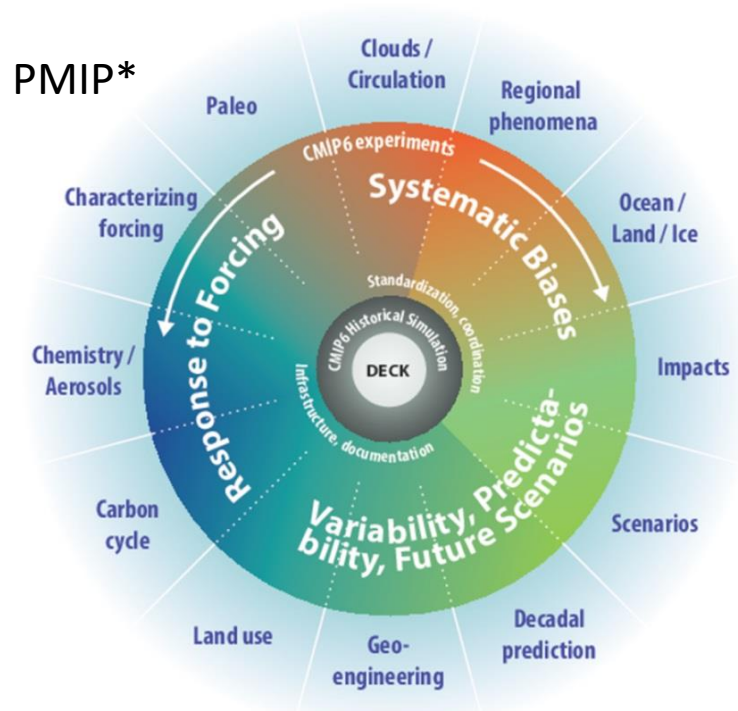
- Initial objectives are still there :
 - **Understand** mechanisms of past climate change and climate feedbacks
 - **Evaluate** the ability of climate models to simulate a climate different from the modern climate
- Since the beginning a resource for IPCC reports
 - Out of sample test for climate model developed using modern conditions as a reference
 - Long term climatic context
 - Key questions related to future climate : **climate sensitivity** (response to forcing + feedbacks), **hydrological cycle**, **climate variability**, linkages between climate changes and environmental changes



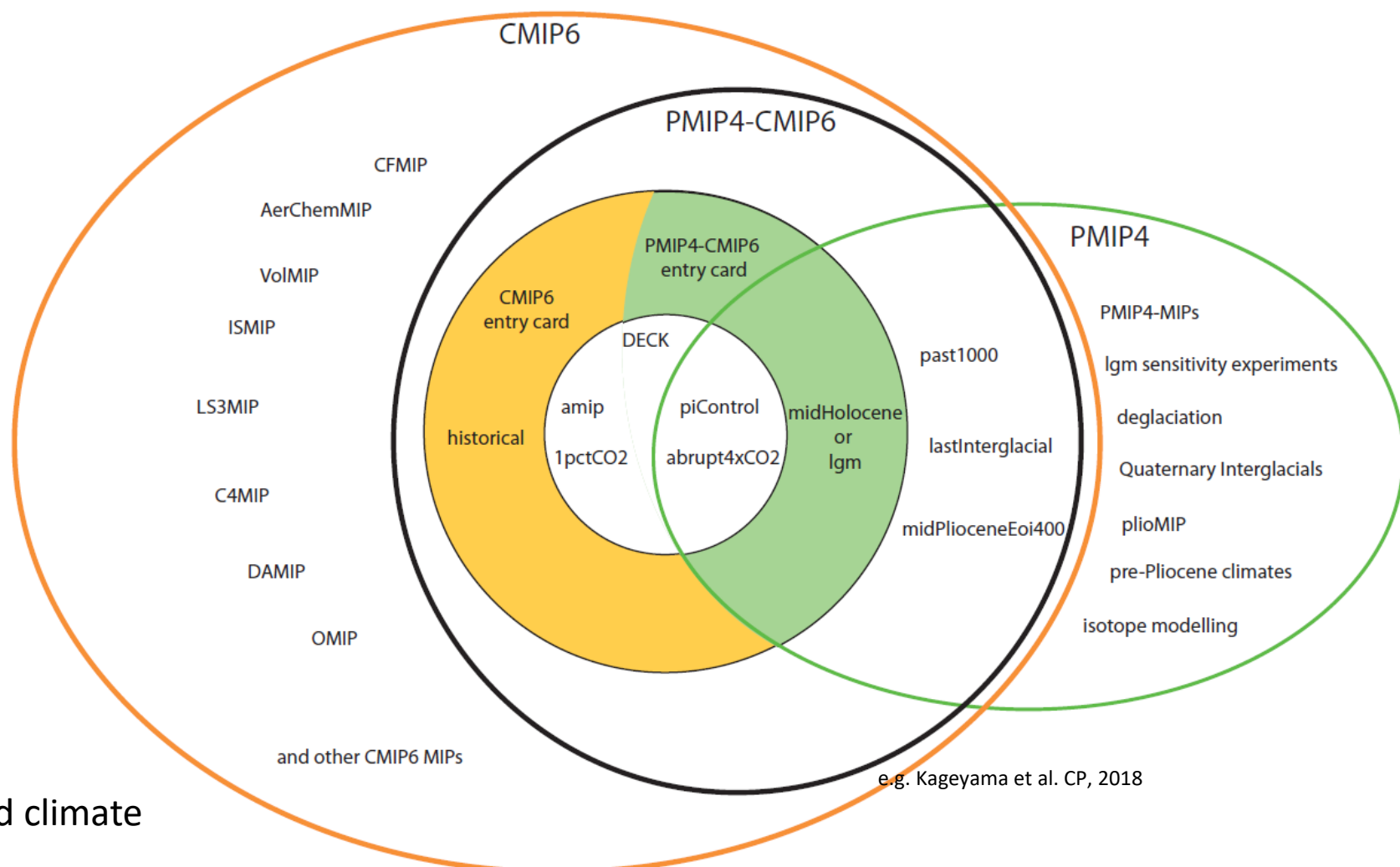
Périodes clefs du Paleoclimate Modeling Intercomparison Project



Five PMIP reference periods are part of CMIP



CMIP6 : endorsed by WCRP/WGCM (eg Eyring et al. 2016)



e.g. Kageyama et al. CP, 2018

And PMIP4 additional views on

- Uncertainty in boundary conditions and climate reconstructions
- **Deep time**
- Proxy modelling (ex. isotopes) ; assimilation
- Grand challenge on deglaciation ; rapid events



Simulations, climate reconstructions from different climate archives, model-data comparisons

Le puzzle PMIP: assembler les questions scientifique, les forçages et la complexité du climat

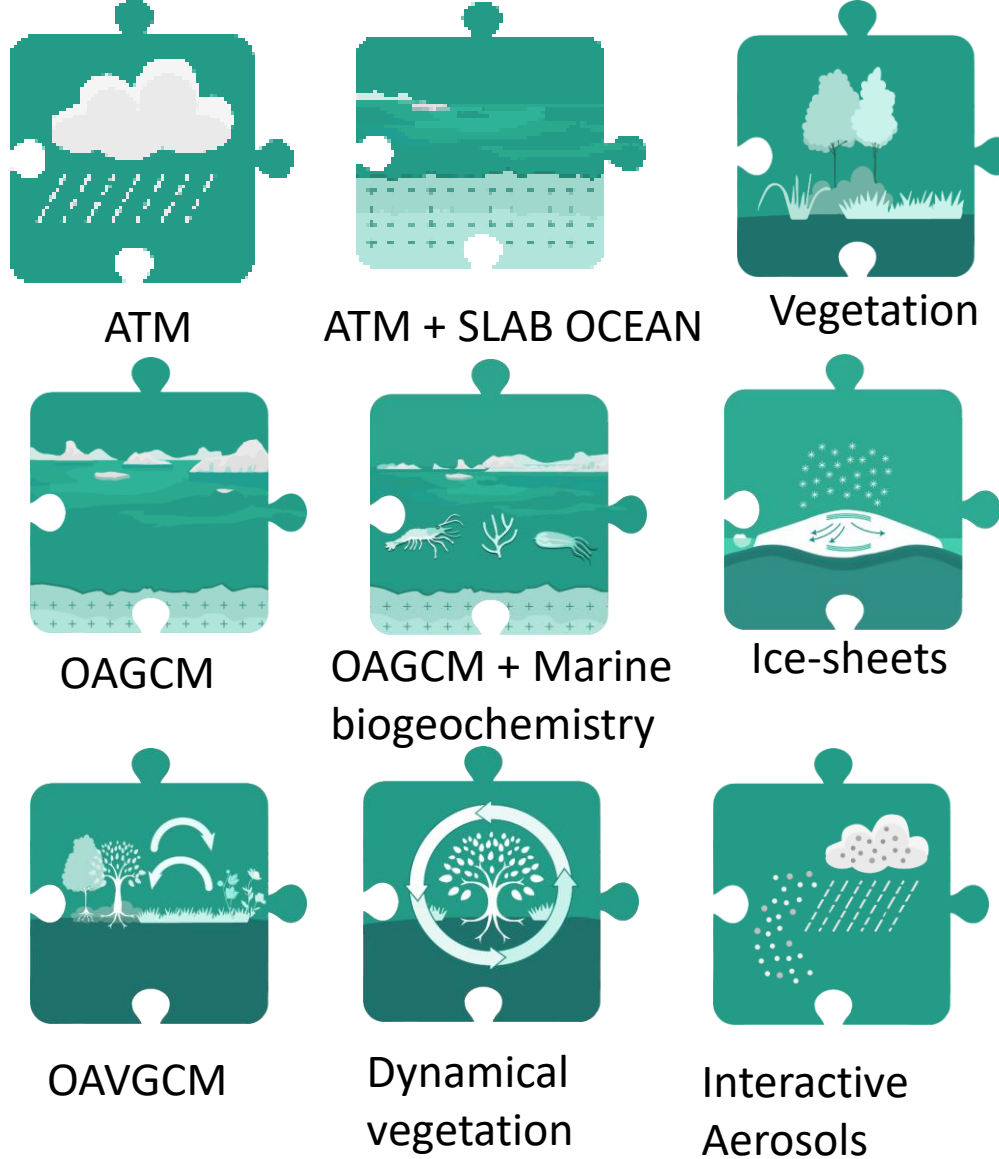
Périodes



Forçages



Rétroactions et complexité



Le dernier maximum glaciaire

DMG ou LGM (en anglais)

Un intérêt pour le dernier maximum glaciaire dès les années 1970-80

Une reconstitution des température océanique au DMG : CLIMAP (1081)

Des reconstitution des températures continentales et couverts végétaux (pollen, macrorest, lacs ...)

Une reconstitution des calottes de glace

Une reconstitution de la composition atmosphérique : 200 ppm

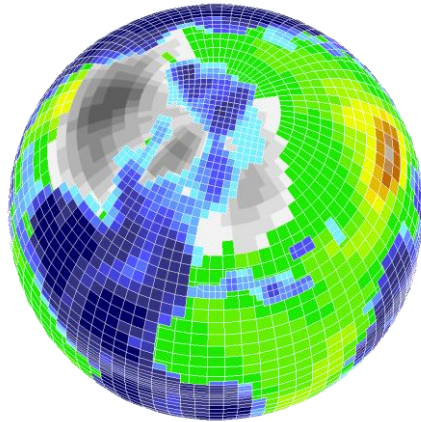
Possibilité de faire des simulations globales : atmosphère seul ou atmosphère couplé à un océan de surface (« slab ocean »)

Orbital configuration

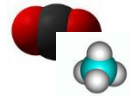


Faible au DMG

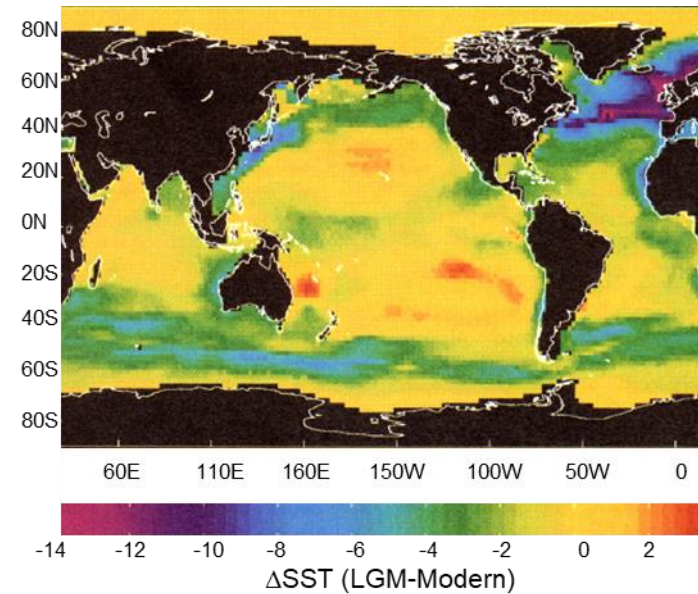
Ice Sheet



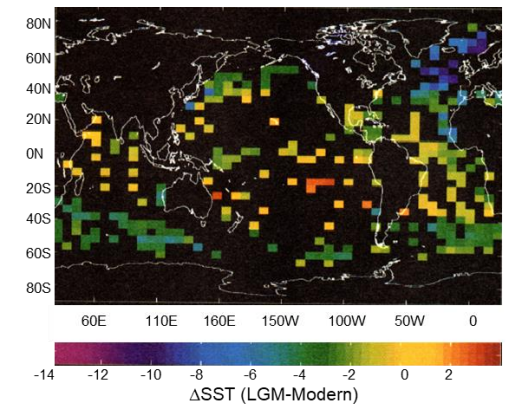
Trace gases



SST : conditions aux limites ou validation CLIMAP (1981)



Localisation points
CLIMAP dans une
grille de modèle

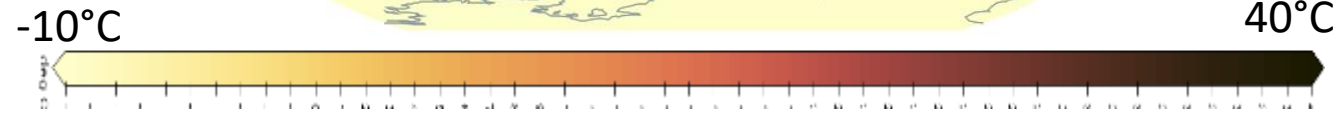
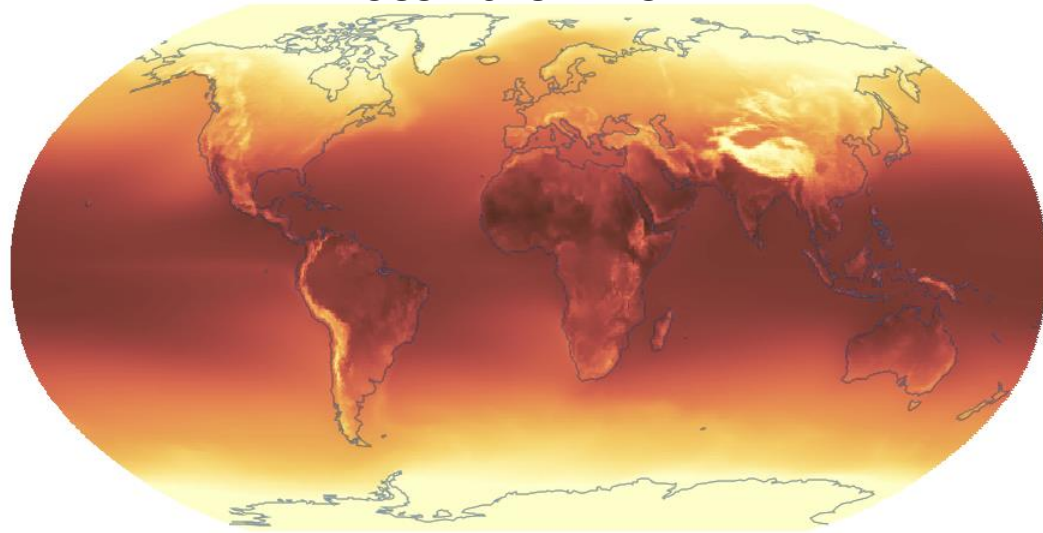


Broccoli & Marciniak, 1996

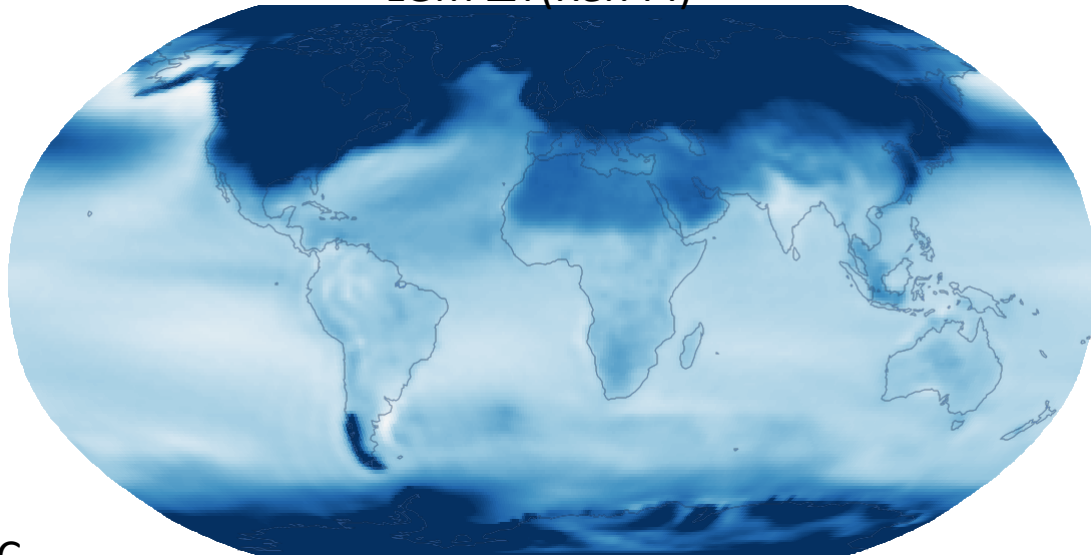
Mais : changement de végétation, poussières etc... négligés

Caractéristiques du climat du dernier maximum glaciaire

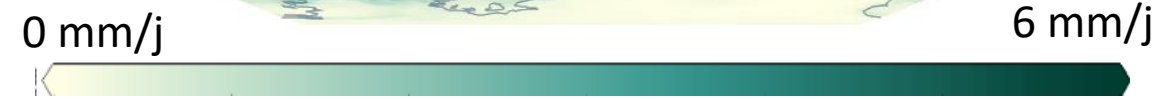
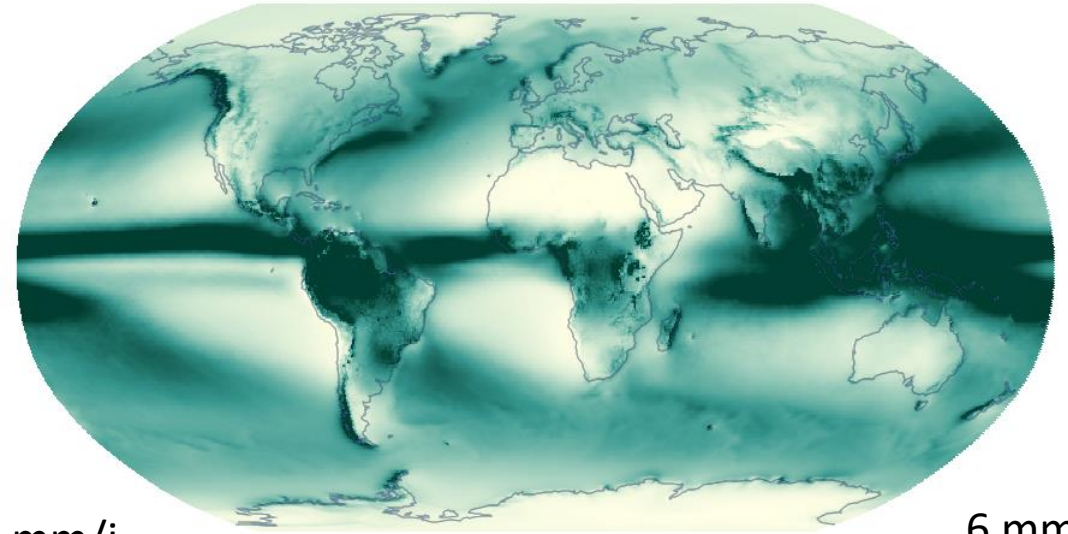
1985-2018 ERA5 T



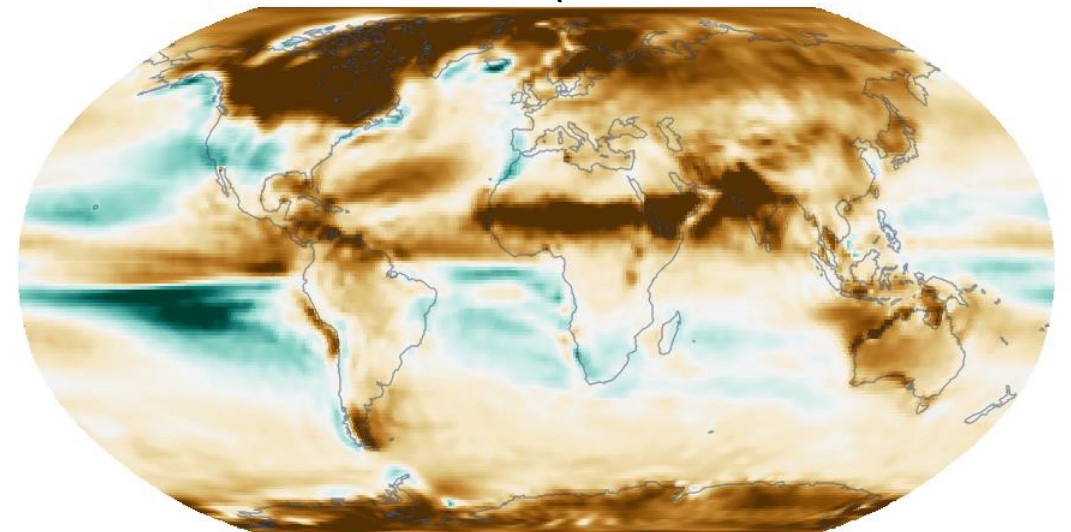
LGM ΔT (Ref: PI)



1985-2018 ERA5 Pr



LGM ΔPr (Ref: PI)



Exemple d'étude pionnière pour le DMG (1)

The influence of continental ice, atmospheric CO₂, and land albedo on the climate of the last glacial maximum

1987

A J Broccoli and S Manabe

Estimation du forçage radiatif

Conditions aux limites DMG Jeu de simulations

Calottes imposée

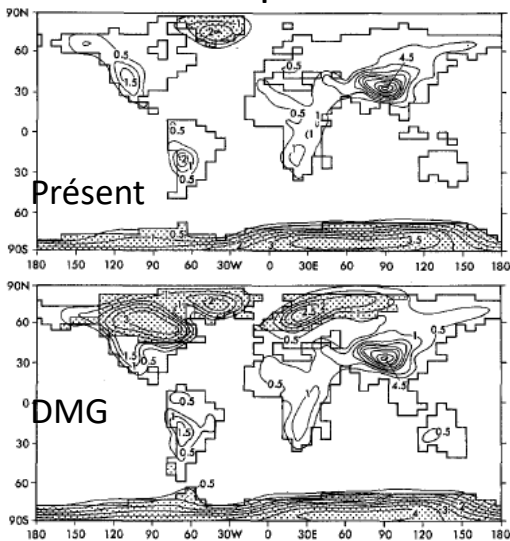


Table 1. Boundary conditions and length of analysis period for atmosphere-mixed layer ocean model experiments (*P*: present, *L*: last glacial maximum)

Experiment	E1	E2	E3	E4
Land-Sea Distribution	P	L	L	L
Continental Ice Distribution	P	L	L	L
Atmospheric CO ₂ Concentration (ppm)	300	300	300	200
Snow-Free Land Albedo Distribution	P	P	L	L
Length of Analysis Period (years)	15	8	6	8

Effets des différents facteurs obtenus pas comparaisons entre 2 simulations

$$\Delta R = \Delta SW_{TOA} - \Delta LW_{TOA}$$

Control Experiment	Perturbation	ΔR		
		Global	N. Hem.	S. Hem.
E1	LGM distribution of continental ice	-0.88	-1.71	-0.06
E3	atmospheric CO ₂ reduced to 200 ppm	-1.28	-1.24	-1.31
E2	LGM distribution of land albedo	-0.67	-0.77	-0.58

Température surface océan calculée (« slab »)

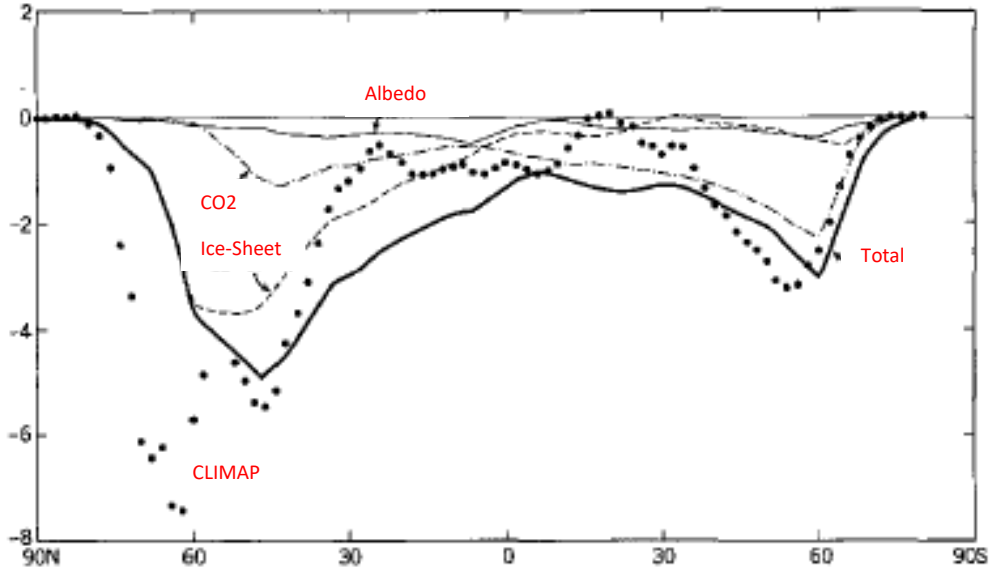
Nuages prescrits

CO₂ = 200 ppm

Fig. 1. Continental outlines, topography, and distribution of continental ice

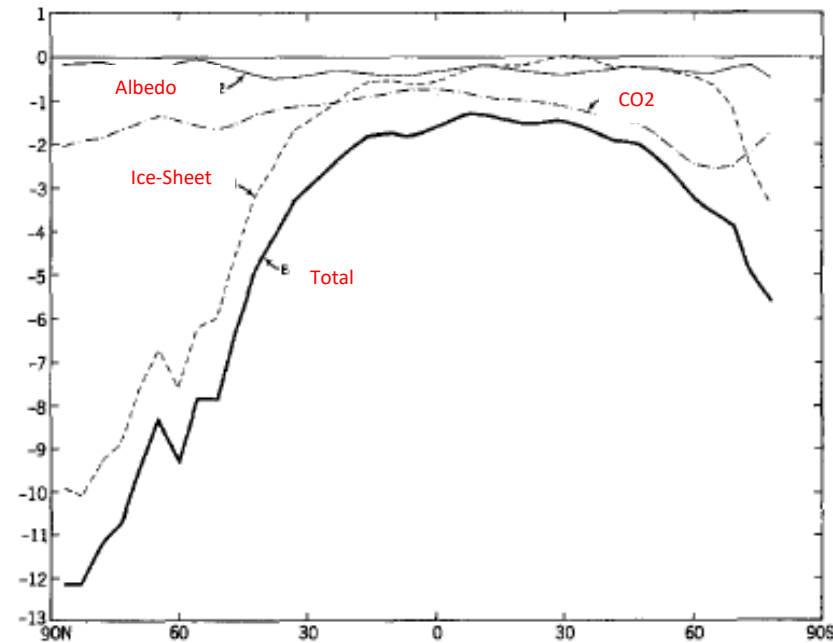
Broccoli et Manabe 1987 (suite)

Moyenne zonale température surface océan (SST) °C



		Global	N. Hem.	S. Hem.
E2-E1	(Ice Sheet)	-0.8	-1.6	-0.2
E4-E3	(CO ₂)	-1.0	-0.7	-1.1
E3-E2	(Albedo)	-0.2	-0.3	-0.2
E4-E1	(Combined)	-1.9	-2.6	-1.5
CLIMAP		-1.6	-1.9	-1.3

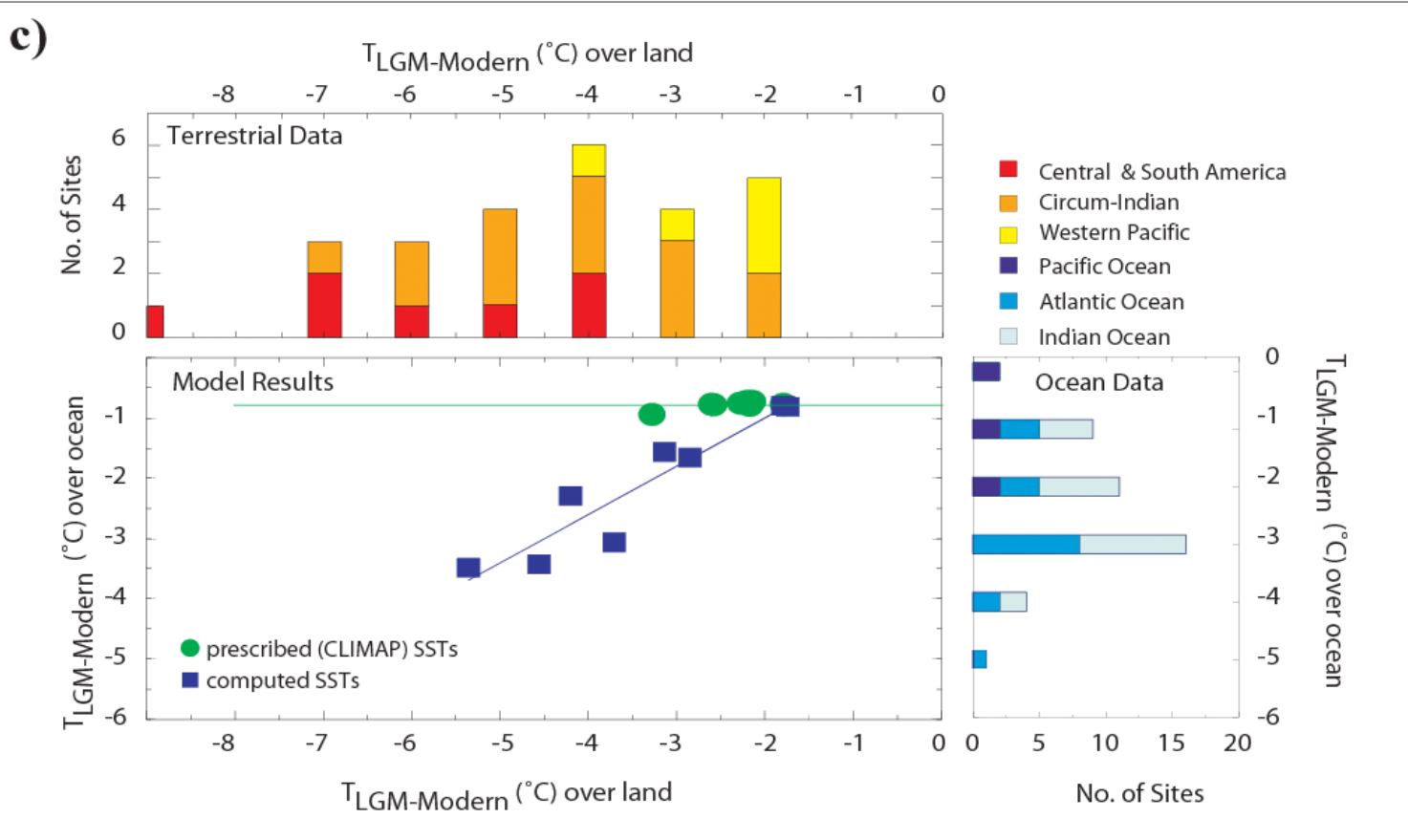
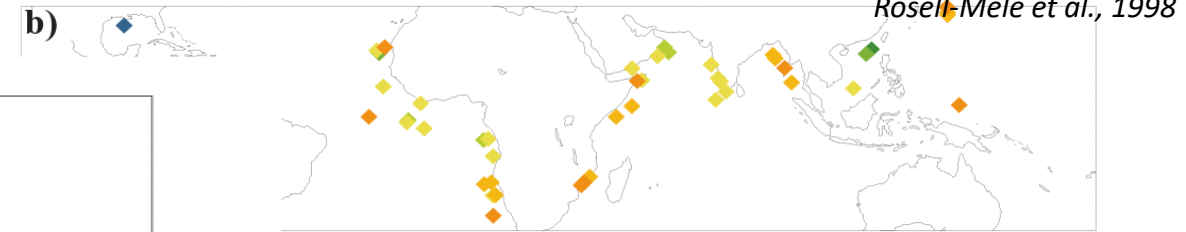
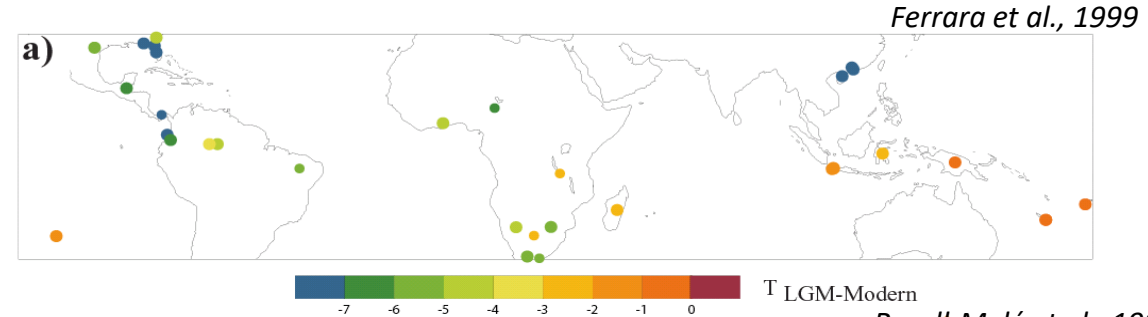
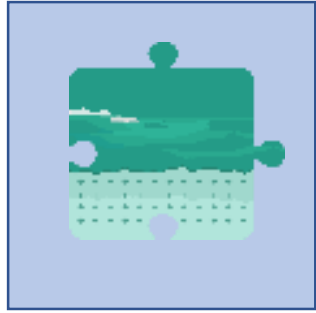
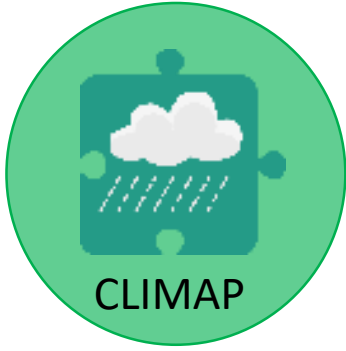
Moyenne zonale température de l'air °C



		Global	N. Hem.	S. Hem.
E2-E1	(Ice sheet)	-1.3	-2.4	-0.3
E4-E3	(CO ₂)	-1.2	-1.1	-1.3
E3-E2	(Albedo)	-0.3	-0.4	-0.3
E4-E1	(Combined)	-2.8	-3.9	-1.9

Points à noter : effet calotte limité à l'hémisphère nord (n'implique pas de changement de circulation interhémisphérique)
 Effet CO₂ ~équivalent entre les hémisphères ; SSTs simulées froides dans les tropiques par rapport à CLIMAP

Les tropiques au LGM : PMIP (atmosphère ou « atmosphère-slab » ocean)



Pinot et al 1999
Harrison, 2000

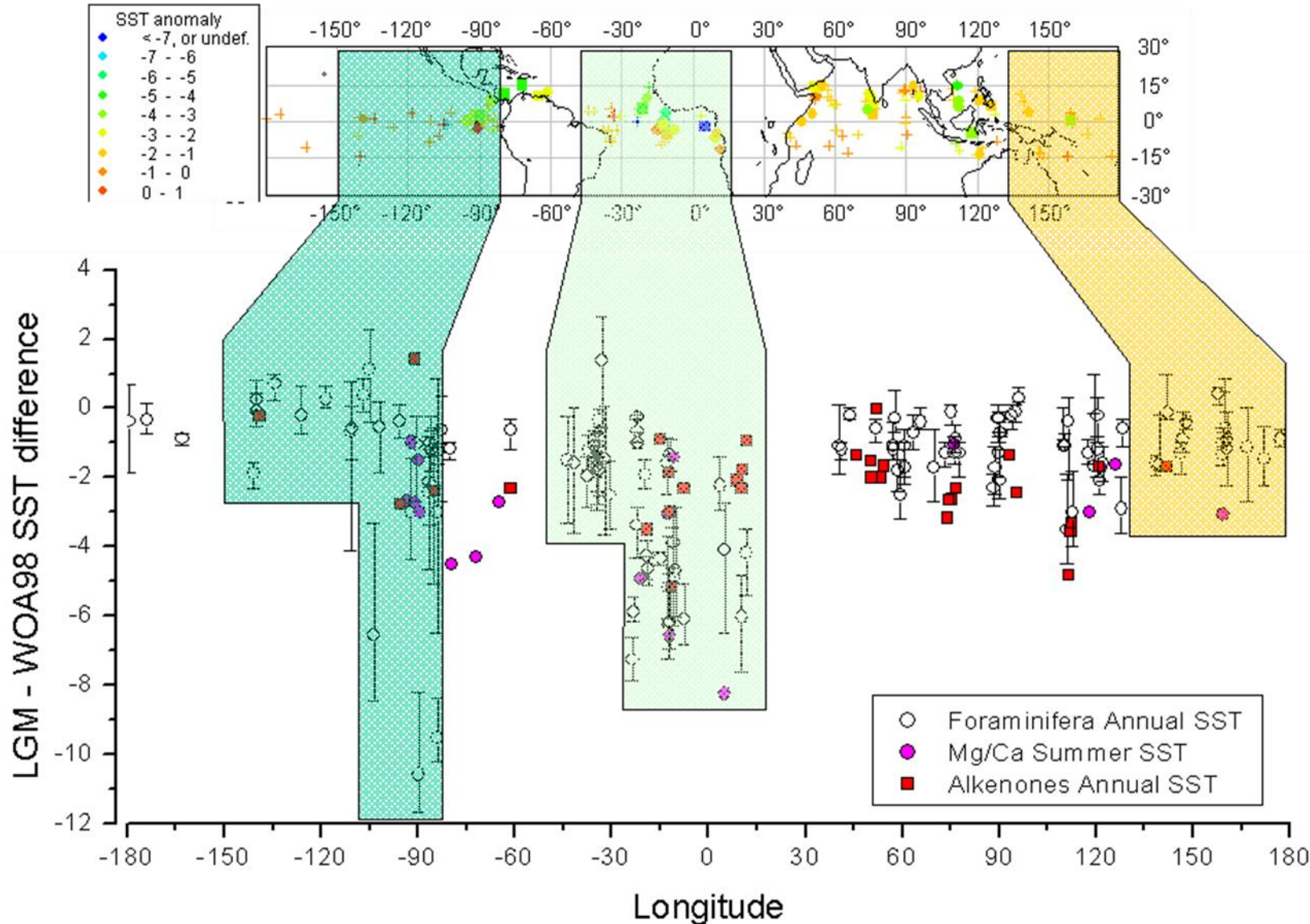
Les reconstitutions de SST

Une variable clé pour l'estimation de la sensibilité climatique (80% de la planète)

Difficulté : reconstruction des SST

LGM: Example for the tropics

From Schneider et al (MARGO)



Certaines différences marquées entre les indicateurs de SST suivant les régions

Interprétation/calibration des « proxies » en termes de température de surface

-> nouvelles reconstitutions, (soit/et):

- Meilleure couverture de données
- Fenêtre temporelle affinée
- choix de certains indicateurs
- Assimilations de données (modèles/données)

Reste une limitation majeure pour réduire l'incertitude de S

Forçages glaciaires et incertitudes

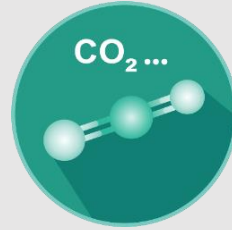
Estimation des forçages radiatifs pour le DMG



Forçages prescrits



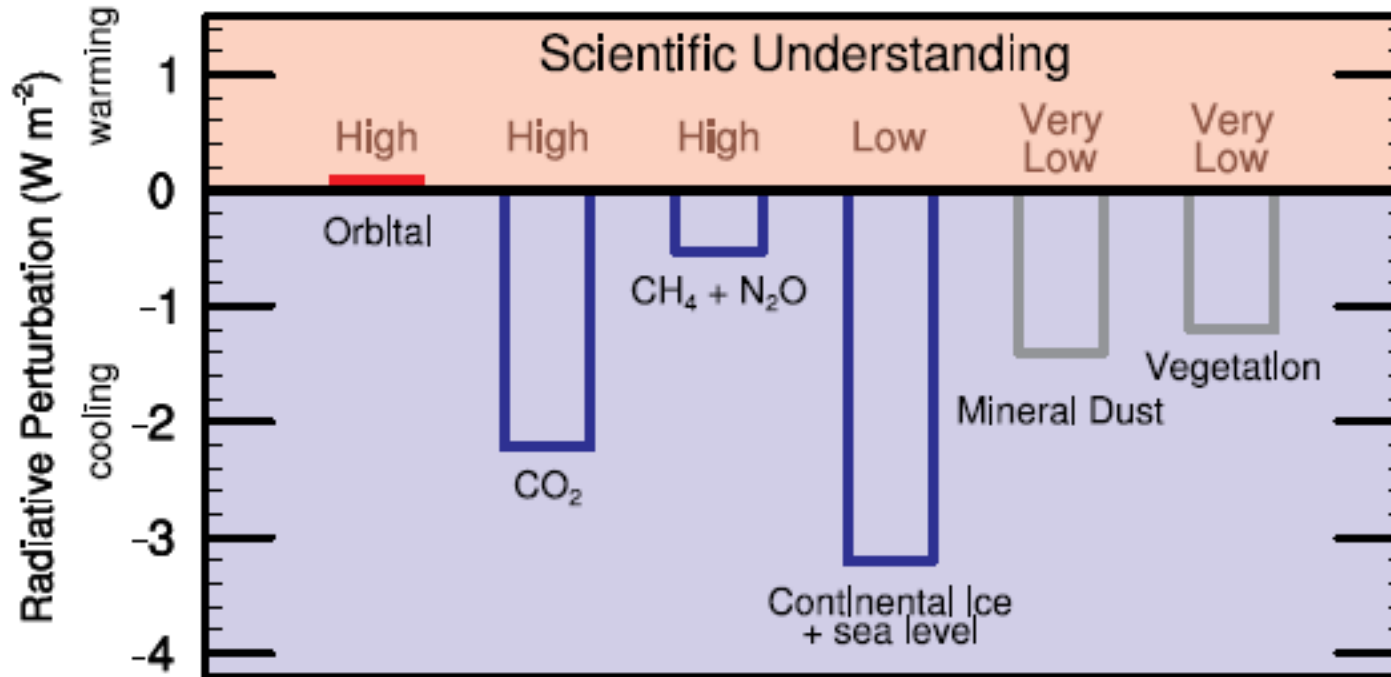
À partir de reconstitutions + modélisation



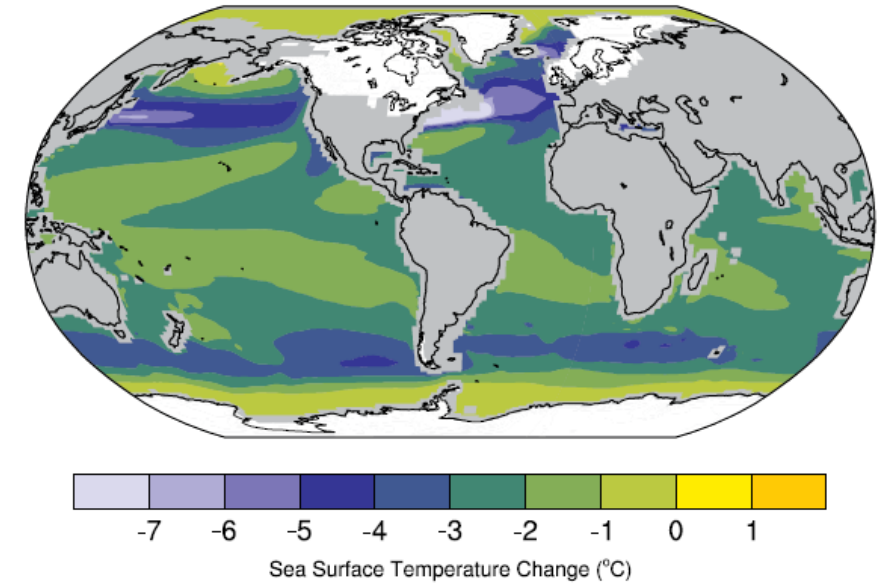
Carottages polaires
CO₂: 190 ppm



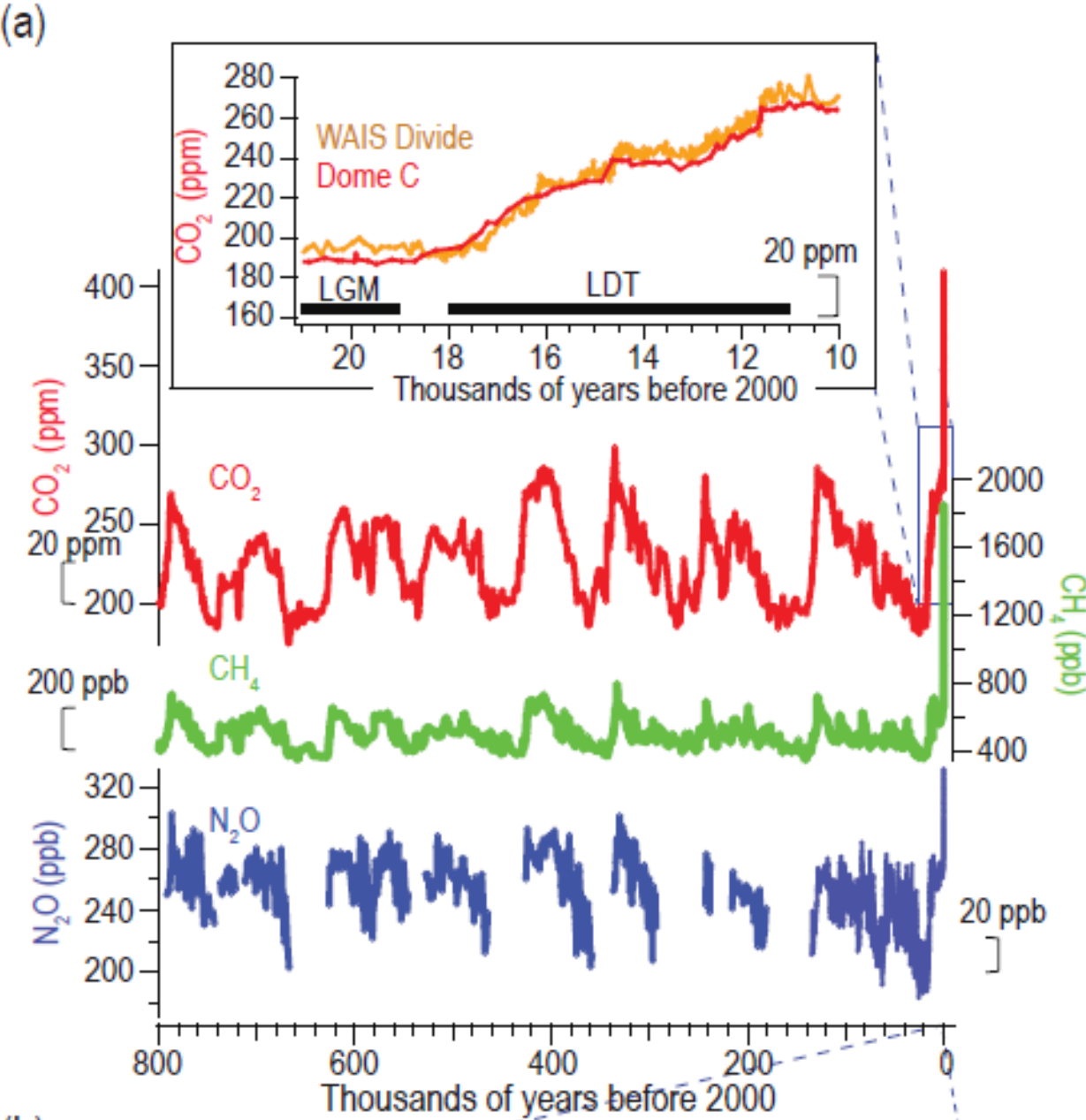
Astronomie
Faible pour LGM



Moyenne d'ensemble multi-modèles
Couplés océan-atmosphère (OAGCM)

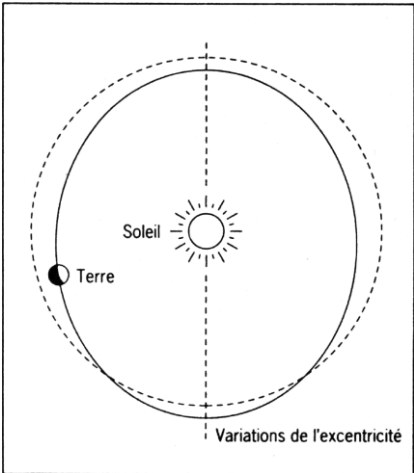


Composition de l'atmosphère : < 800 000 ans (à partir des carottes de glace)

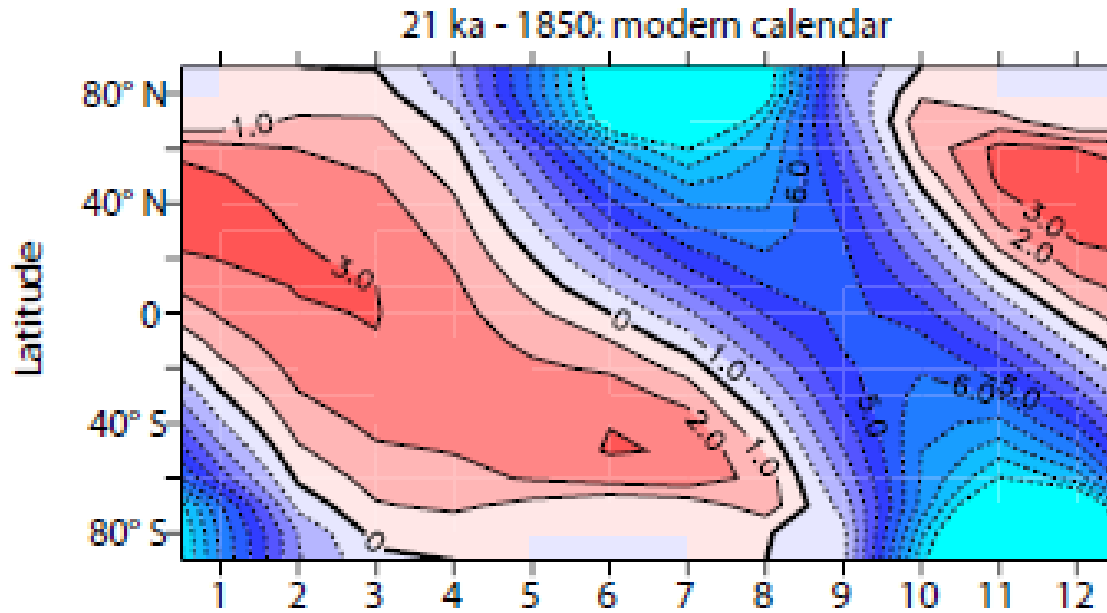
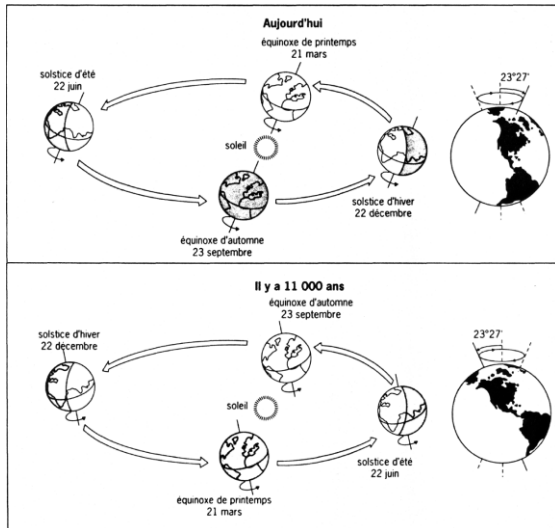
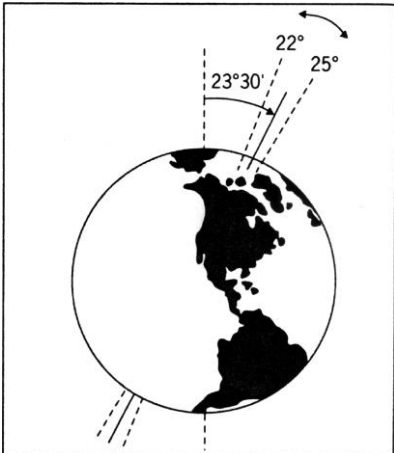


Insolation et paramètres orbitaux

Un moteur des changements de climat



Milutin Milankovitch
1924



Petit changement de
saisonnalité (très faible)
Moyenne globale
annuelle très faible

DMG

$e = 0.01899$

Obl: 22.95

Perihélie – 180 : 114,4

Equinoxe de printemps : 21 mars à 12h.

PI

$e = 0.01676$

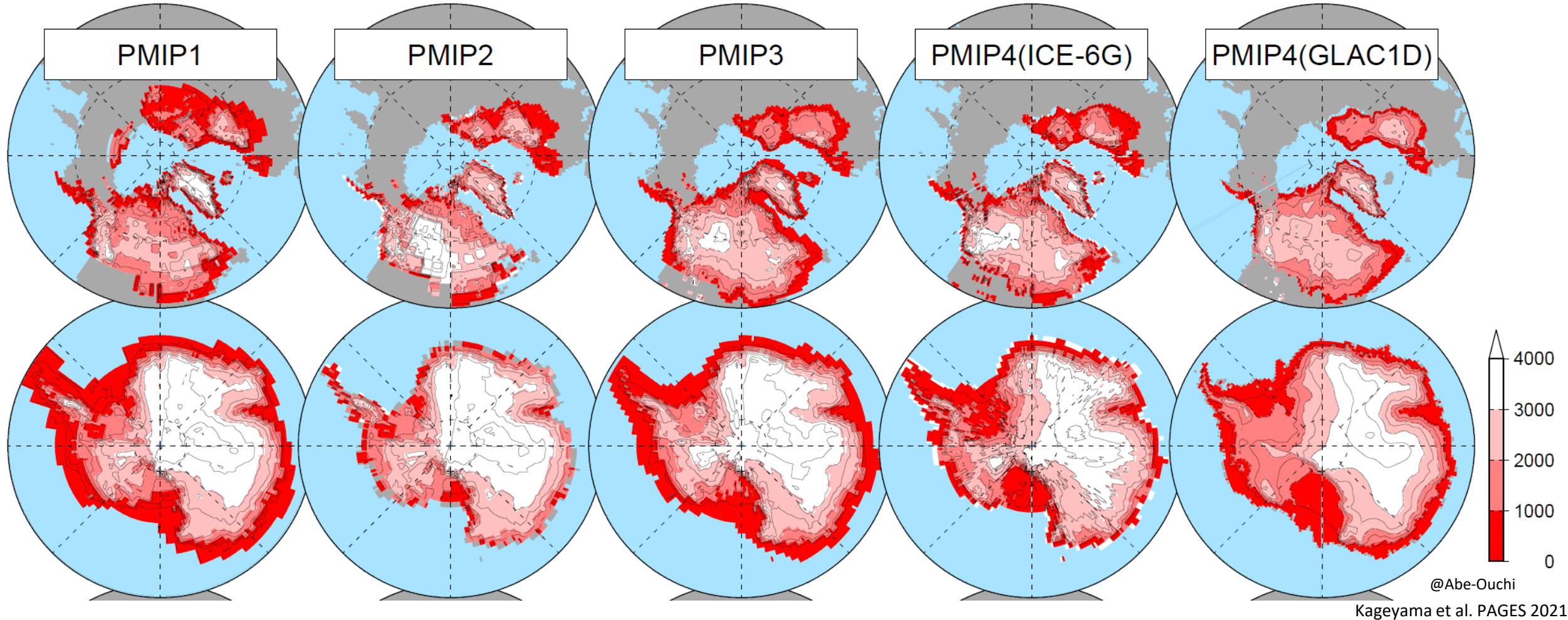
Obl: 23.46

Perihélie – 180 : 100,3

Attention : différences entre modèle liés à

- choix de la constante solaire;
- Calendrier (définition de la position de référence sur l'orbite);
- approximations dans les calculs d'orbite et de rayonnement incident

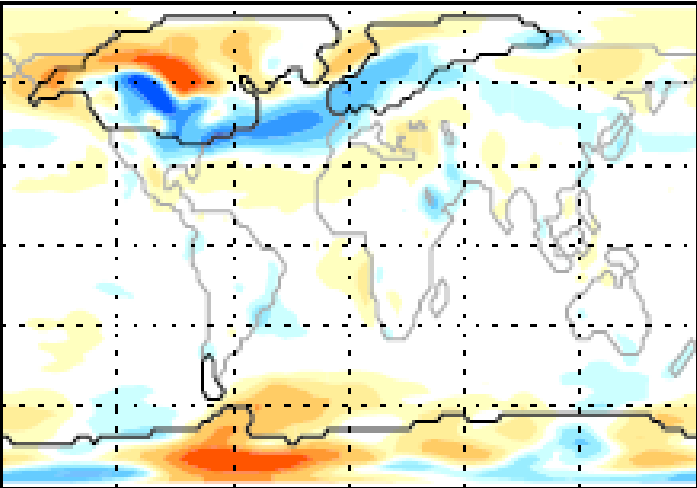
Des inconnues sur les calottes : source d'incertitude



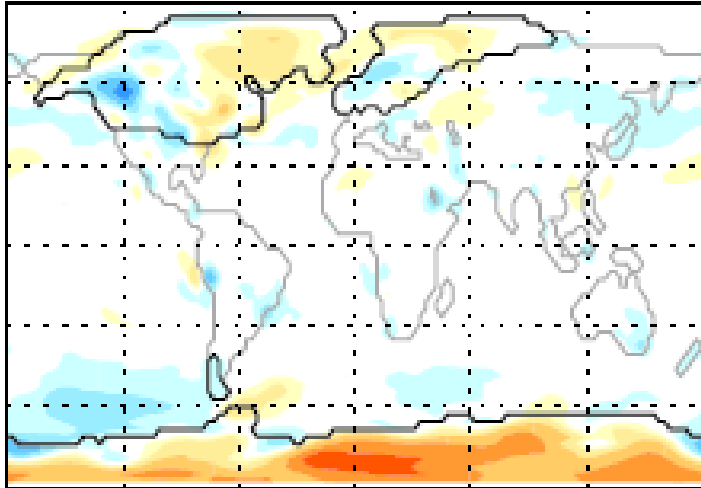
Impacte l'amplitude du refroidissement et les changements régionaux (circulation atmosphérique ET océanique)

Test de sensibilité à la calotte

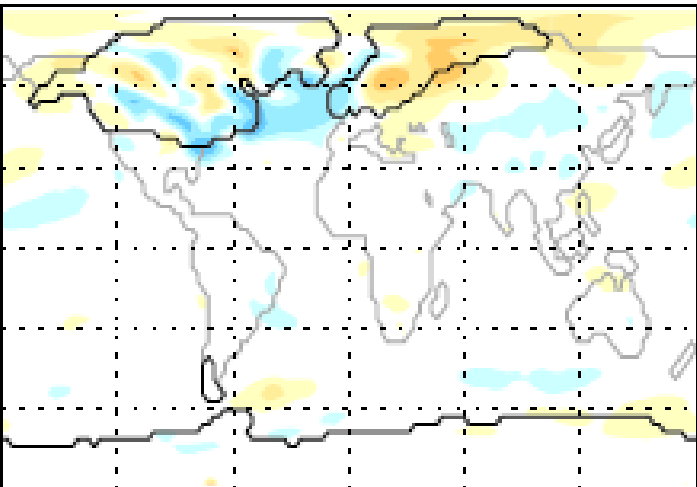
(a) PMIP2 – PMIP3 (MIROC_s)



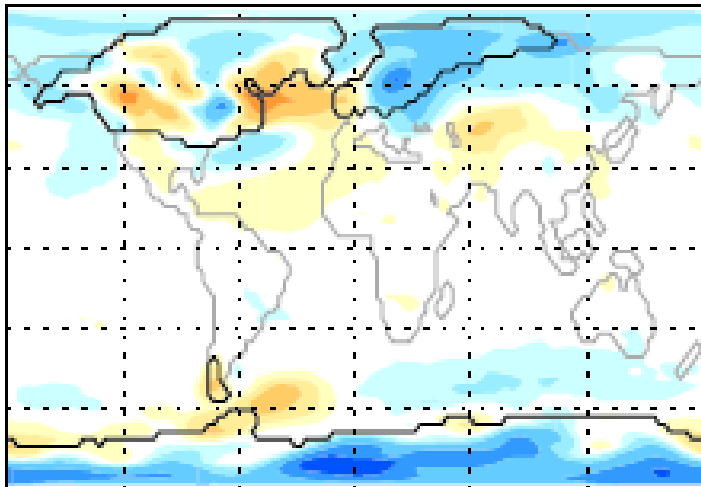
(b) ICE6G – PMIP3



(c) GLAC1a – PMIP3



(d) ANU – PMIP3



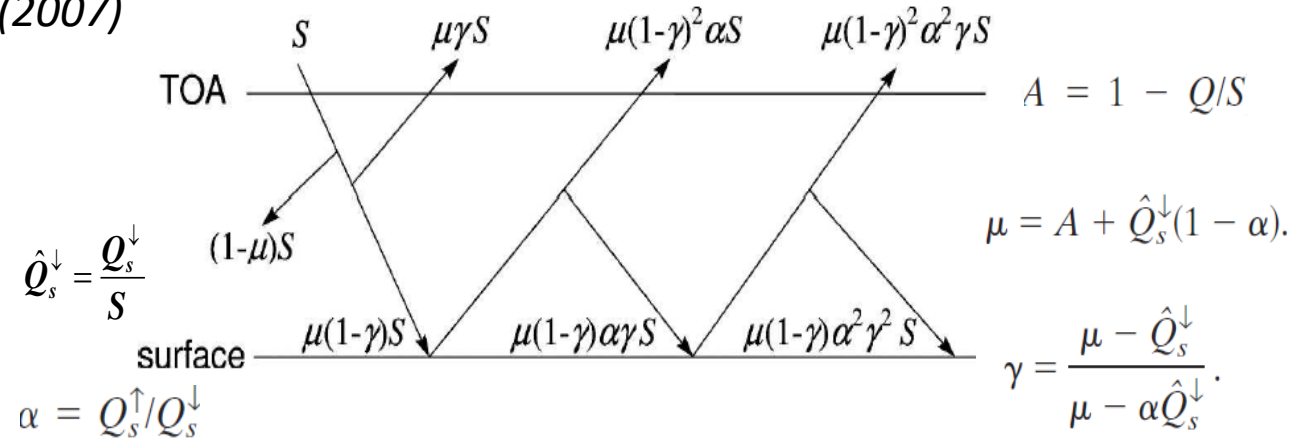
PMIP3 : choix fait de proposer une solution mergeant 3 reconstitutions (ICE5G, GLAC1, ANU)

Résultat obtenu avec le modèle MIROC

Estimation simplifiée de l'incertitude du forçage de la calotte

Méthode PRP simplifiée pour estimer les forçages et rétroactions SW

Taylor et al. (2007)



Seulement valide pour SW

Estimation de l'albédo planétaire, absorption atmosphérique, diffusion, ---→ Atmosphère équivalent

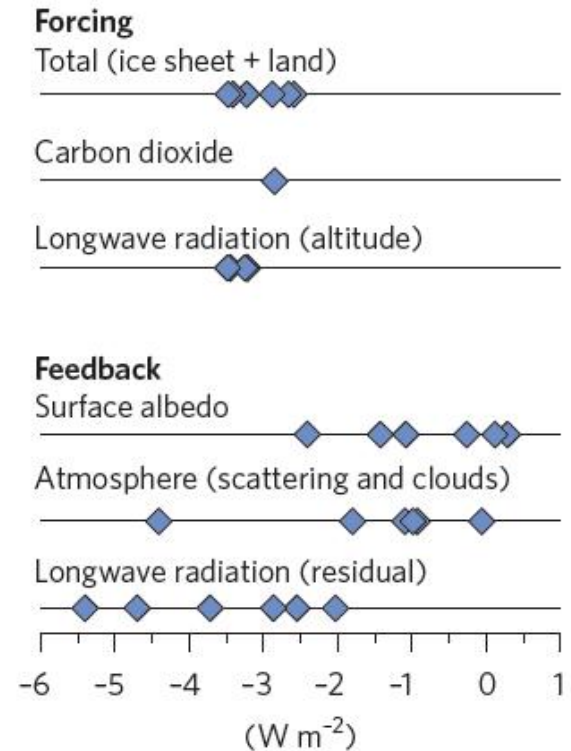
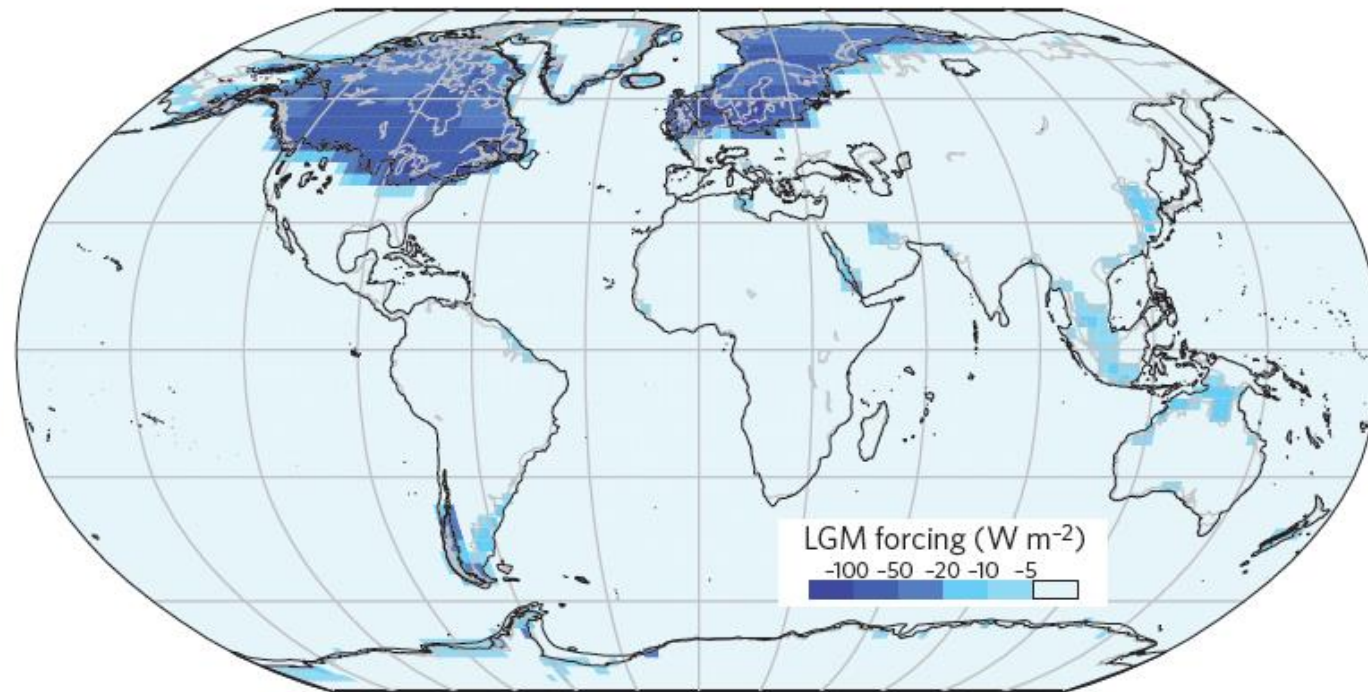
Test l'un après l'autre les effets liés à l'albédo de surface, aux propriétés de l'atmosphère ...

Pour les fractions ciel clair et ciel nuageux

Estimations réalisées en utilisant tour à tour simulation du climat preindustriel ou LGM comme situation de référence

Pout LW estimation de l'effet total (ensemble lapse rate, vapeur d'eau, nuages) $\sigma T_s^4 - LW_{TOA}$

Estimation approchée des forçages DMG et principales rétroactions (PMIP2)



IPCC 2007, Braconnot et al. NCC 2012,

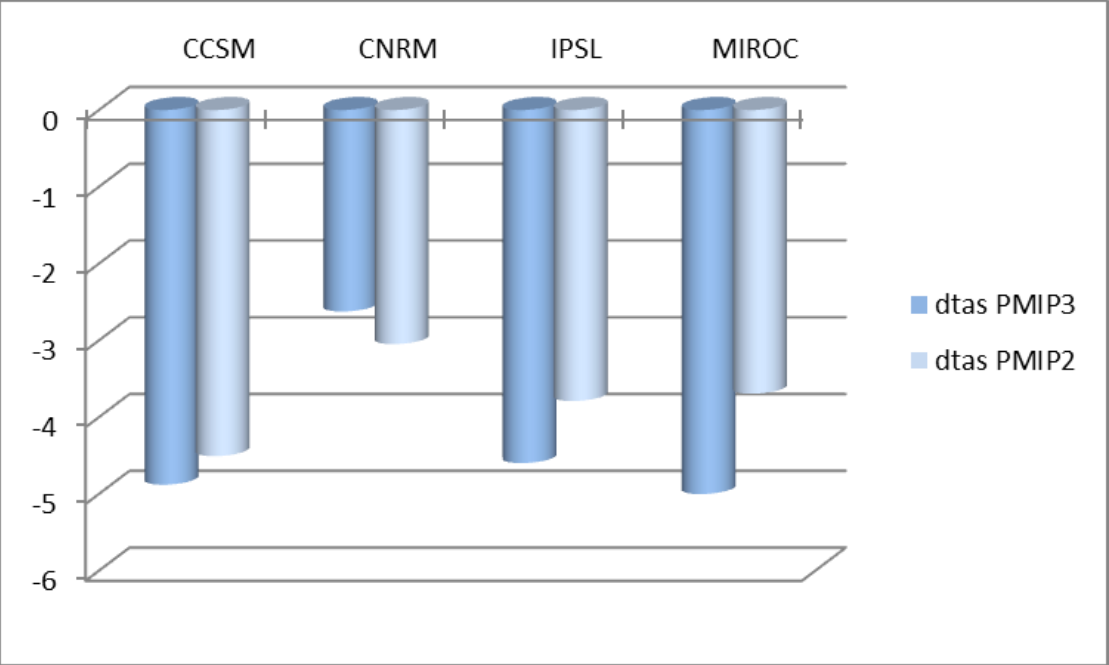
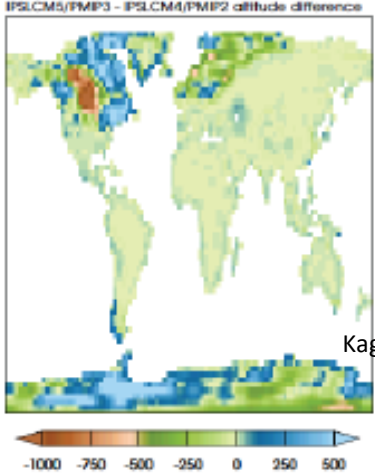
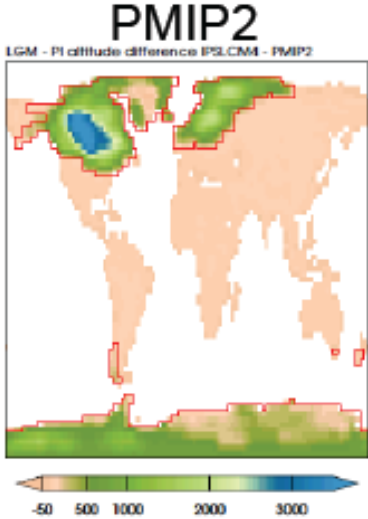
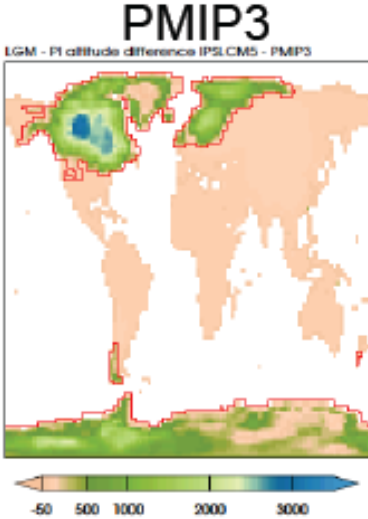
Même calotte pour les différentes simulations; différences viennent de l'albédo et implémentation de la calotte dans les modèles et en particulier calotte actuelle

Estimation des forçages pour modèles PMIP2 et PMIP3

On IPSL grid

Ice sheet reconstruction :

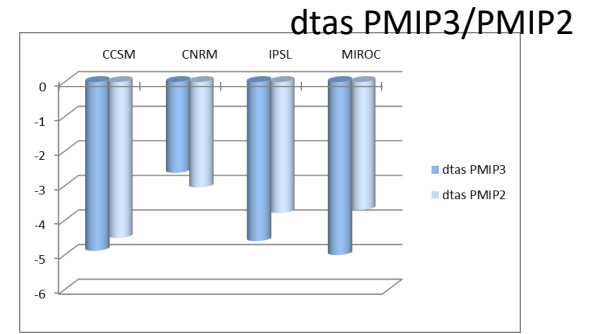
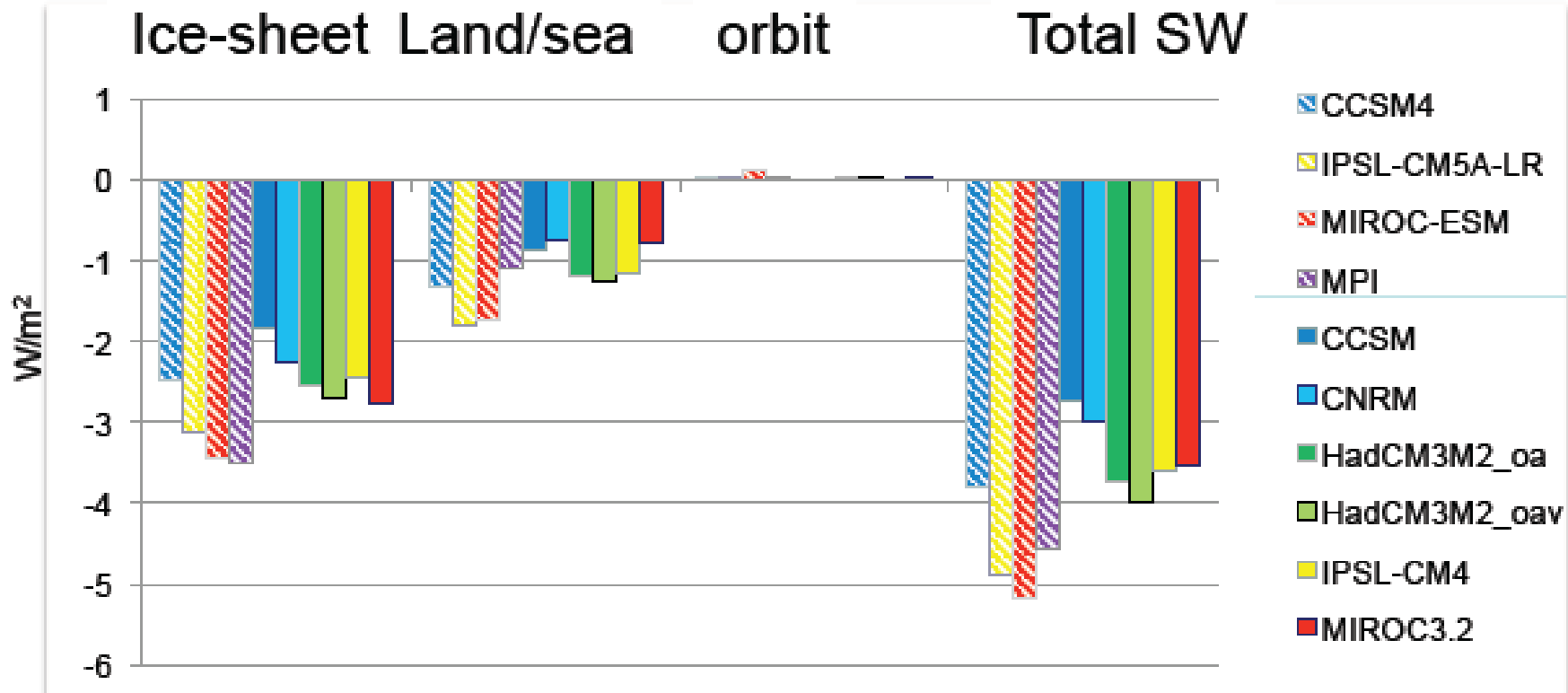
- PMIP2 : ICE5G (Peltier 2005)
- PMIP3 : blended ice-sheet (Braconnot et al. 2012, Abe-Ouchi et al. 2015)



Refroidissement LGM PMIP3/PMIP2



Estimation des forçages pour modèles PMIP2 et PMIP3 (2)



PMIP3

PMIP2

Forçage plus fort pour PMIP3 que PMIP2

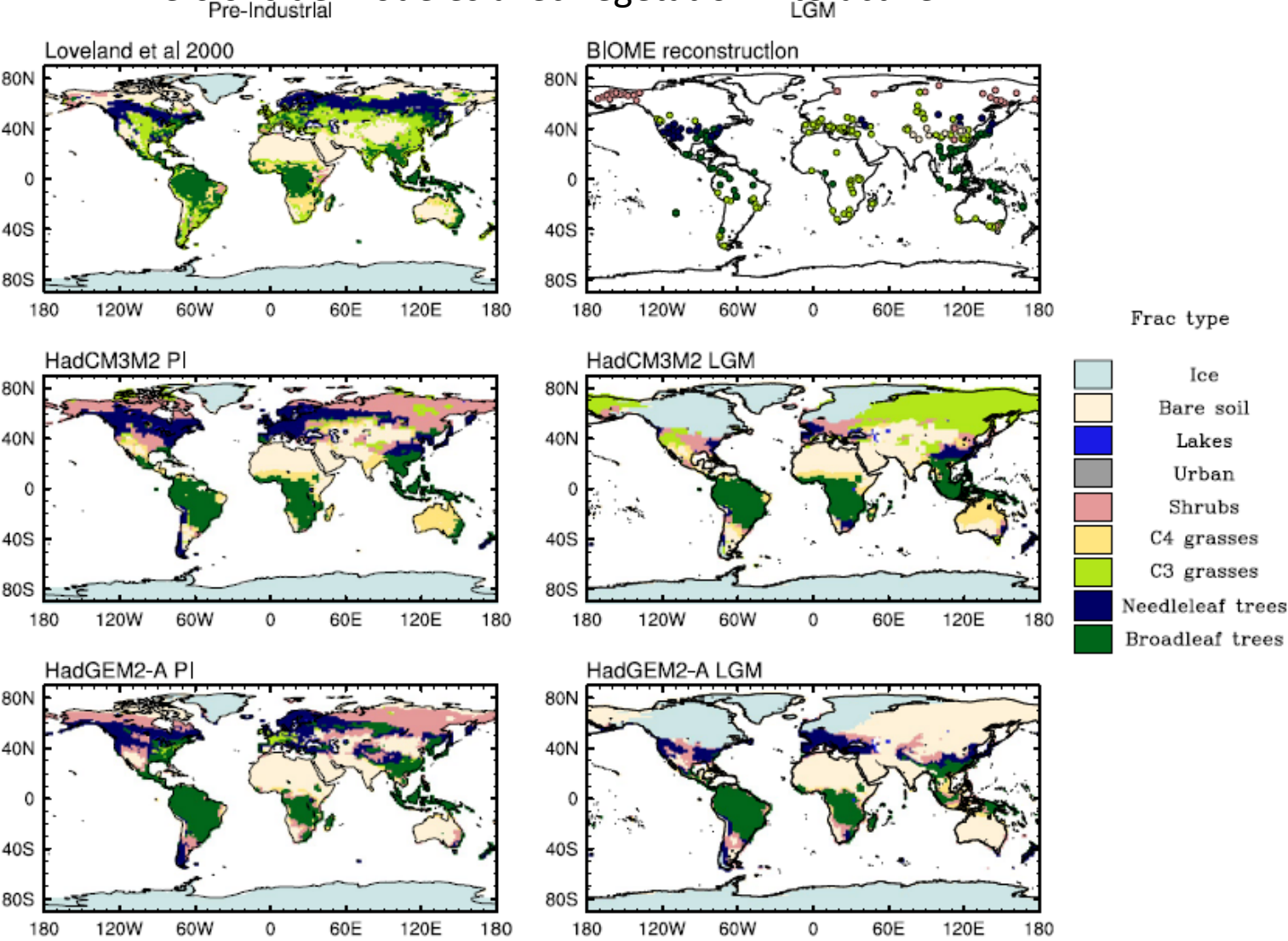
Entre modèles, lien avec l'albédo de la calotte ou de la surface suivant valeur assignée aux points qui émergent au DMG

Autres forçages/rétroactions

Pour le climat glaciaire (DMG)

Forçages ou rétroactions supplémentaires à considérer

X : 2 versions de modèles avec végétation interactive



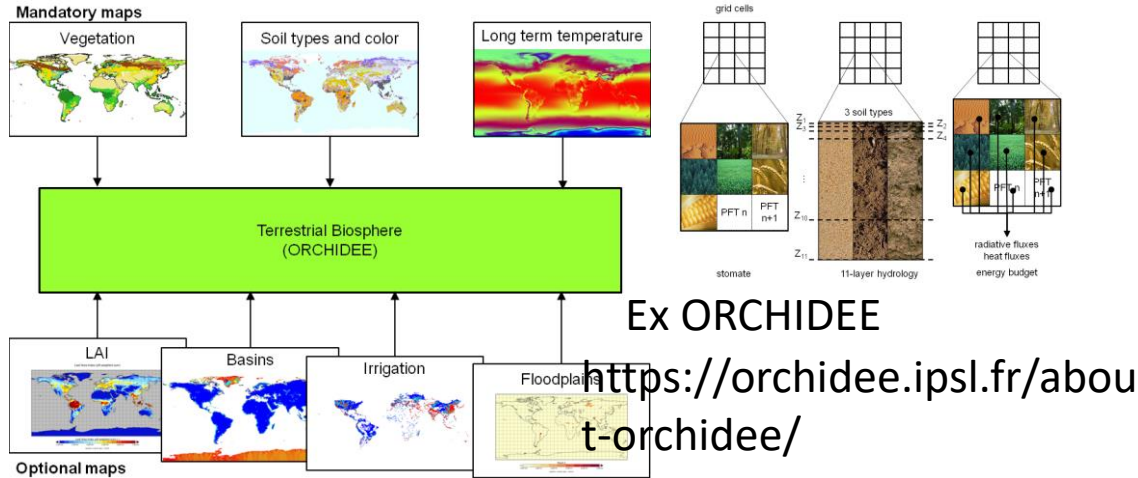
Manque de reconstitutions globales, pour avoir des estimations « fiables » à partir des reconstitutions issues de pollen

Synthèse des estimations : $\Delta F \sim -1.1 \pm 0.6 \text{ Wm}^{-2}$

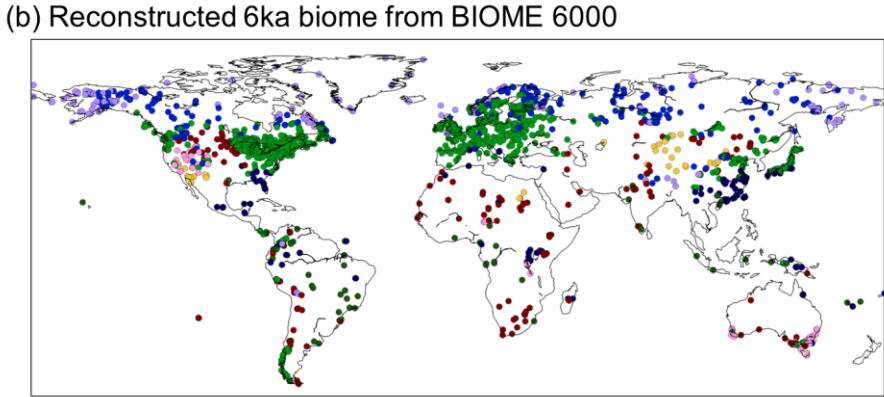
Sherwood et al. 2020

The land surface : vegetation and land surface still a big issue

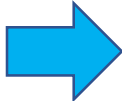
- Dealing with model complexity and different choices between groups



- Dealing with paleoclimate date availability



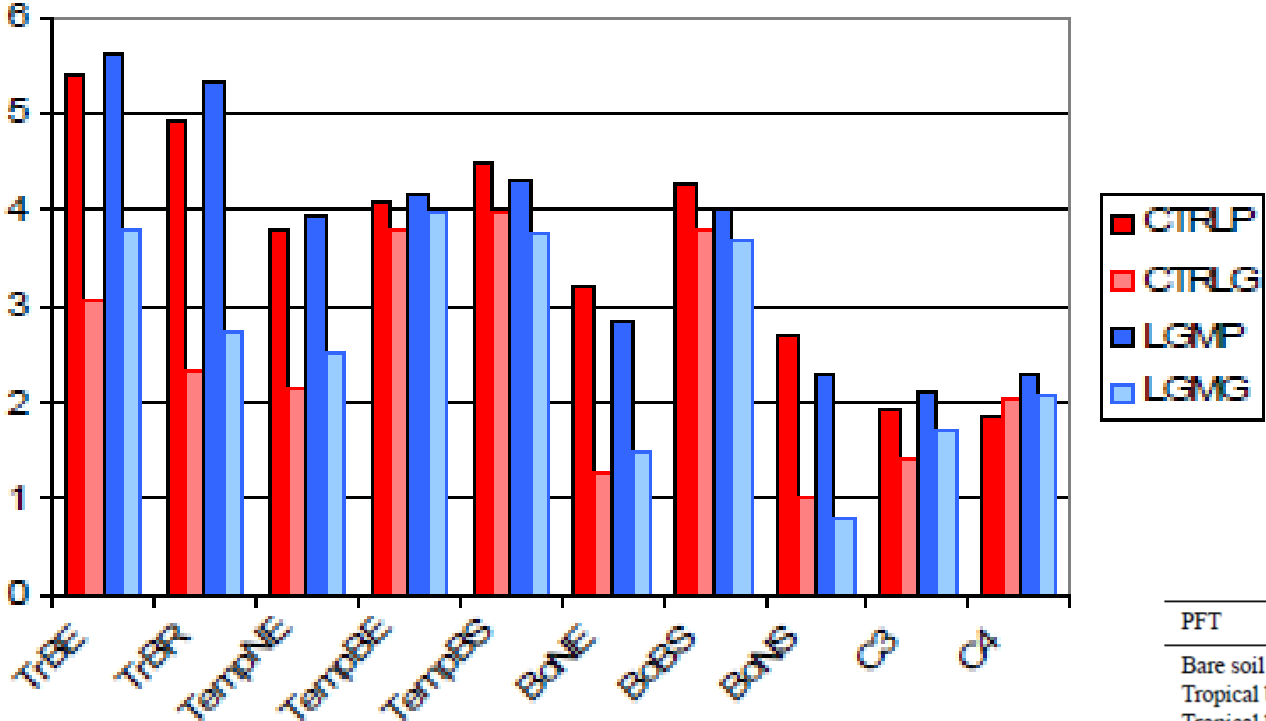
- Dealing with landuse/no landuse and what it means for the PI or reference simulation



Refine strategies to provide integrated evaluation of multi factors (coupling between energy, water, carbon cycles) affecting vegetation changes

Question sur l' effet physiologique du CO2 et impact sur la réponse du climat via la végétation

LAI : leaf area index (indice foliaire)

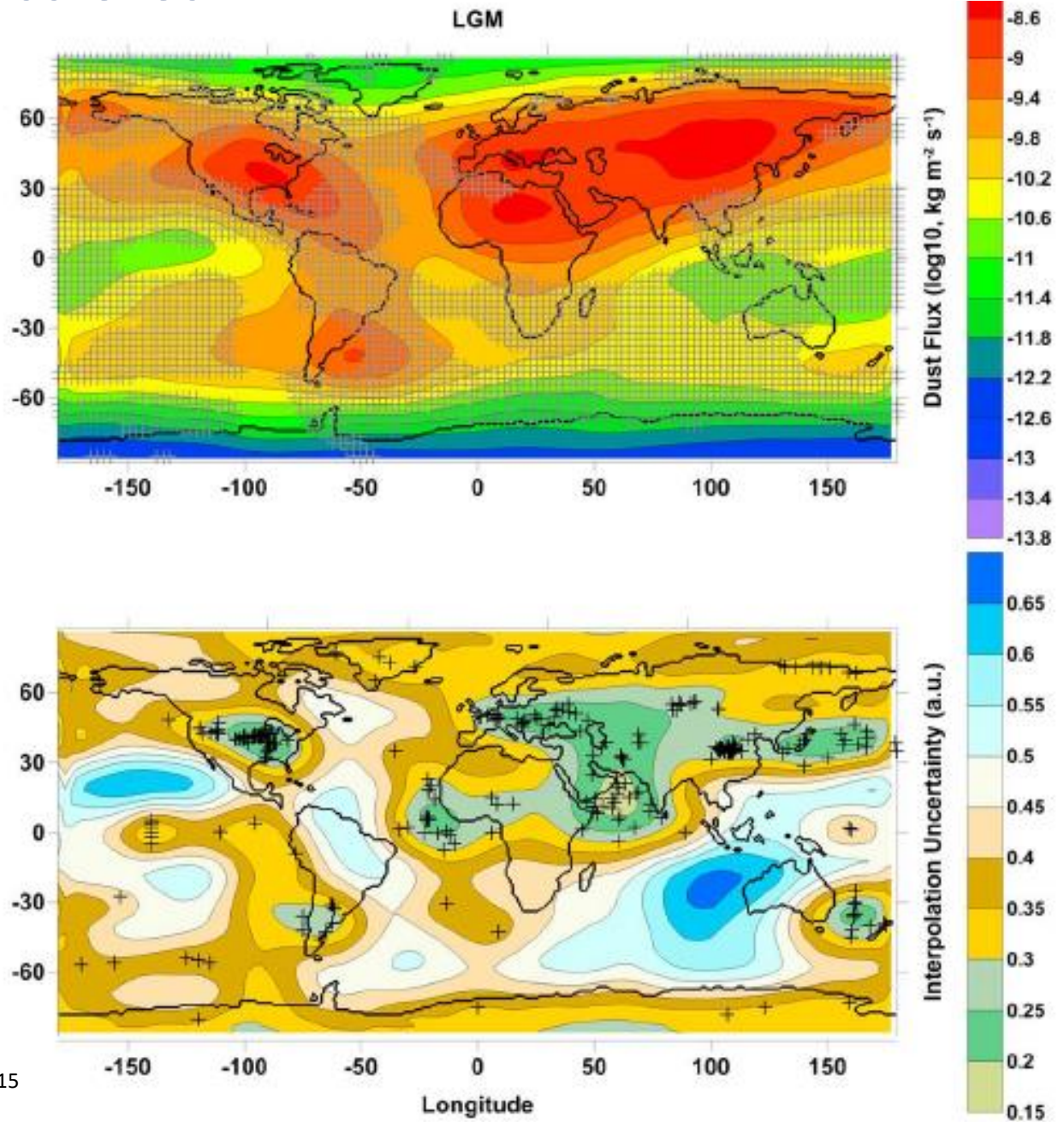


Types de plantes

Name	climatic forcings	CO ₂ level for photosynthesis
CTRLP	years 1930 to 1980 of the 20th century simulation (PRES), repeated 6 times	310 ppm
CTRLG	years 1930 to 1980 of the 20th century simulation (PRES), repeated 6 times	185 ppm
LGMP	1000 yr of LGM climate	310 ppm
LGMG	1000 yr of LGM climate	185 ppm

PFT	abbreviation
Bare soil	Bare soil
Tropical broadleaf evergreen trees	TrBE
Tropical broadleaf raingreen trees	TrBR
Temperate needleleaf evergreen trees	TempNE
Temperate broadleaf evergreen trees	TempBE
Temperate broadleaf summergreen trees	TempBS
Boreal needleleaf evergreen trees	BoNE
Boreal broadleaf summergreen trees	BoBS
Boreal needleleaf summergreen trees	BoNS
C3 grass	C3
C4 grass	C4

Les poussières



DMG : climat plus arides,
plus de poussières

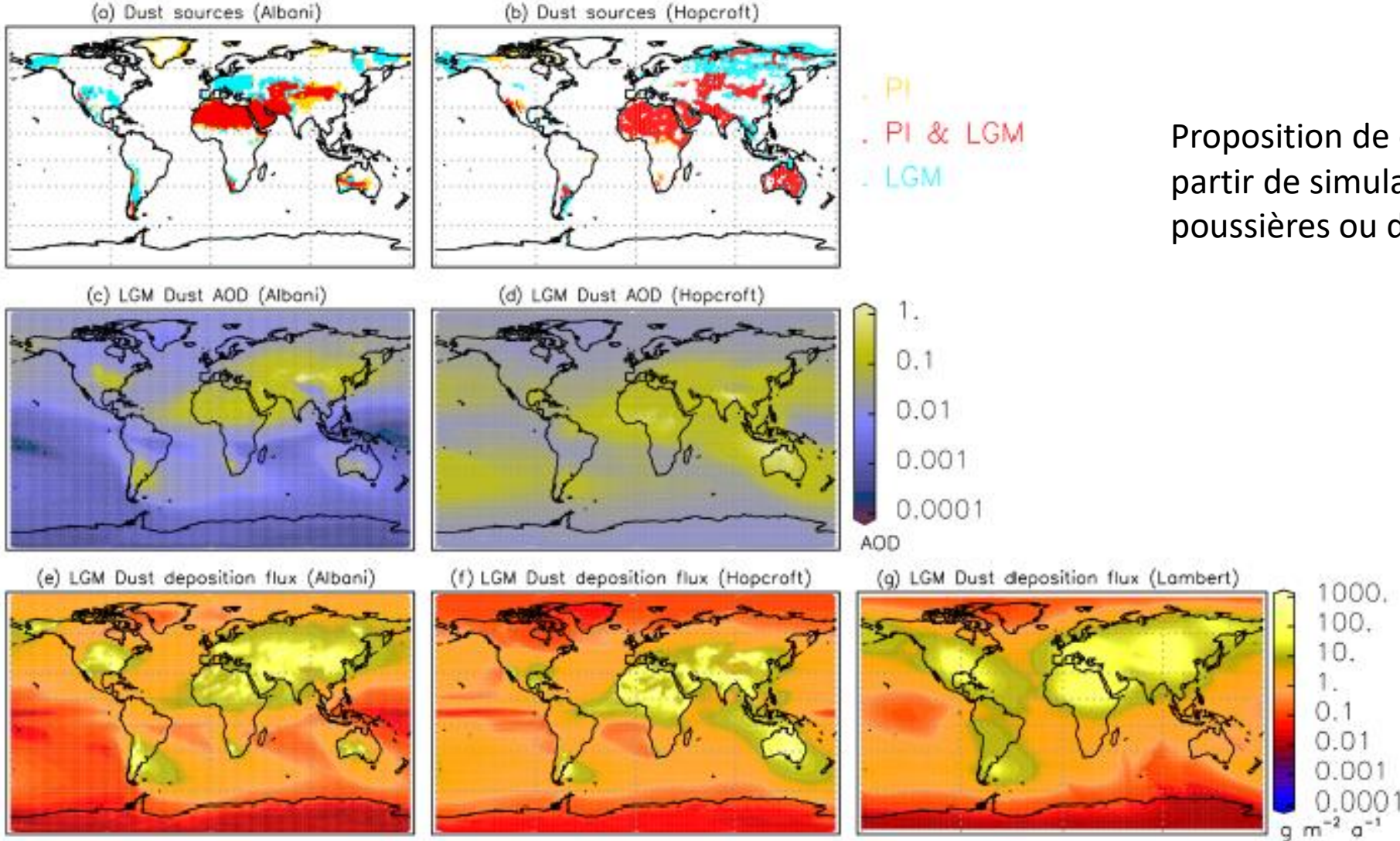
Flux poussières interpolé à partir
des données DIRTMAP3

Forçage incertains

Synthèse des estimations :
 $\Delta F \sim 0.1 \text{ à } -2.9 \text{ Wm}^{-2}$ soit $\sim -1 \text{ +/- } 1 \text{ Wm}^{-2}$

Sherwood et al. 2020

Les poussières



Proposition de choix pour PMIP4 à partir de simulation incluant les poussières ou d'une reconstitution

Contrainte LGM et climat froids sur la sensibilité climatique

Modèle

$$\Delta N = \Delta F + (\lambda - \Delta\lambda)\Delta T$$

Sherwood et al 2020

Valeur à estimer

$\Delta\lambda_{state} + \Delta\lambda_{pattern}$

$$S = -\frac{\Delta F_{2xCO2}}{\lambda}$$

$$ECS = (1 + \zeta)S.$$

Pour paléo tient compte des rétroactions lentes (temps ajustement)

Carte Bayésien

Densité de probabilité à postérieure (ce que l'on cherche)

Probabilité de E pour un Φ donné « vraisemblance »

$$p(\Phi|E) = \frac{p(E|\Phi)p(\Phi)}{p(E)}$$

« prior » pour F

Evidence pour Φ

Vecteur des variables (rétroactions, forçages changement de température Paramètres décrivant les λ et S

Probabilité totale pour E (normalisation)

Pour cas sensibilité traité

$$p(E|\Phi) = p(E_{proc}|\Phi)p(E_{hist}|\Phi)p(E_{paleo}|\Phi),$$

$$\Delta T = f(\Phi'),$$

Contraintes sur la sensibilité climatique apportée par le LGM et glaciaires-interglaciaires

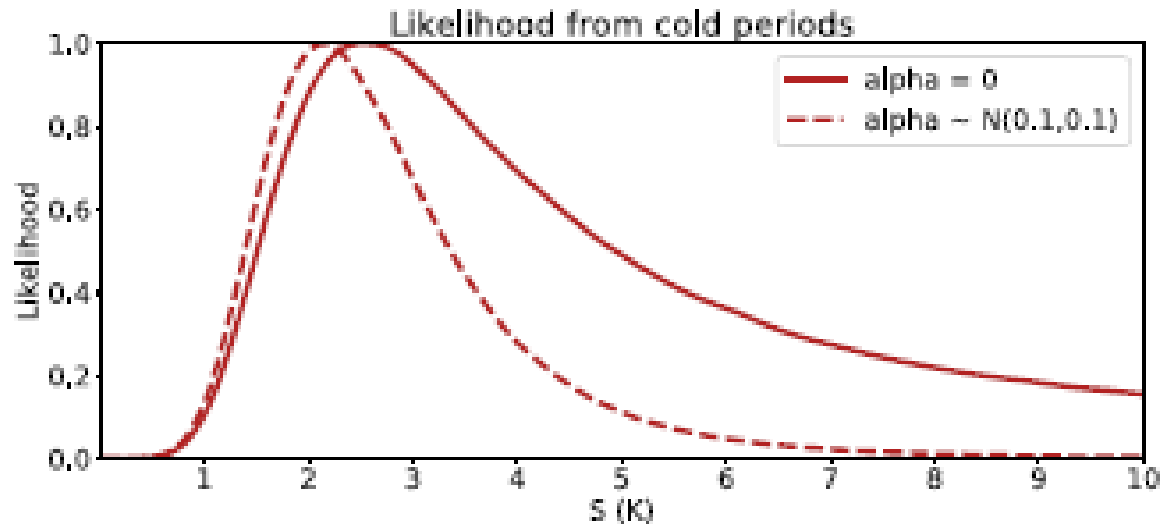


Figure 15. Likelihood arising from cold-period evidence (solid line). Dashed line shows the likelihood that would arise if state dependence of λ were omitted ($\alpha = 0$).

Table 7

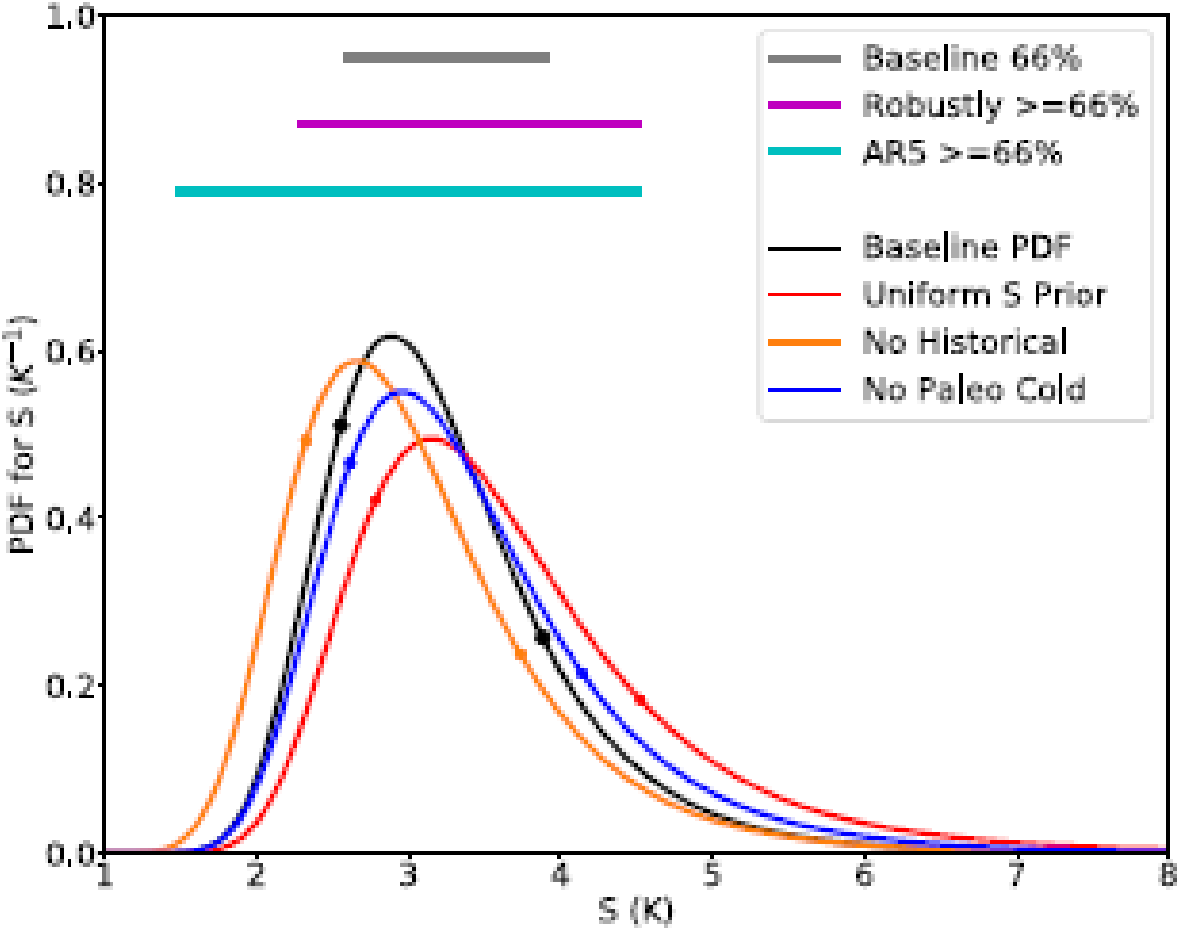
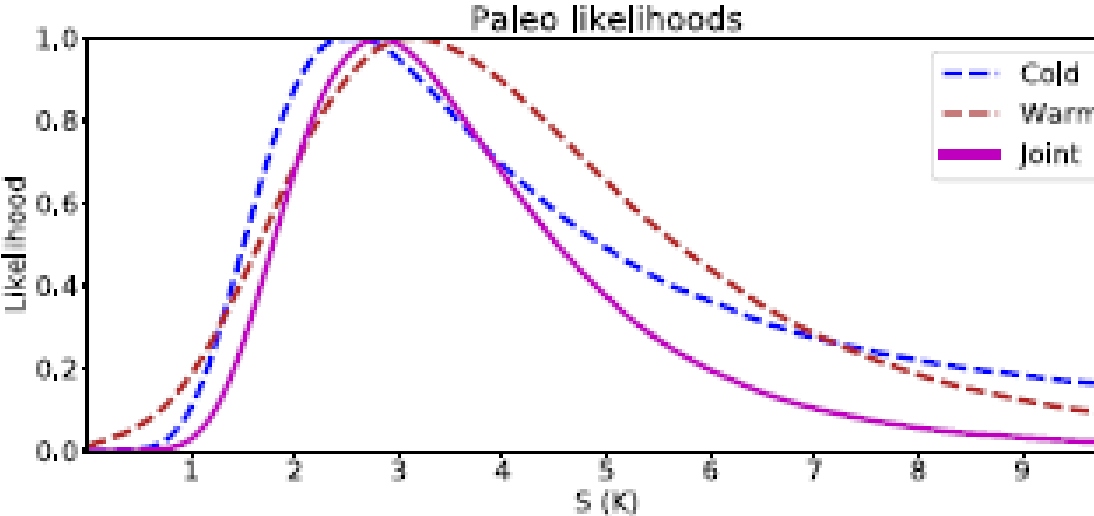
Parameters of the Distributions That Are Used to Estimate S From the Cold Climate States, Equation 22

Term	Distribution
ΔT (K)	$N(-5, 1)$
ΔF_{2xCO_2} ($W\ m^{-2}$)	$N(4.0, 0.3)$
$\Delta F'$ ($W\ m^{-2}$)	$N(-6.15, 2)$
α	$N(0.1, 0.1)$
ζ	$N(0.06, 0.2)$

$$\Delta T = \frac{-(-0.57 \Delta F_{2xCO_2} + \Delta F')}{\frac{\lambda}{1 + \zeta} + \frac{\alpha}{2} \Delta T}$$

↖ Non CO2 part of forcing
↙ Adjustment time effect ↘ « state dependence »

Combinaison des différentes informations



Les autres périodes

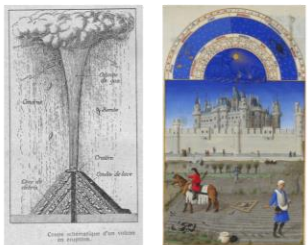
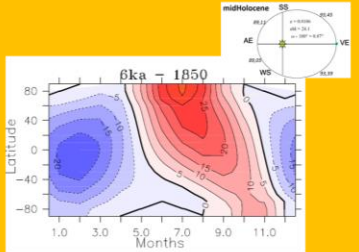

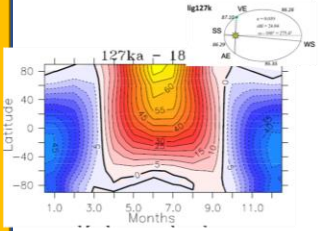
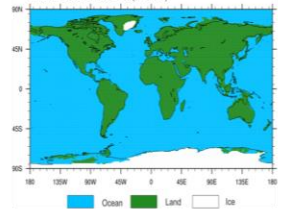
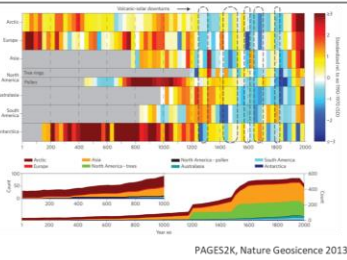
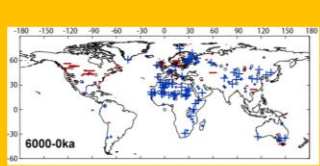
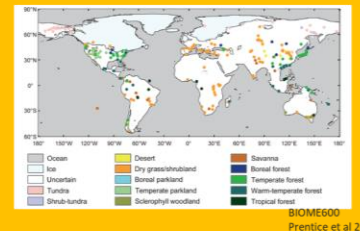
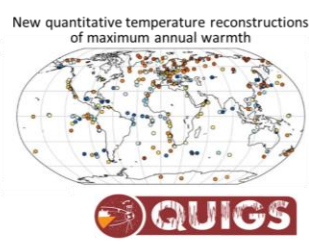
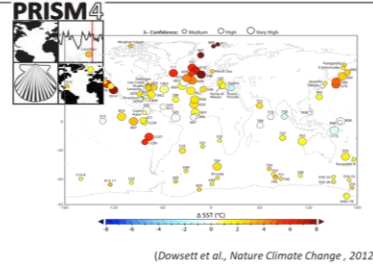
Les 5 périodes de référence :

Period

Why

How

EX paleo data

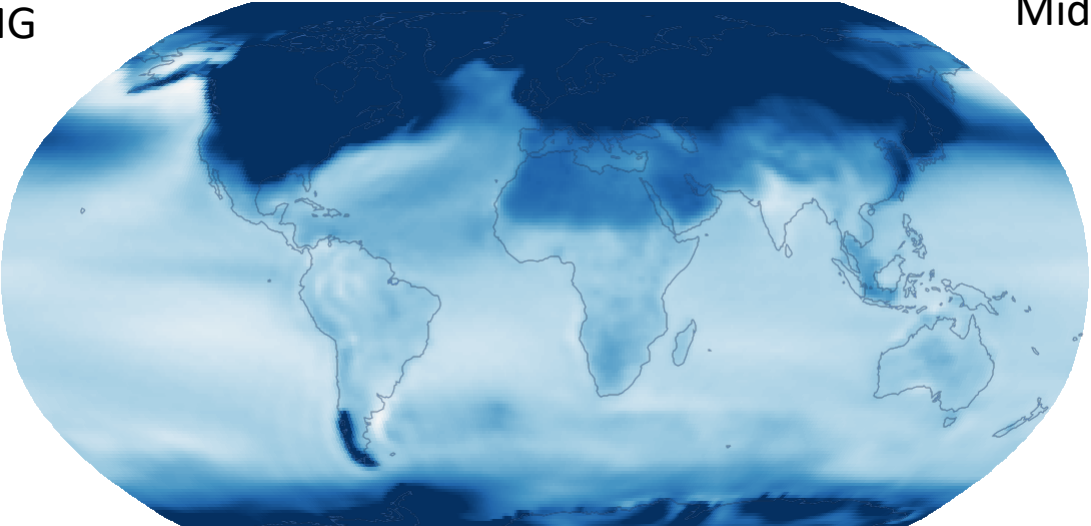
Period	Mid-Holocene 6000 years ago	Last Glacial Maximum 21000 years ago	Last Interglacial ~127000 years ago	Mid-Pliocene Warm Period ~3.2 million years ago
<p>Last Millenium 850-1850 AD</p> 				
<p>a) observed variability (multi-decadal and longer time-scales) b) Internal variability vs. external forcing (volcanic, solar, land use) c) Longer-term perspective for detection and attribution studies</p>	<p>a) Comparison to paleodata for a warmer climate in the NH, with enhanced hydrological cycle (monsoons) b) Mean climate and variability</p>	<p>a) Comparison to paleodata for an extreme cold climate, b) Attempt to provide empirical constraints on global climate sensitivity.</p>	<p>a) Model evaluation for warm period, high sea-level stand b) Impacts of smaller ice-sheets/higher sea-level on climate</p>	<p>a) Evaluation of response to long term to CO2 forcing analogous to that of the modern? b) Impact of smaller ice-sheets, higher-sea-level</p>
<ul style="list-style-type: none"> Solar variations Volcanic aerosols Well mixed greenhouse gases Land use Orbital parameters 	<ul style="list-style-type: none"> Orbital parameters Atmospheric concentration of well-mixed greenhouse gases Dust (if possible) Interactive vegetation (if possible) 	<ul style="list-style-type: none"> Ice-sheet and land-sea mask Greenhouse concentration of well-mixed greenhouse gases Orbital parameters Dust (if possible) Interactive vegetation (if possible) 	<ul style="list-style-type: none"> Orbital parameters Greenhouse concentration of well-mixed greenhouse gases 	<ul style="list-style-type: none"> Ice-sheet and land-sea mask, topography (smaller ice-sheets) Greenhouse concentration of well-mixed greenhouse gases
 <p>PAGES2K, Nature Geoscience 2013</p>	<p>PMIP systematic benchmarking data sets (examples)</p> 	 <p>BIOME6000 Prentice et al 2011</p>	<p>New quantitative temperature reconstructions of maximum annual warmth</p>  <p>QUIGS</p>	 <p>PRISM4 (Dowsett et al., Nature Climate Change, 2012)</p>

Depuis PMIP1 en 1991

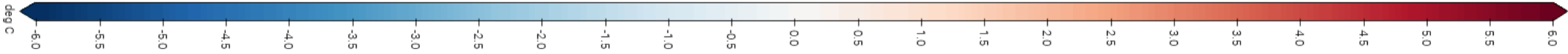
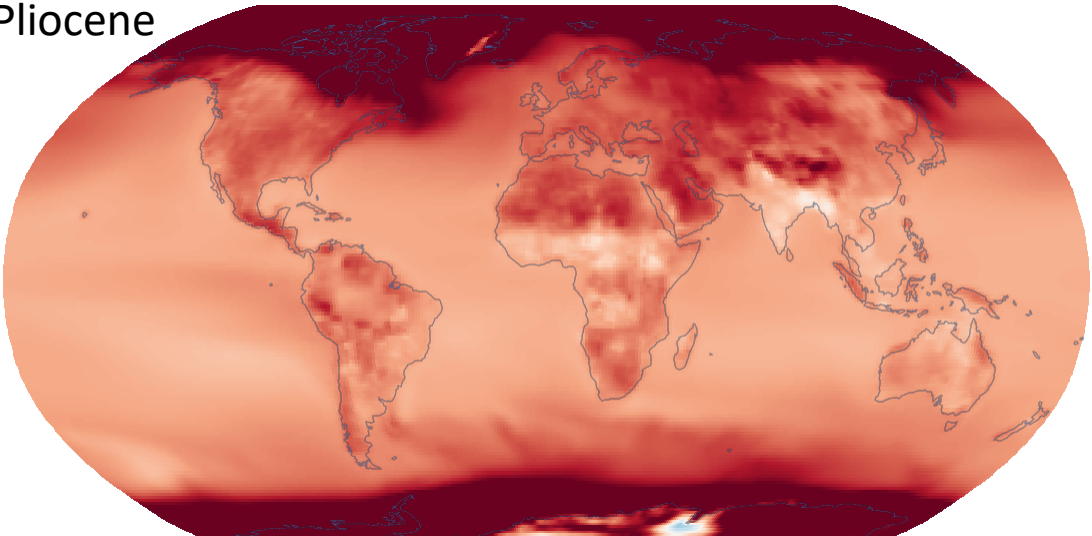
Poids très différents des effets d'orbite et de CO₂

ΔT Annuel °C

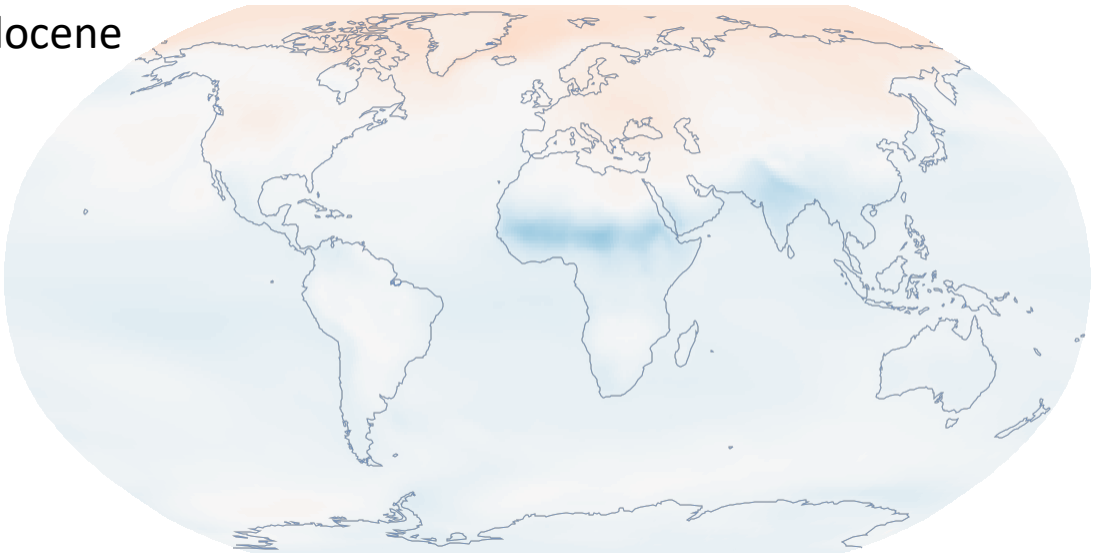
DMG



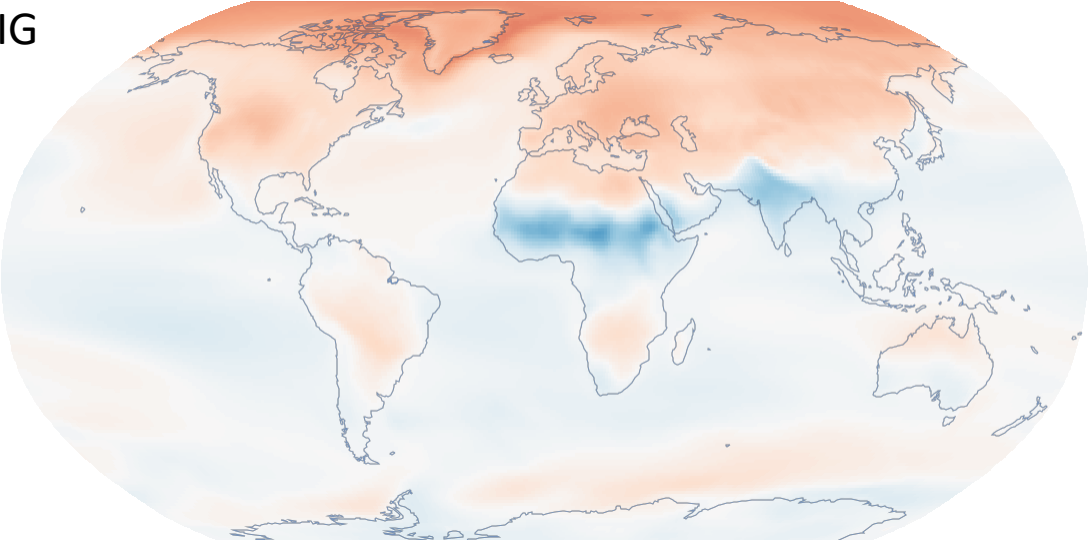
Mid-Pliocene



Mid Holocene



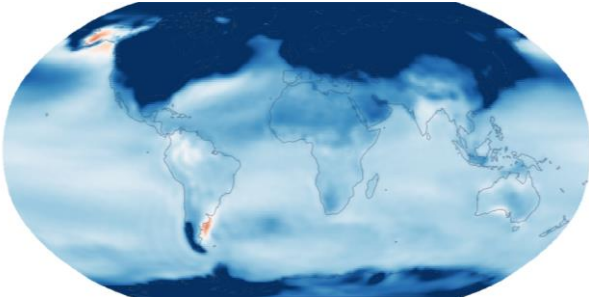
LIG



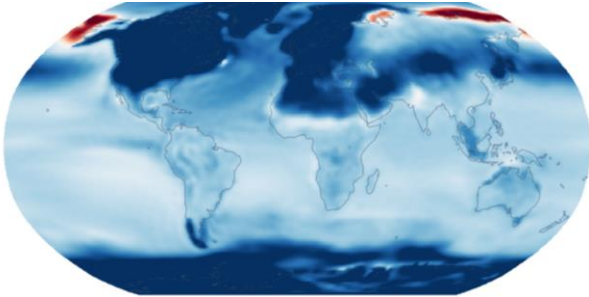
Effet du changement de saisonnalité

ΔT 2 saisons °C

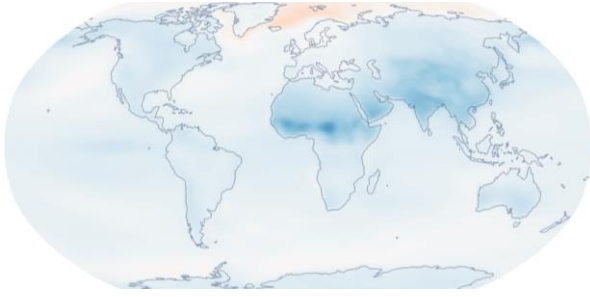
LGM JF



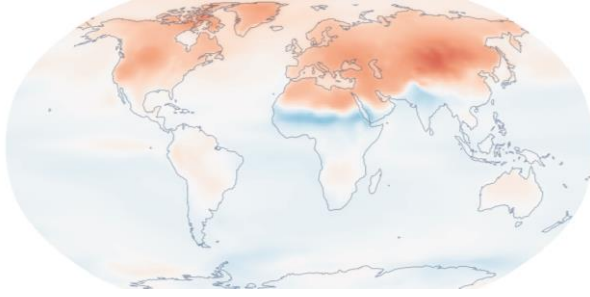
LGM JA



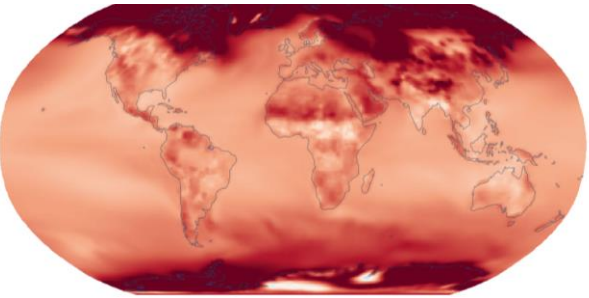
MH JF



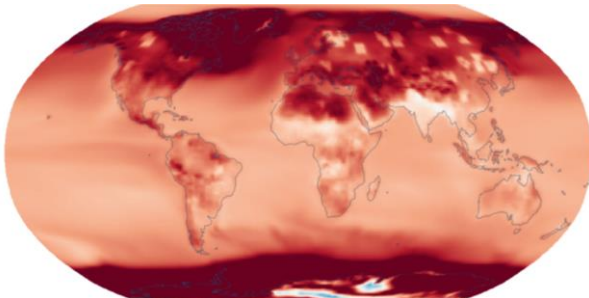
MH JA



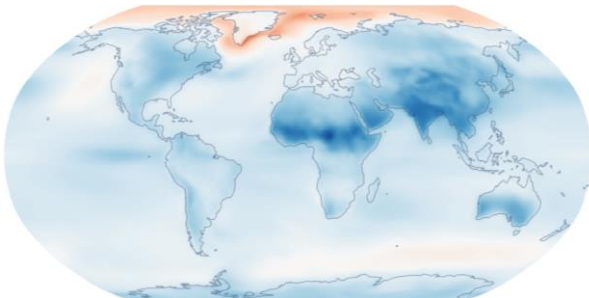
midPlio JF



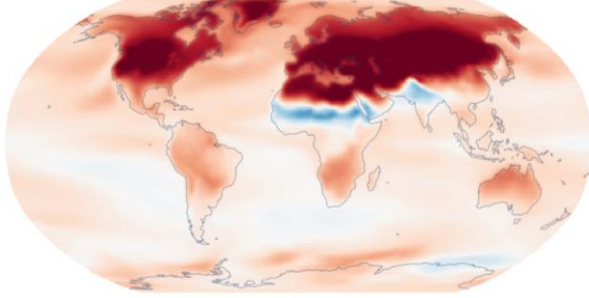
midPlio JA



LIG JF

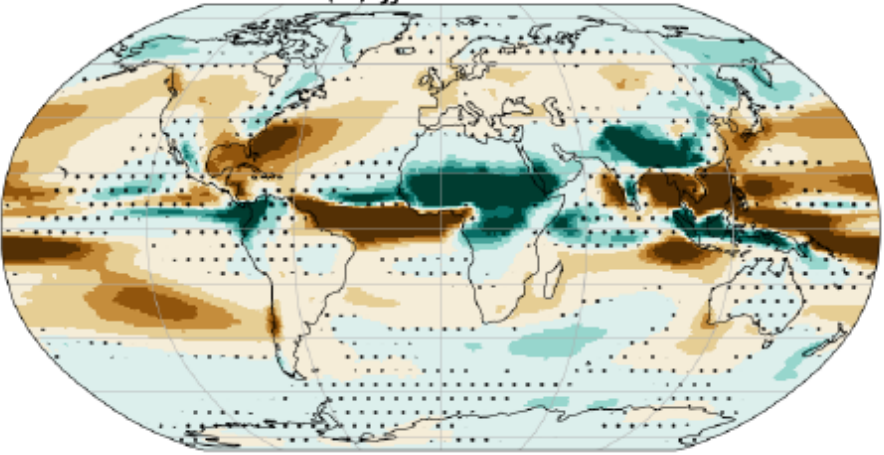


LIG JA

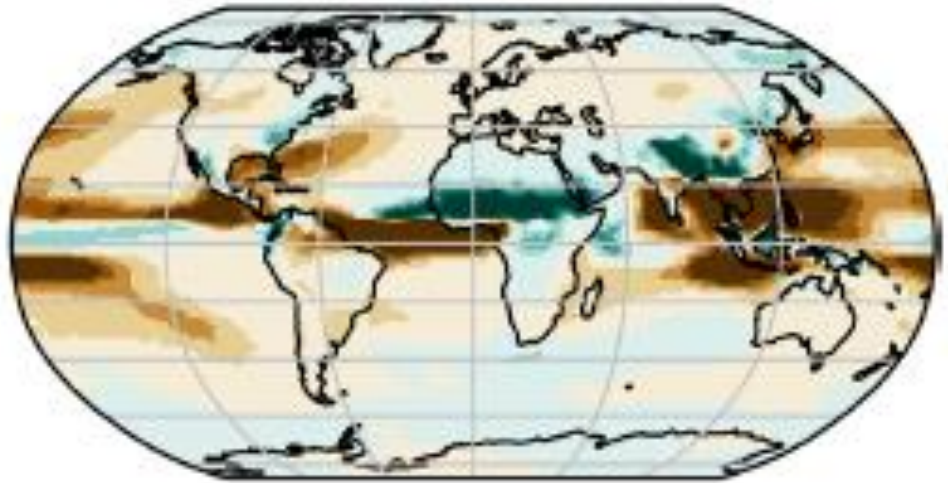


Precipitation : response to insolation

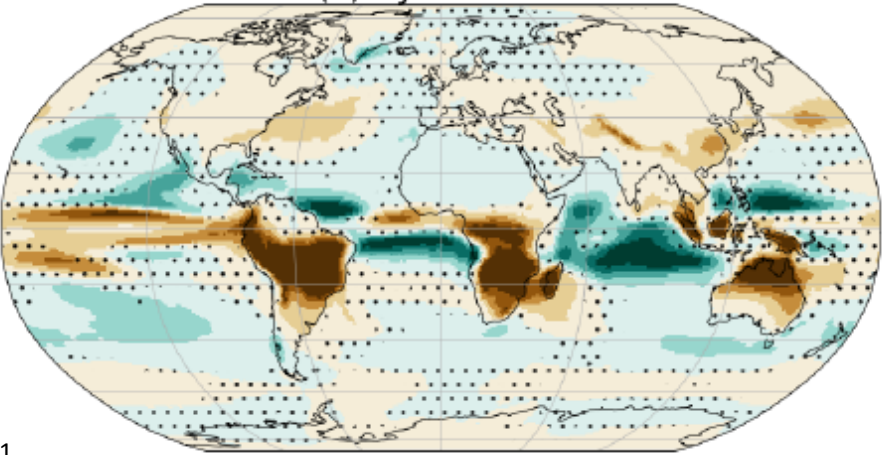
(a) JJA LIG - PI



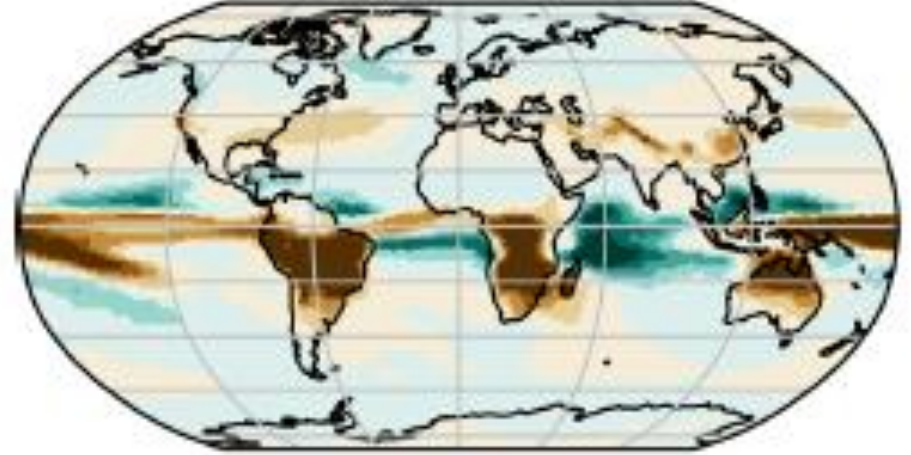
(b) JJA PMIP4-CMIP6



(c) DJF LIG - PI

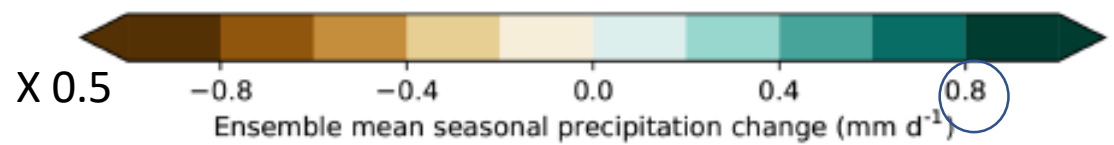


(a) DJF PMIP4-CMIP6



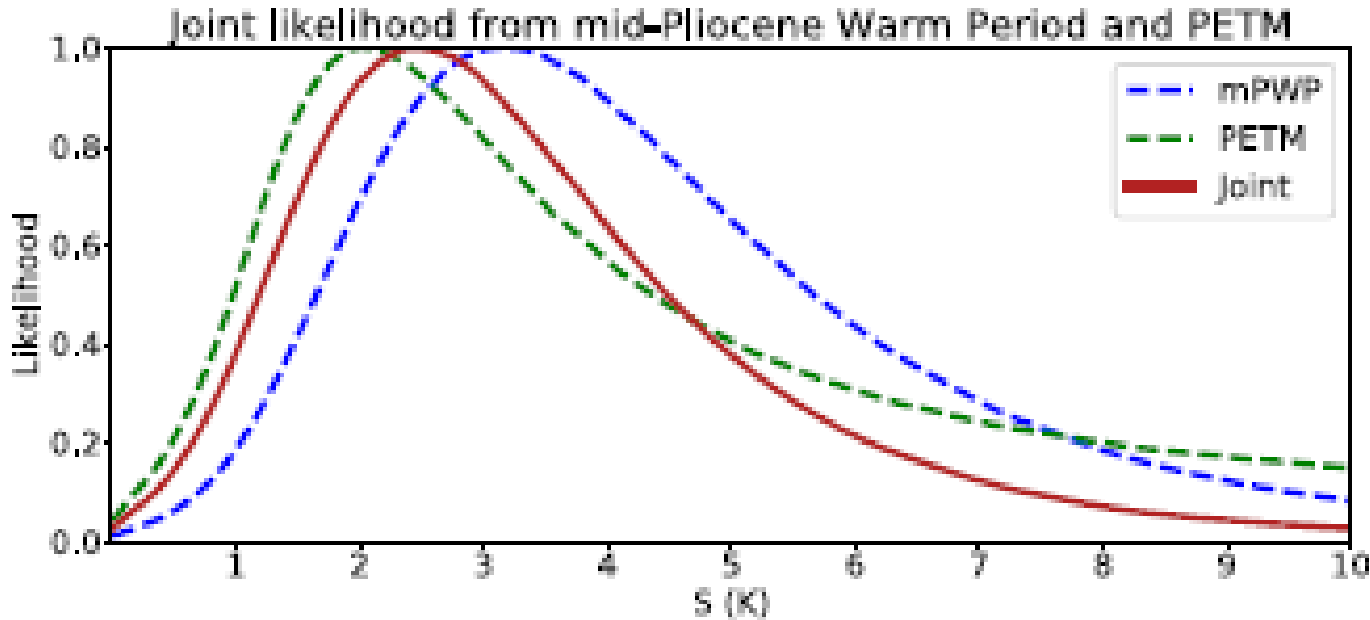
Otto-Bliesner et al. 2021

Brierley et al. 2020



Ensemble mean seasonal precipitation change (mm d⁻¹)

Estimation de la sensibilité climatique à partir des périodes chaudes (mid Pliocène et PETM)



Note :
 LIG et miHolocene pas considérés
 ΔF insolation ~ 0
 ΔF CO₂ fiable CO₂ \sim preindustriel

PlioMIP

$$\Delta T = \frac{-\Delta F_{CO_2} (1 + f_{CH_4}) (1 + f_{ESS})}{\frac{\lambda}{(1 + \zeta)}}$$

PETM

$$\Delta T = \frac{-\ln(CO_2/900)}{\ln(2)} \frac{\Delta F_{2xCO_2} (1 + f_{CH_4})}{\frac{\lambda}{(1 + \zeta)} + \beta}$$

Paléoclimats et sensibilité climatique-2

Pascale Braconnot

Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement – Institut Pierre
Simon Laplace, France

Estimer et comprendre la sensibilité climatique

$$S = -\frac{\Delta F_{2xCO_2}}{\lambda},$$

Mais pour une période donnée on a accès à

$$ESS = -\Delta F/\lambda_p$$

Façon de procéder :

ΔF et ΔT

Étude et compréhension des rétroactions

Relier effets régionaux à effets globaux

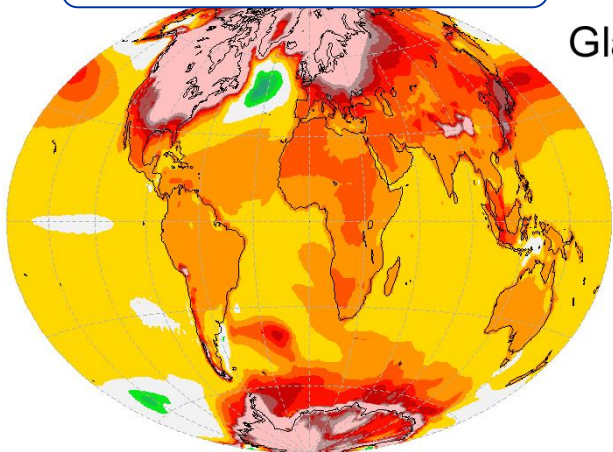
Difficulté en paléo : pas de ΔT global MAIS différentes régions bien échantillonnées (océan, continent) + indicateurs indirect the SST ou Tcontinent

MAIS : Preuves de changements! Et de leur amplitude!

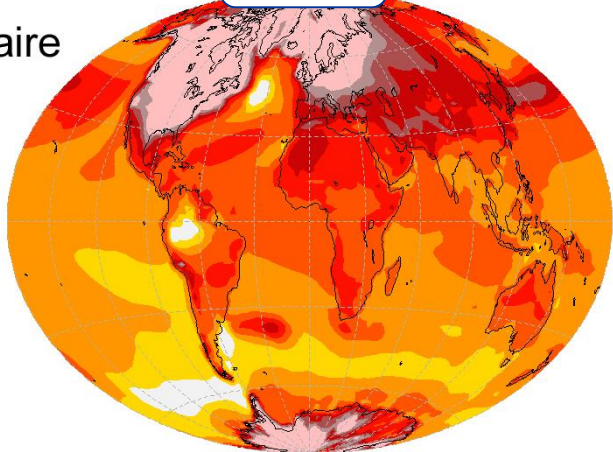
Mise en perspective DMG et projections climatiques RCP8.5

**Glaciaire
à présent**

CNRM-CERFACS

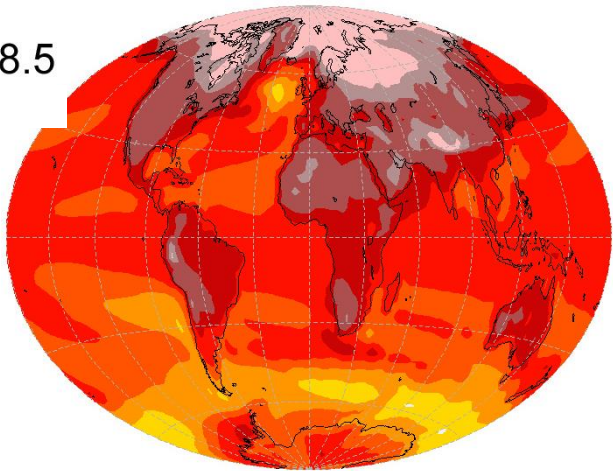
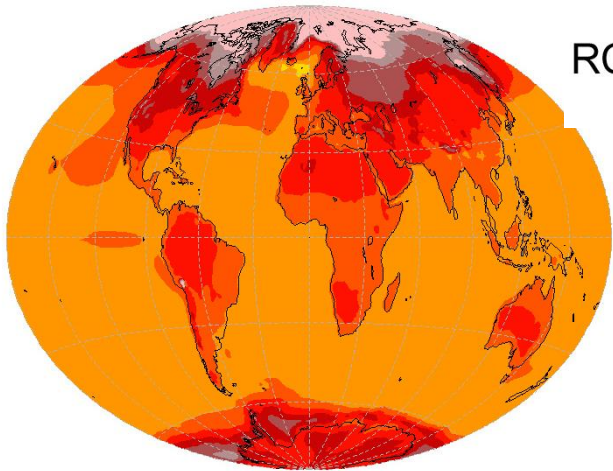


IPSL

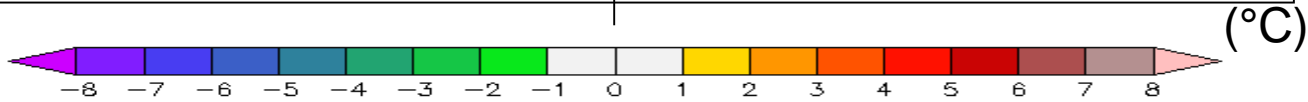


Glaciaire

**Présent à
RCP8.5**



RCP 8.5



Versions CMIP5 des modèles :
Sensibilité IPSL : 4.1 °C
Sensibilité CNRM : 3.3 °C

Lien entre sensibilité climatique et changement de température pour différents climats

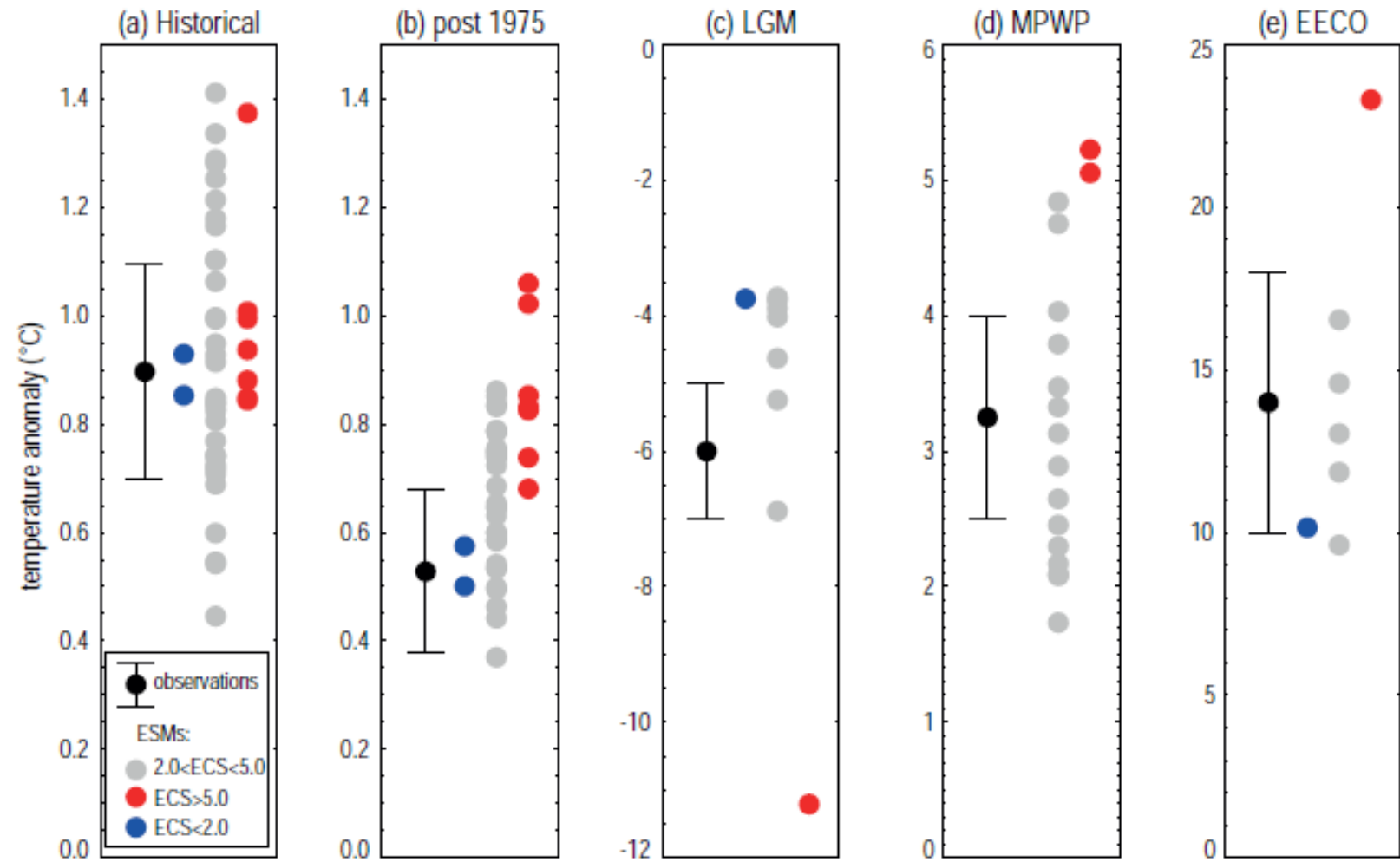
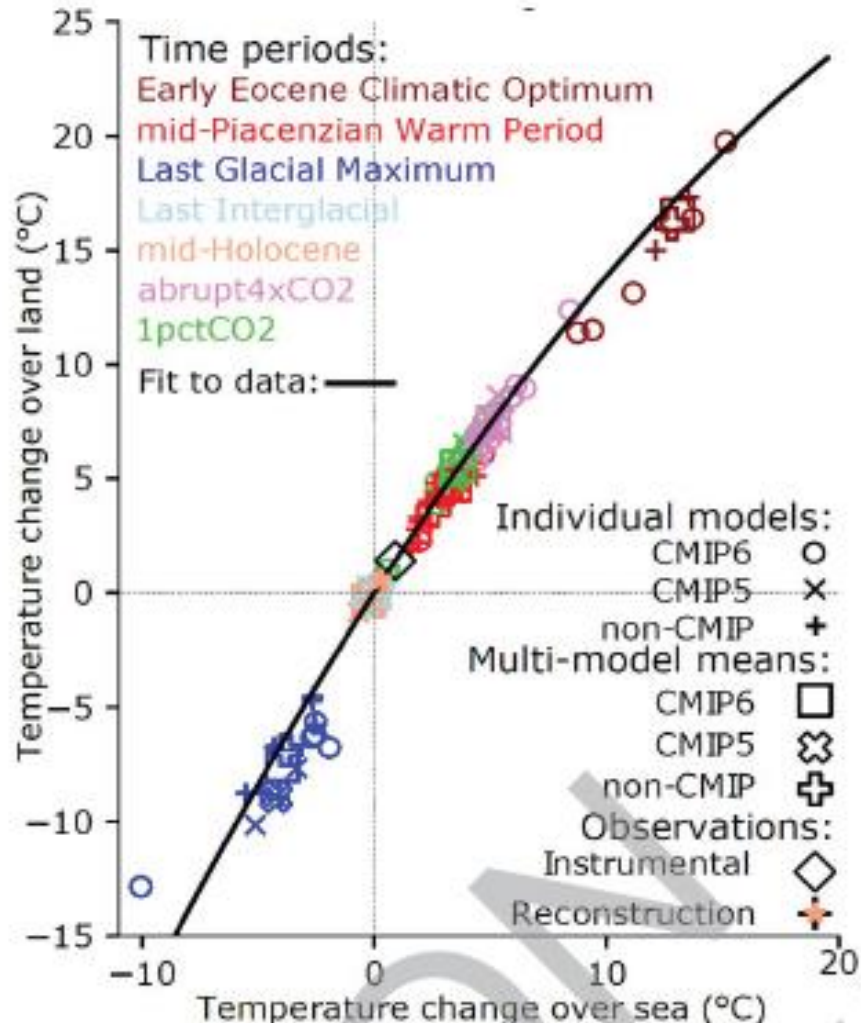


Fig. 7.19

Gradient terre/ocean : vision multi-périodes



b) Global temperature change over land and ocean for a range of climates



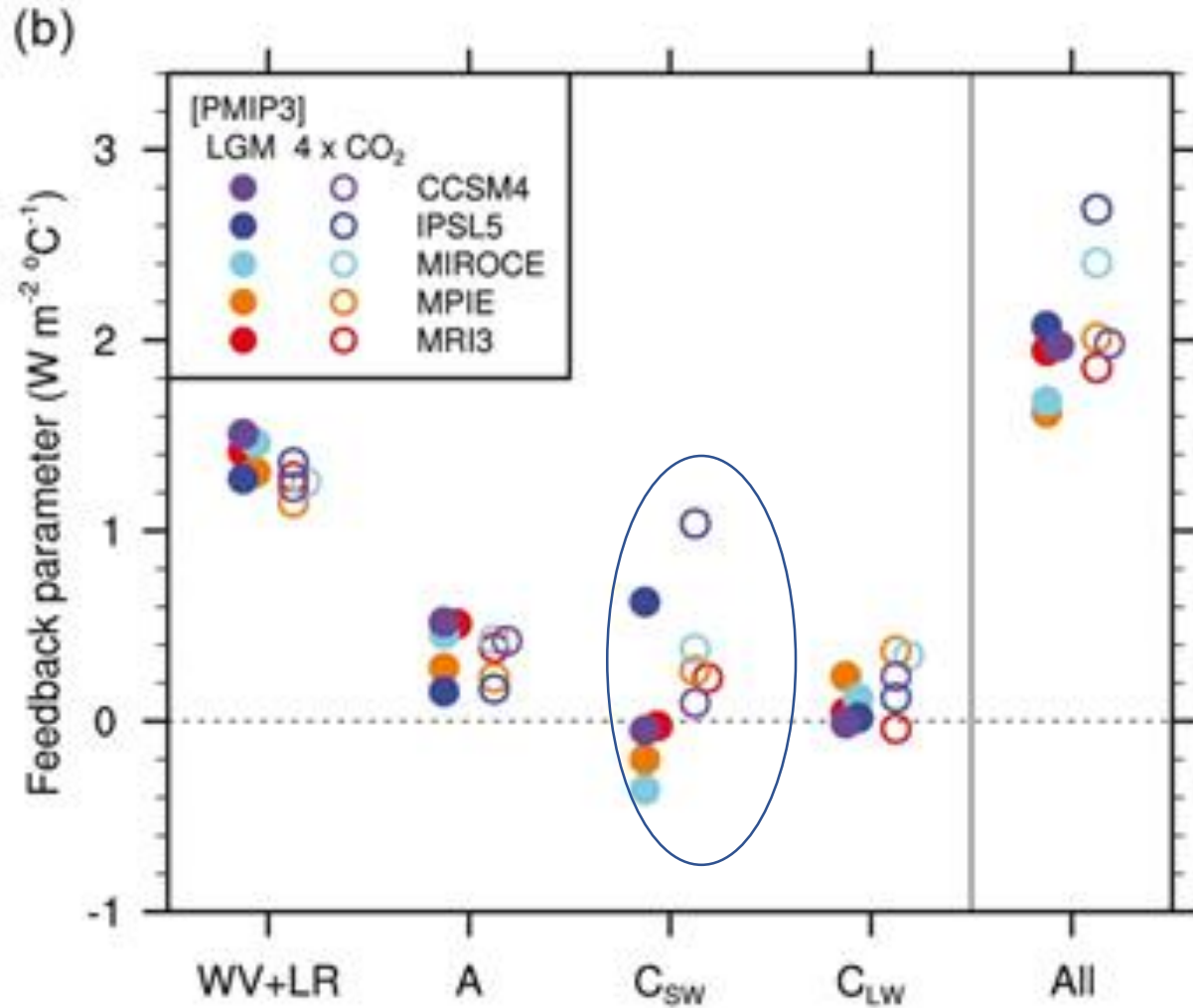
WG1 AR6
Fig. 3.2

Questions ouvertes :

- Possibilité d'apporter contrainte évaluation paléo
- Dépendance au climat moyen (amplitude des rétroactions, seuils)
- Effet "pattern" suivant le type de forçage (solaire, GHG, aérosols ...)

Rétroactions atmosphériques

Estimations des différentes rétroactions



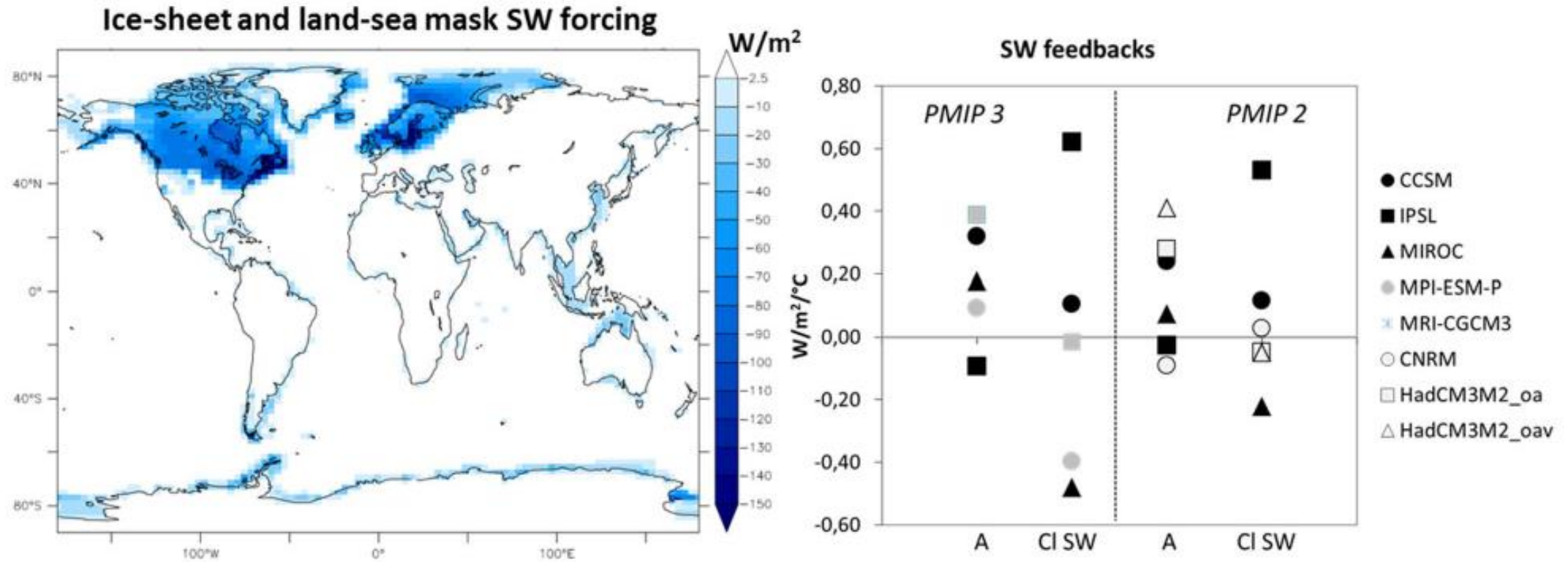
Méthode PRP avec code radiatif

Différences marquées:

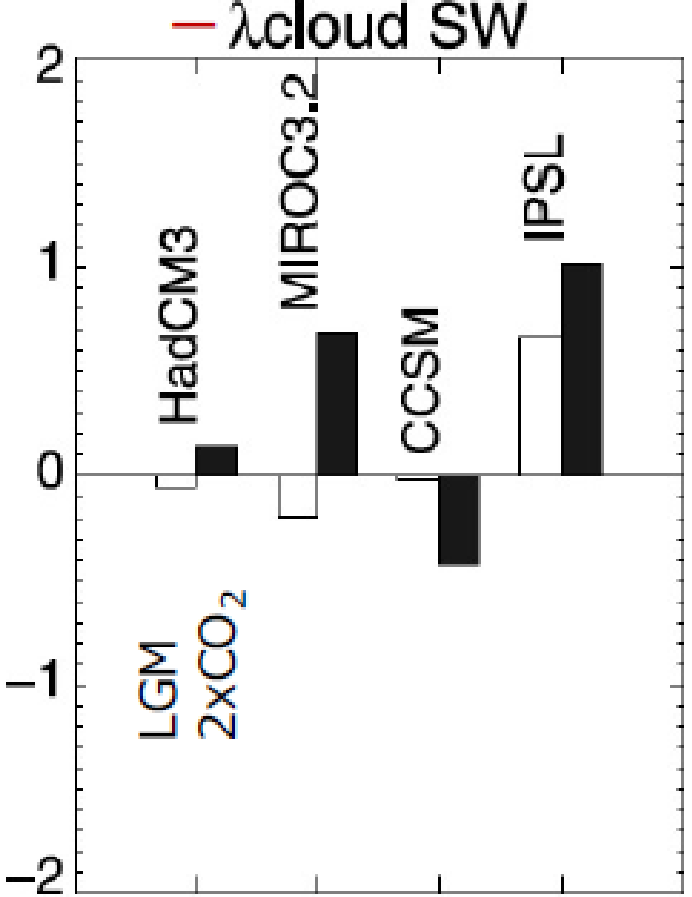
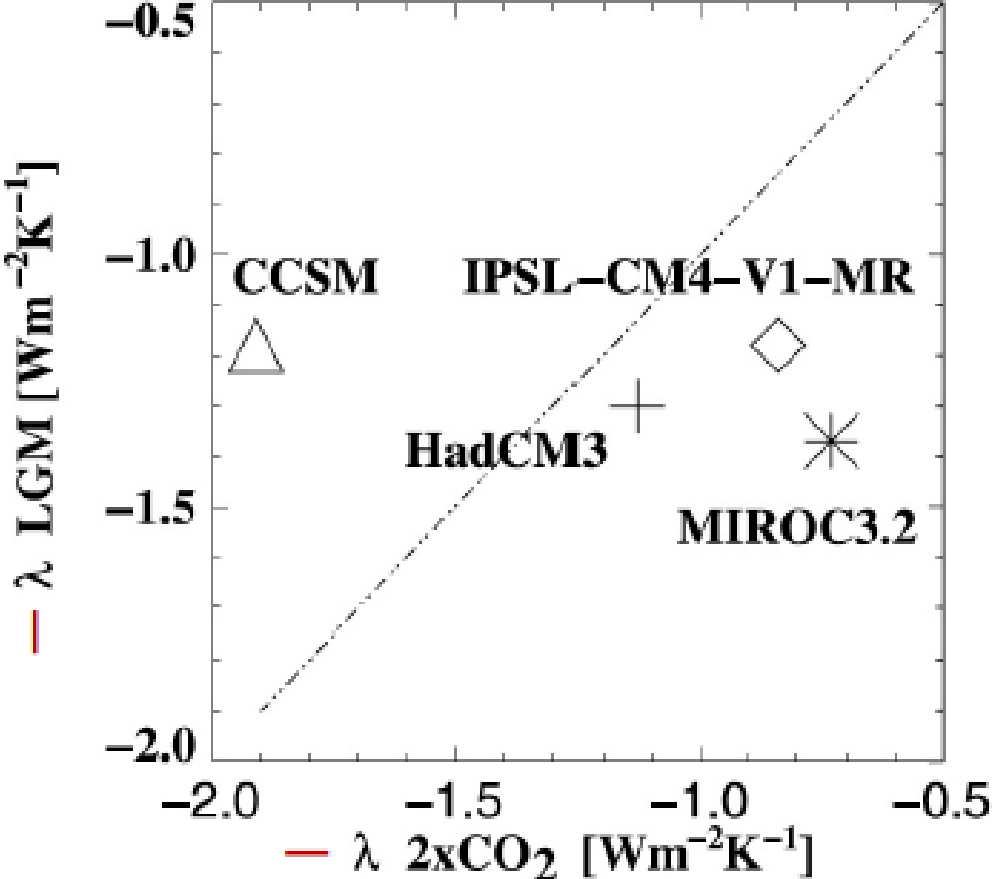
- rétroactions des nuages
- Poids relatifs des différents termes dans le total

From Yoshimori et al. 2011

Dispersion similaire entre PMIP3 et PMIP2 pour les rétroactions SW



Relation entre les rétroaction LGM/CO₂

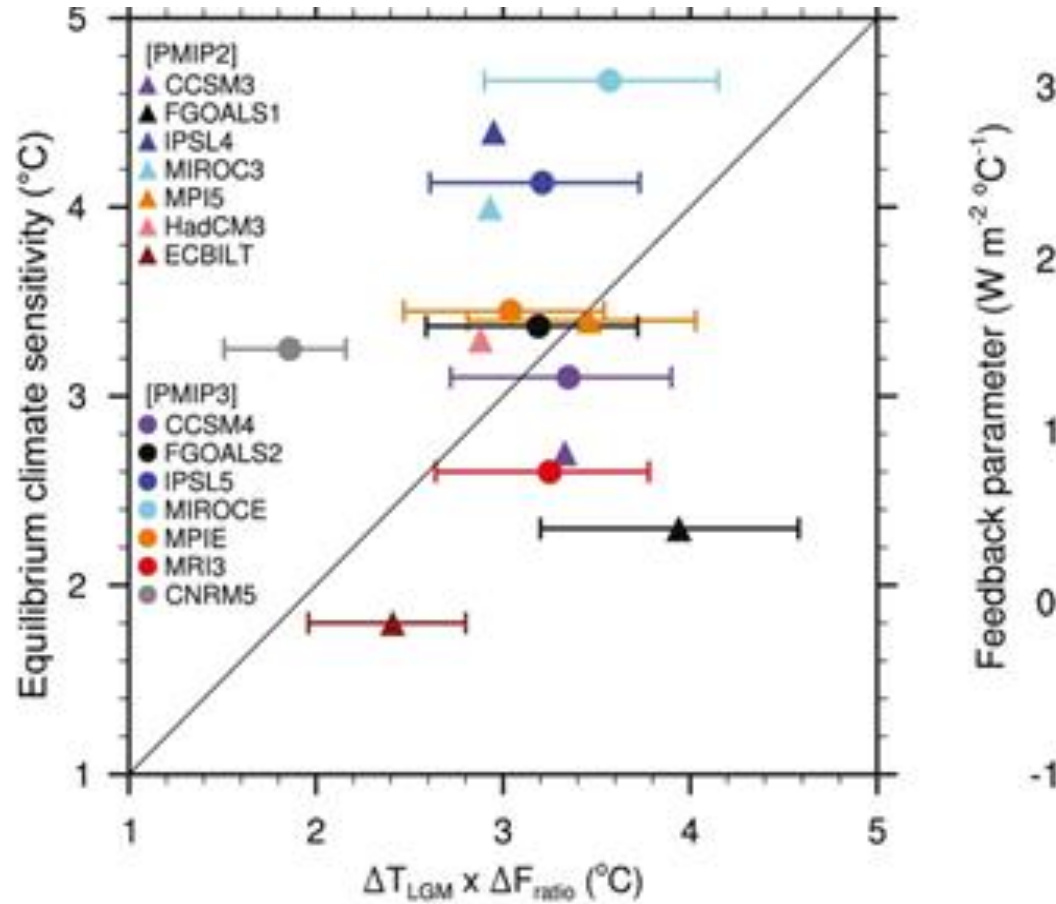


(Crucifix, 2006, modified)

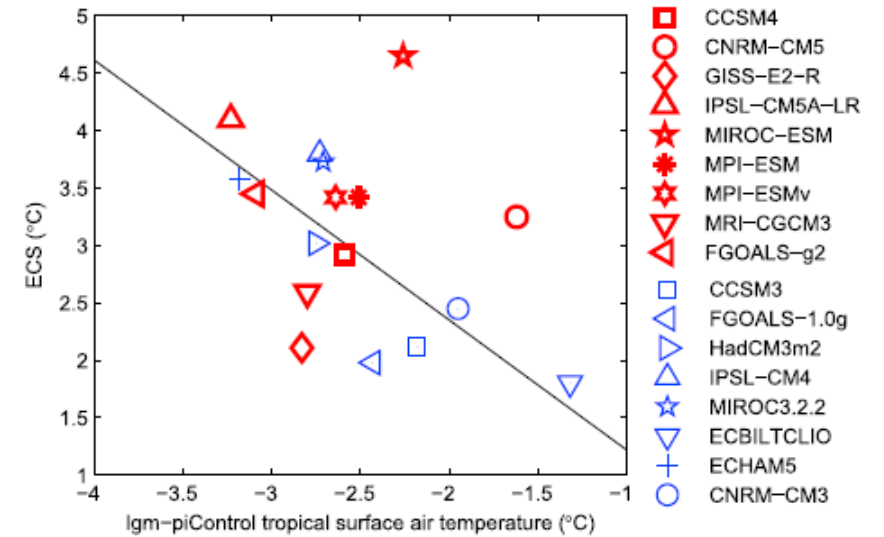
Pas de relation globale

(Emprunté de Yoshimori, PMIP 30 ans, ,2021)

Lien avec la sensibilité climatique



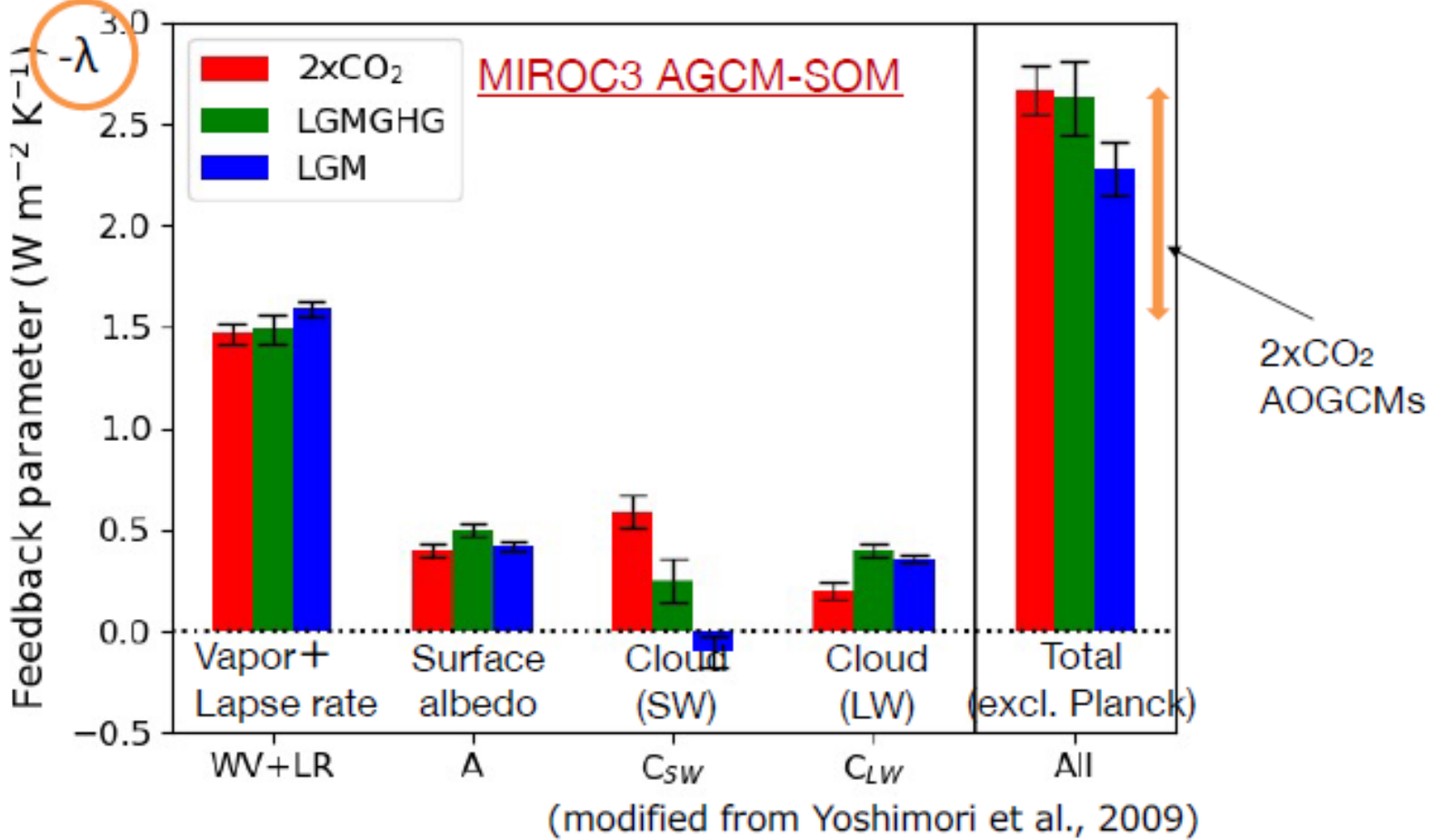
Hopcroft et Valdes, 2015



Une difficulté : différente complexité des modèles → différentes rétroactions impliquées ex végétation (LAI si cycle du carbone interactif et/ou végétation dynamique)

Pas directe : effet calotte et autres forçages

Tests de sensibilité avec le modèle MIROC



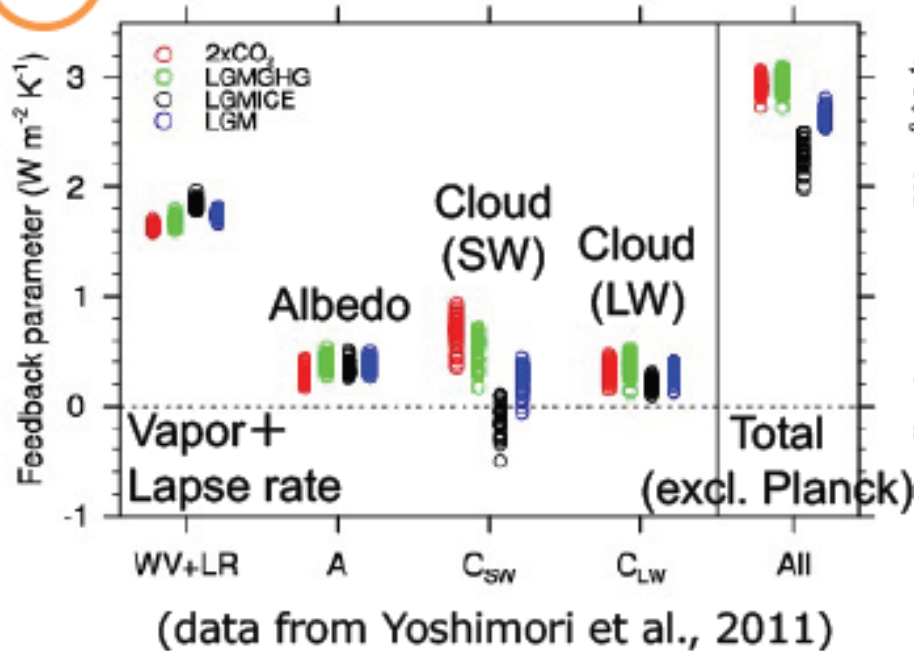
- Sensitivity to LGM forcing < Sensitivity to 2xCO₂ forcing
- SW cloud feedback is a key
- Feedback diff. (2xCO₂ - LGM) < Model spread in 2xCO₂

7

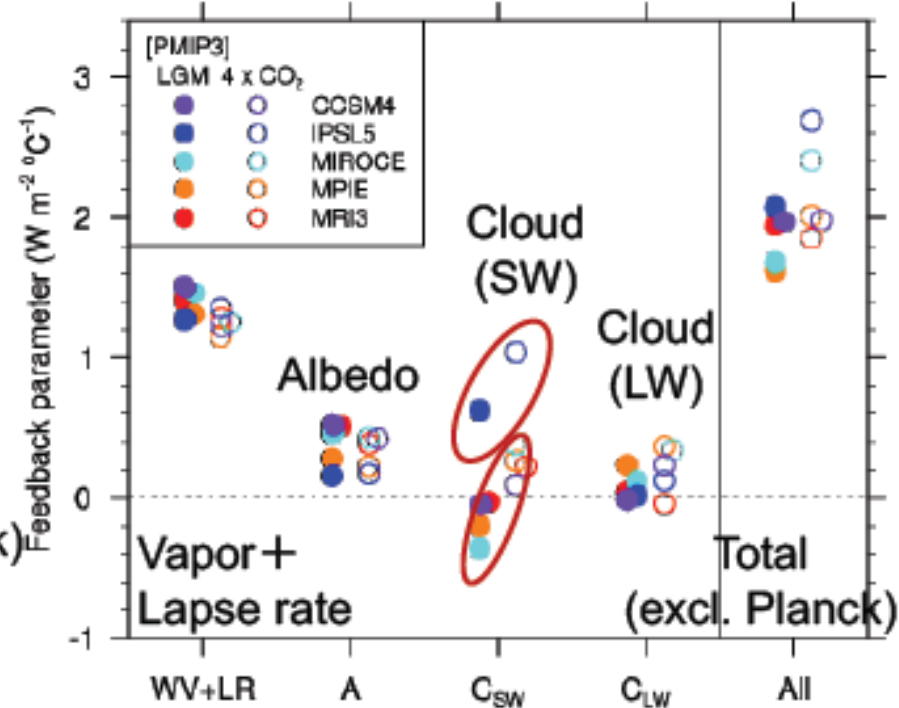
Ensemble multi-modèle

$-\lambda$

Single model ensemble
(MIROC3 AGCM-SOM)



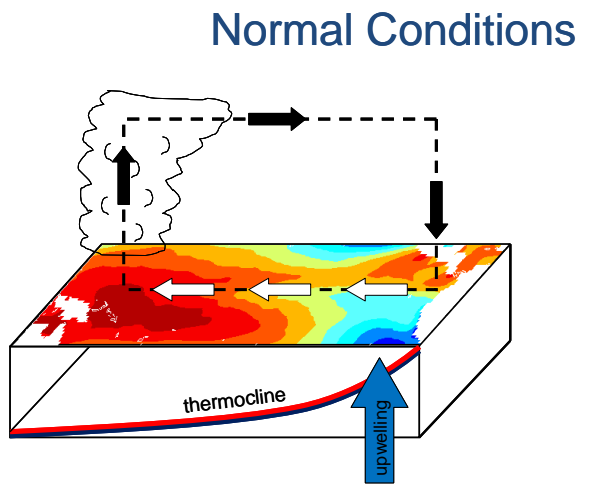
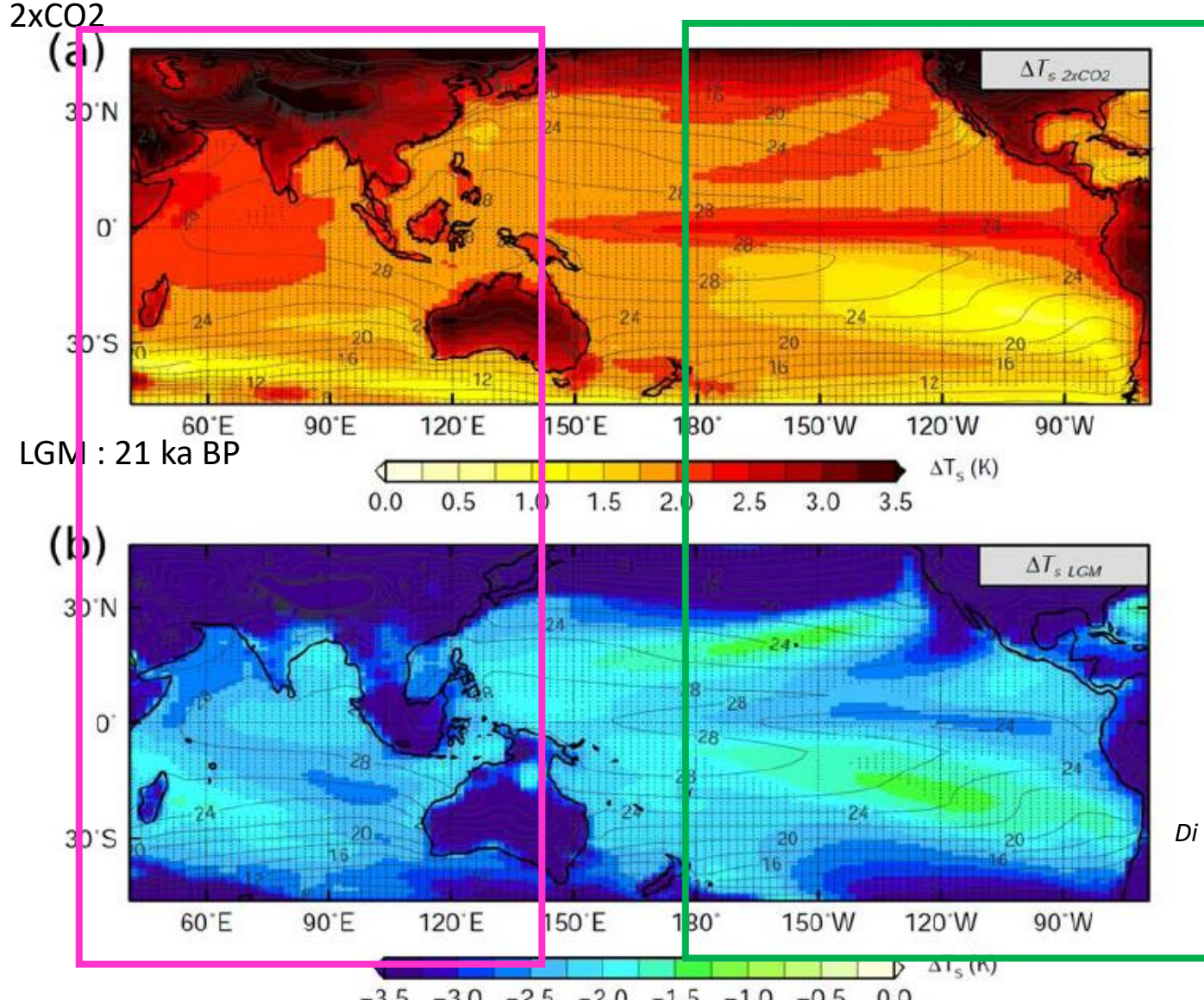
Multi-model ensemble
(IPCC-AR5, 2013)



- Climate feedback is **state-dependent & forcing-dependent**
- Tropical LGM cooling may be useful for the climate sensitivity constraint (Hargreaves et al., 2012, IPCC-AR5, 2013)
→ less influence from the ice sheet forcing?

Relation cycle hydrologique - changement de température

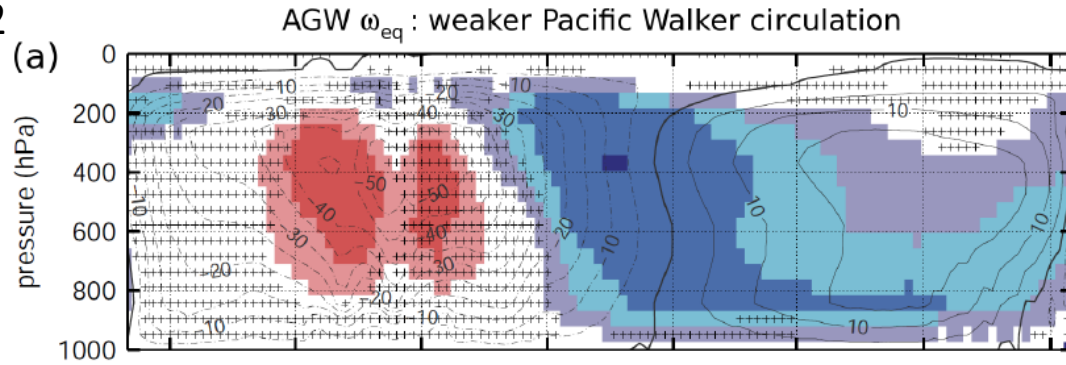
Différences avec l'actuel: moyenne d'ensemble de 6 modèles



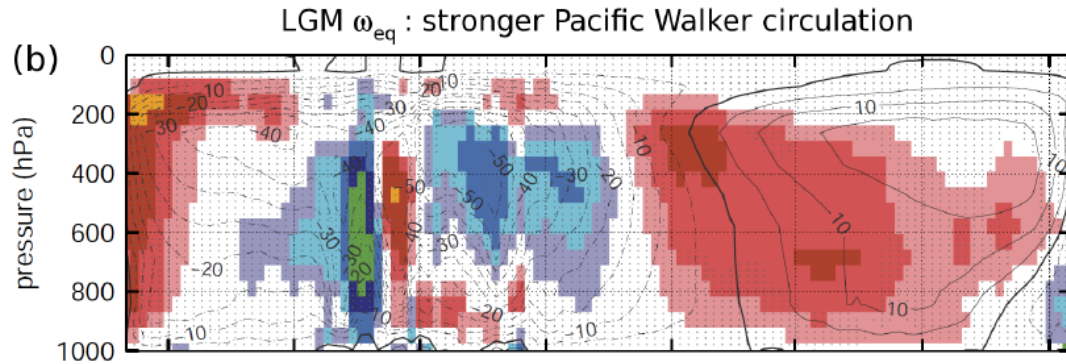
Di Nezio et al. 2011

Circulation de Walker: vitesse verticale

CMIP3/PMIP2



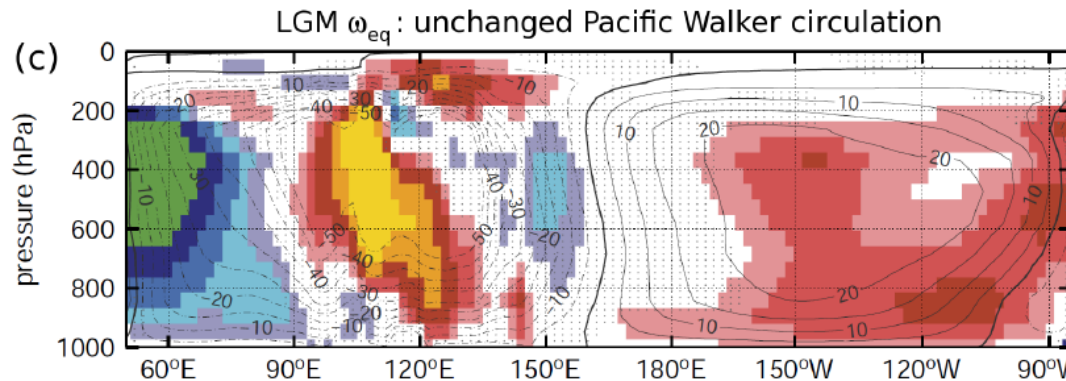
x2 CO2



DMG
pour 4 modèles

$\Delta SOI > 0$

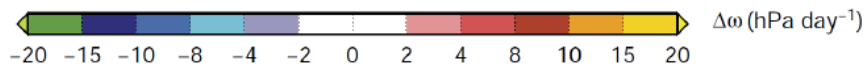
Difference secteur Indonésien



DMG
pour 4 modèles

$\Delta SOI = 0$

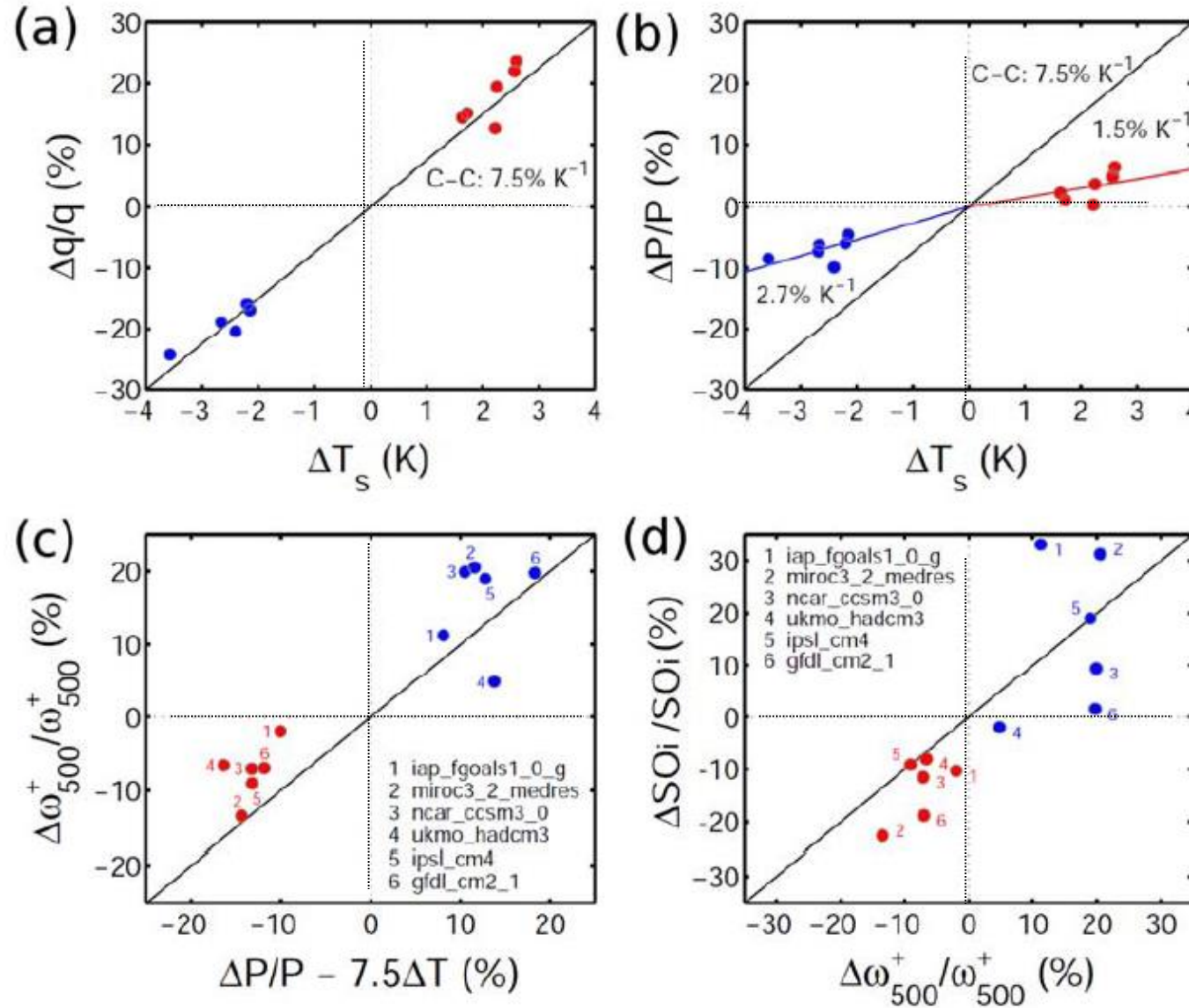
Traitement de la convection +
traitement de la surface
continentale



Ascendance renforcée

Ascendance réduite

Cycle hydrologique et dynamique atmosphérique



- Vapeur eau suit Clausius-Clapeyron

- Précipitation taux plus faible : différentes pentes entre modèles pour les 2 climats

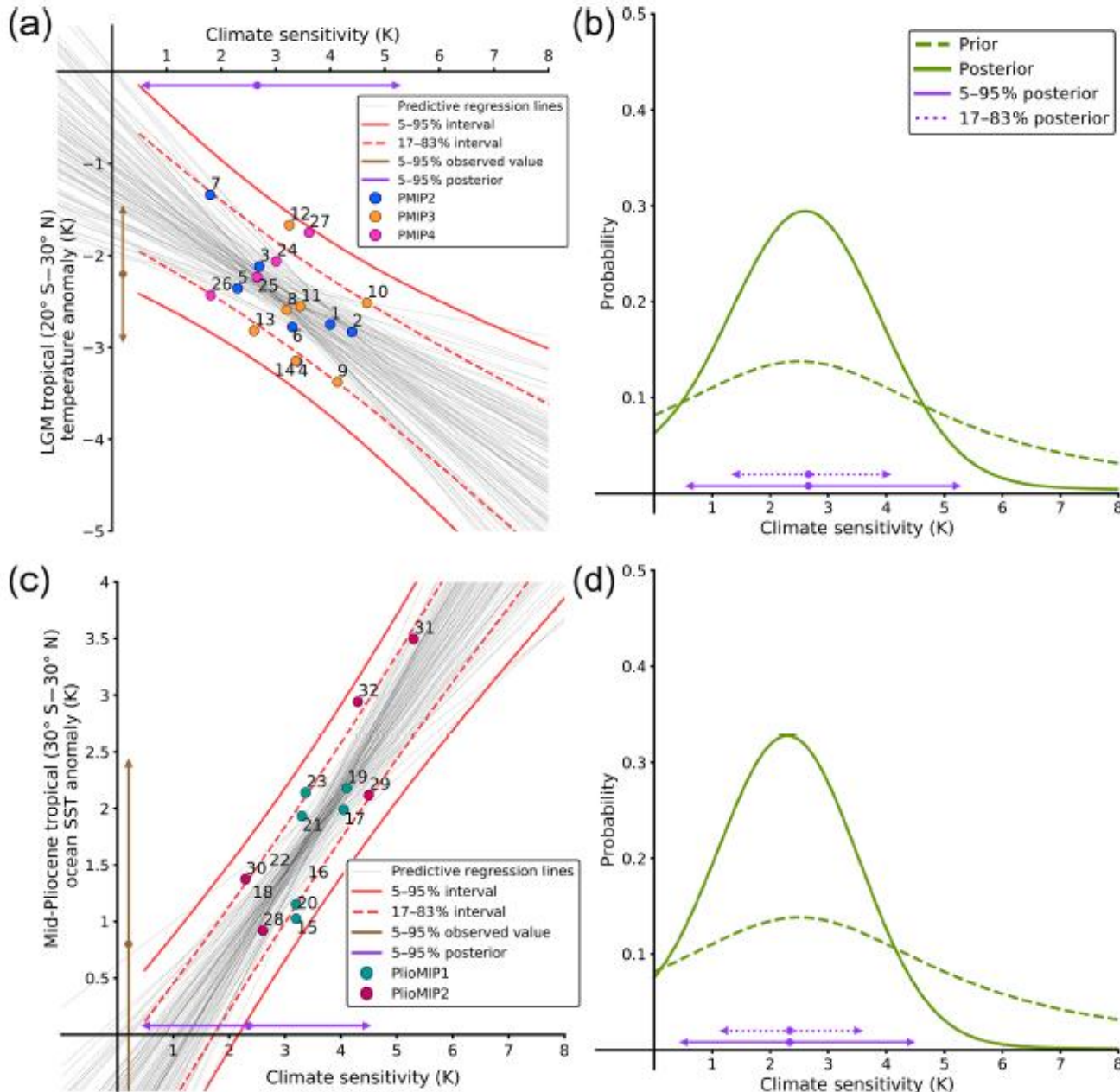
- Lien avec l'intensité des cellules atmosphériques : Réduction en $2xCO_2$

- Augmentation pour LGM

- + de dispersion entre modèles au DMG : effet Land, possible impact de changements de la dynamique atmosphérique liés à la calotte

Contraintes modèles-données multi-périodes

Les température de surface (SST) tropicales comme contrainte?



Cadre Bayésien

- Utilisation résultats de simulations
- Estimations des SST tropicales à partir de reconstitutions paléo (paléo « observations »)

« likelihood » : possibilité d'avoir T pour un S donné

A posteriori : résultat

A priori : entrée

$$P(S|T_{\text{tropical}}^0) = \frac{P(T_{\text{tropical}}^0|S) P(S)}{P(T_{\text{tropical}}^0)}$$

normalisation

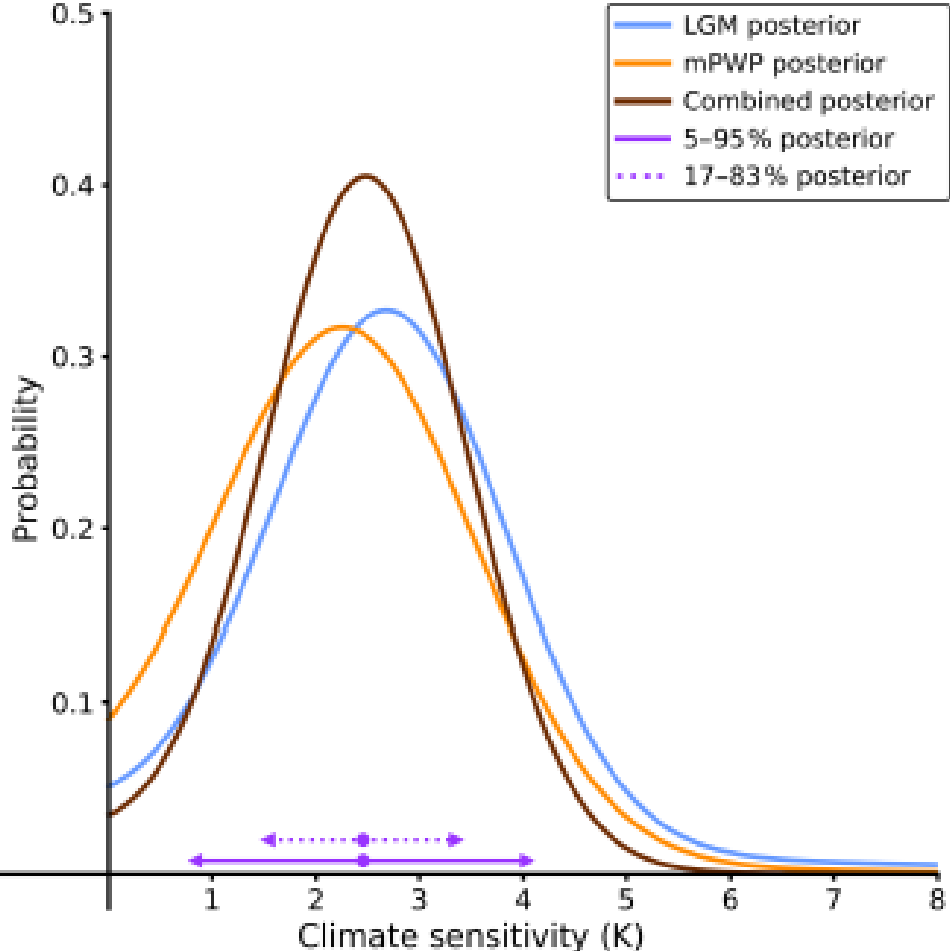
$$T_{\text{tropical}} = \alpha \times S + \beta + \epsilon,$$

inconnues

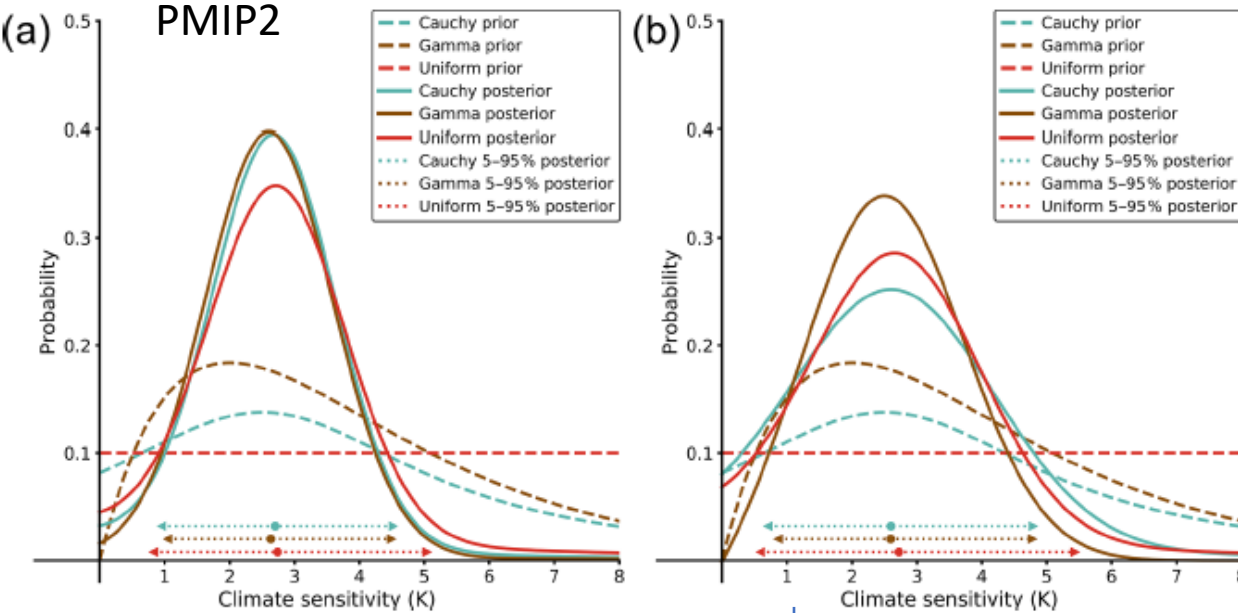
$$\epsilon \sim N(0, \sigma^2)$$

Les température de surface (SST) tropicales comme contrainte? (2)

Combinaison d'estimation pour 2 climats « indépendants »



Sensibilité à « prior » et ensemble de simulations utilisé



Contrainte plus faible

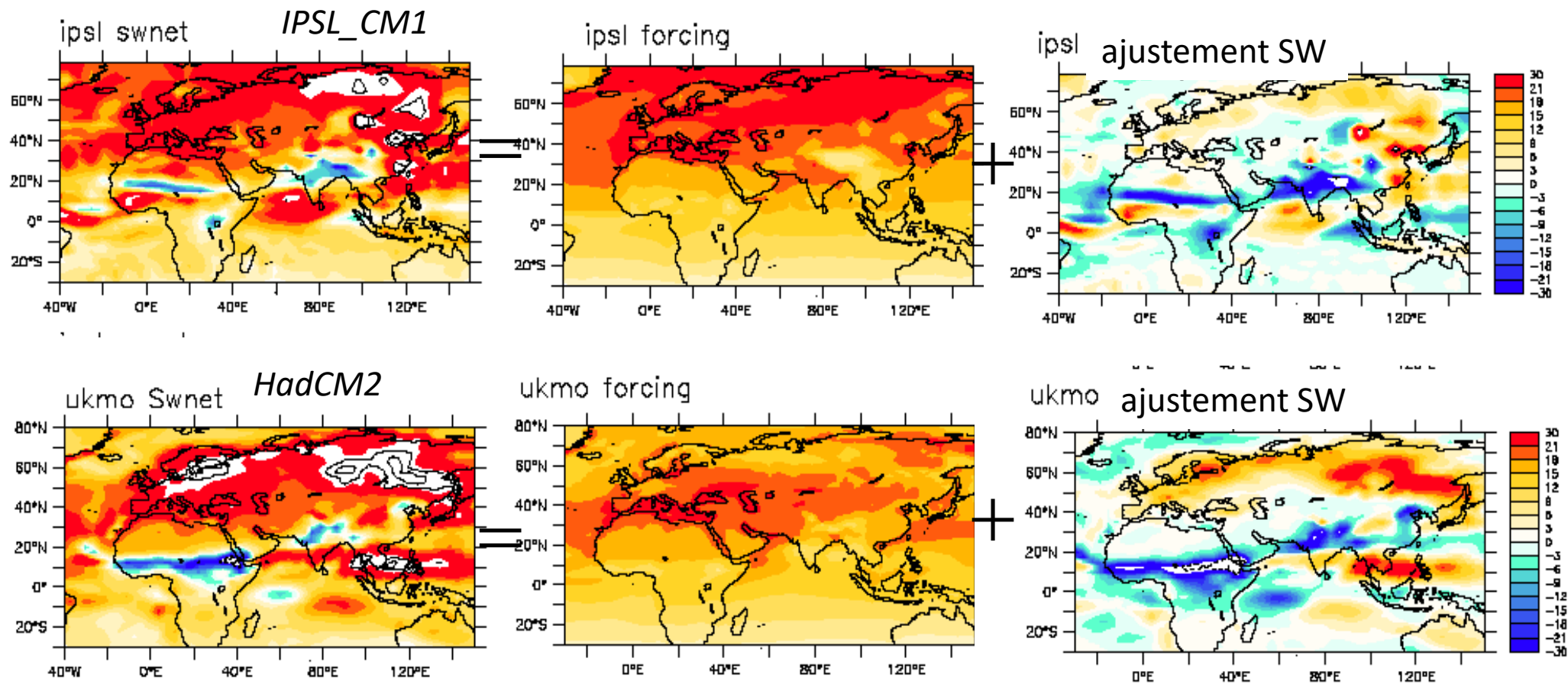
Forçage et rétroactions pour l'Holocène moyen

$$\Delta(Sw_{net}) = \text{forcing} + \text{feedback}$$

$$= (1 - \alpha_0) \Delta SW_i - \Delta\alpha SW_i$$

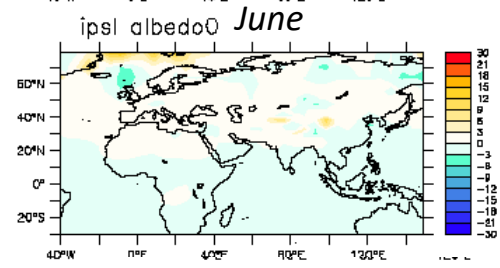
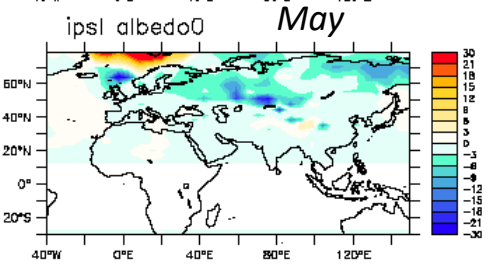
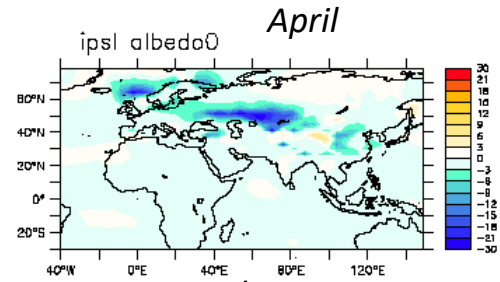
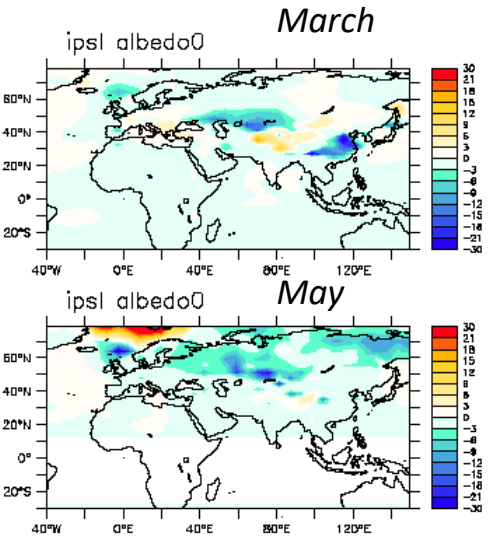
$$f = (1 - \alpha_0) \Delta SW_i$$

Juillet
PMIP2



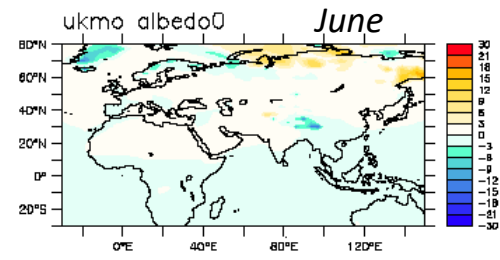
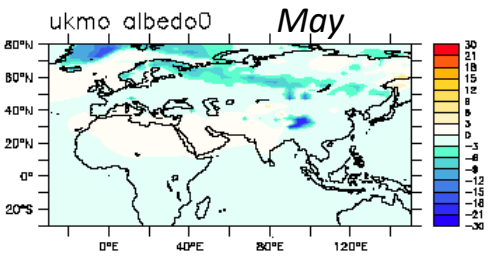
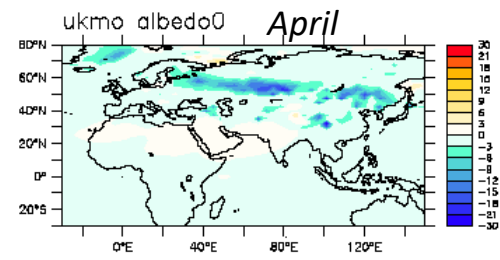
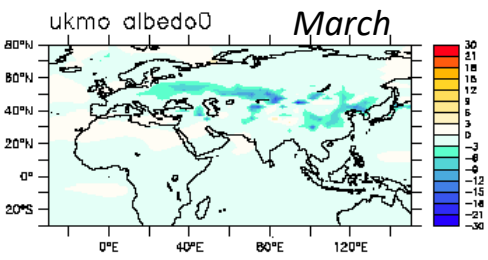
Forçage effective entre modèles différent!: même dans des cas « simples »
 Une part des différences sur l'ajustement vient des différences de forçages
 -> lien avec effet état moyen et « effet pattern »

Effet nuages dominantes sauf au printemps



Couverture de neige plus importante pour certaines régions au printemps

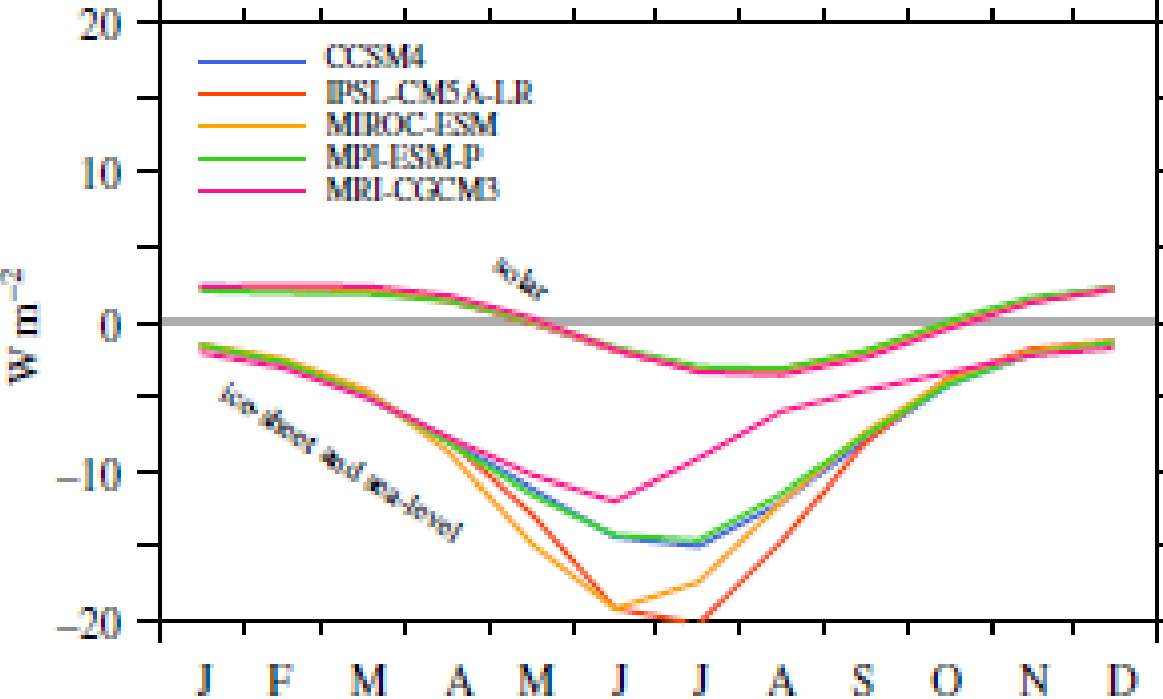
$$\Delta\alpha_{clear\ sky} * SWi6$$



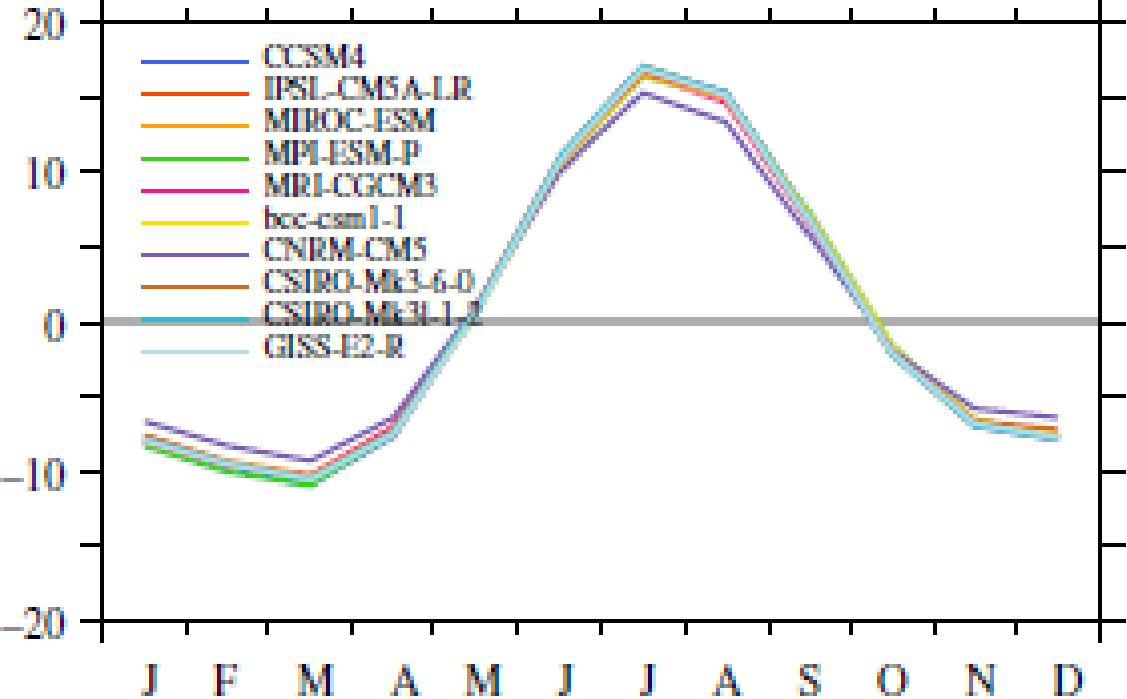
Analogie entre les rétroactions pour différentes périodes

Forçage SW à l'échelle saisonnière

(a) (i) LGM: solar and ice-sheet/sea-level forcing

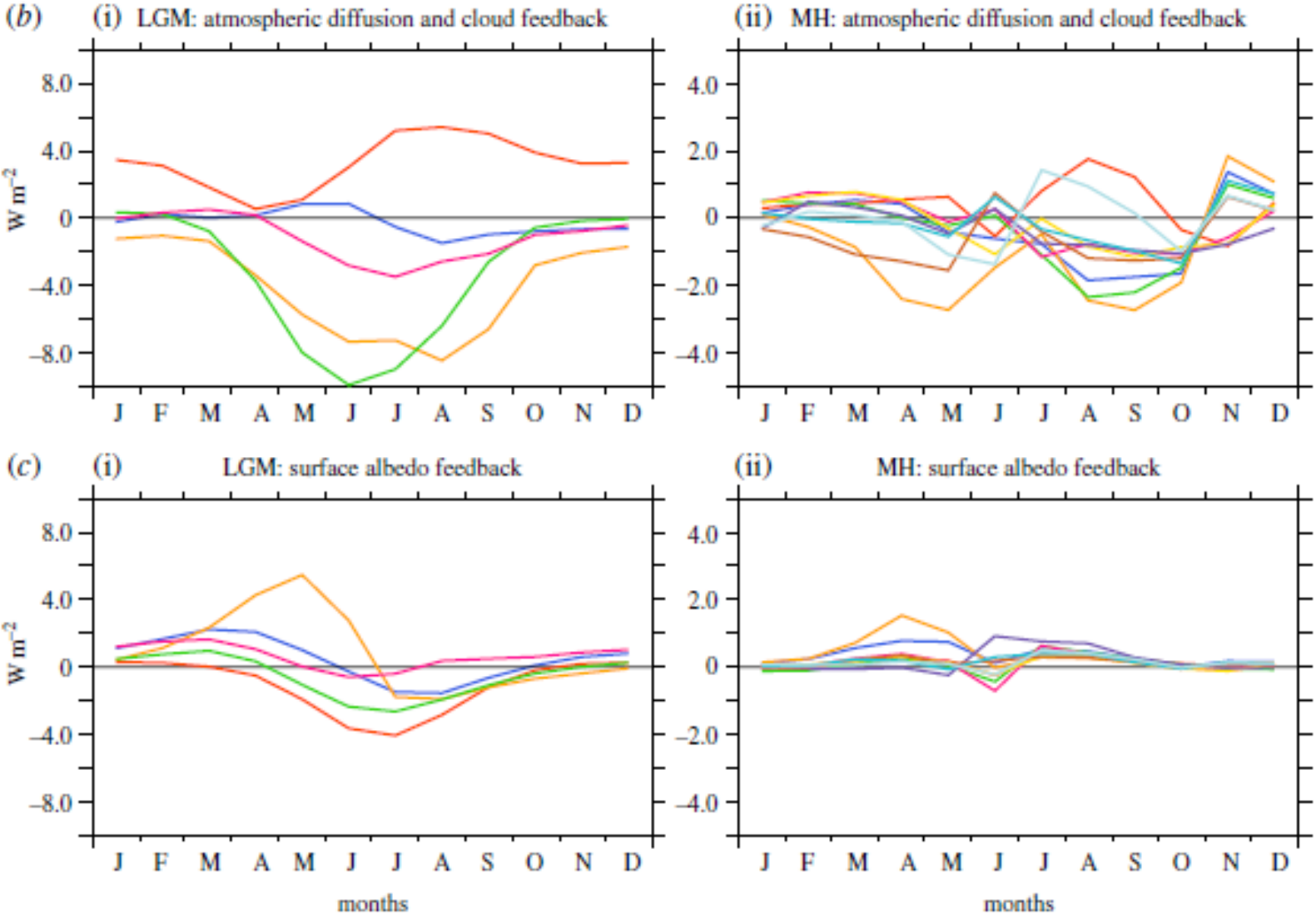


(a) (ii) MH: solar and ice-sheet/sea-level forcing

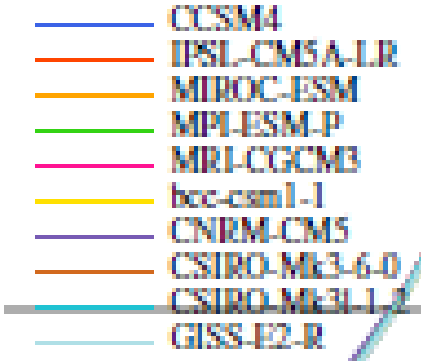


Analogie entre les rétroactions pour différentes périodes (2)

rétroactions SW à l'échelle saisonnière



Rétroactions estimées avec la méthode simplifiée de Taylor et al 2007



Possibilité d'identifier régions/périodes de l'année année et apporter une évaluation/contrainte ciblée entre les différents climats

→ Contraintes des différentes rétroactions en lien avec « processus »

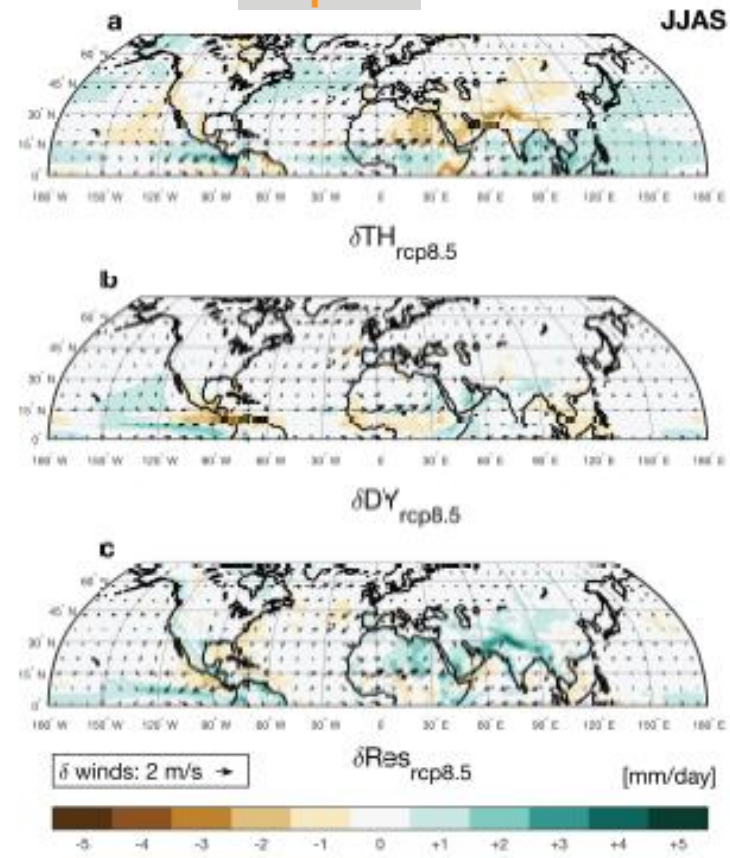
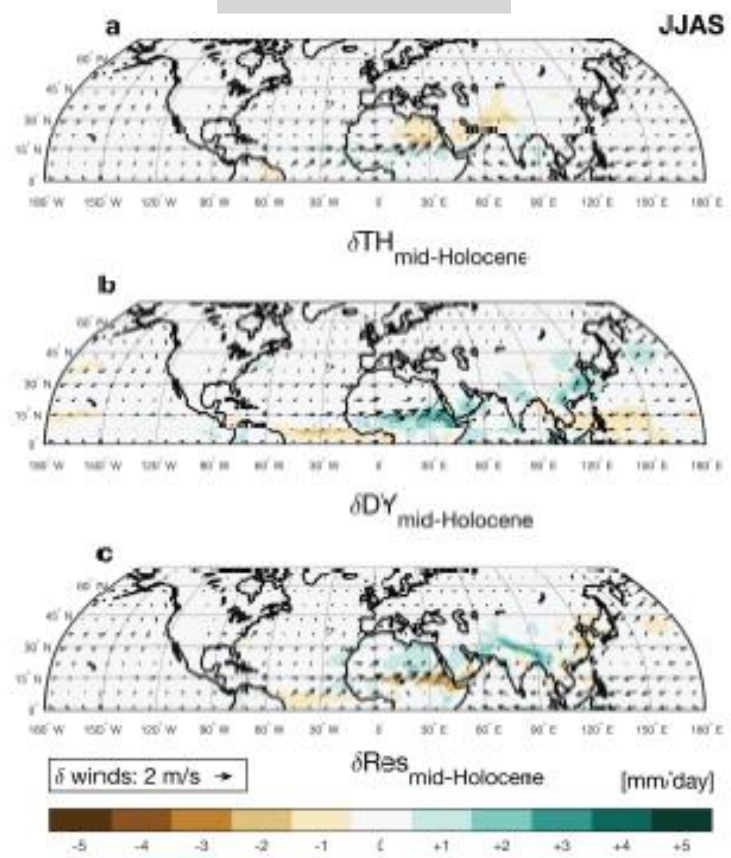
Tenir compte des différences de mécanismes liés aux « forçages »

$$\rho_w g \delta(P-E) = \underbrace{- \int_0^{p_s} (\bar{\mathbf{u}}_{PIC} \cdot \nabla \delta \bar{q} + \delta \bar{q} \nabla \cdot \bar{\mathbf{u}}_{PIC}) dp}_{\text{Advective + Divergent}} - \underbrace{\int_0^{p_s} (\delta \bar{\mathbf{u}} \cdot \nabla \bar{q}_{PIC} + \bar{q}_{PIC} \nabla \cdot \delta \bar{\mathbf{u}}) dp}_{\text{Advective + Divergent}} - \underbrace{\int_0^{p_s} \nabla \cdot \delta(\bar{\mathbf{u}}' \bar{q}') dp - \delta S}_{\text{RESIDUAL}}$$

Thermodynamic (Humidity change)
DYNAMIC (Mean flow change)
Transient Eddies and Surface term =

mid-Holocene

rcp8.5

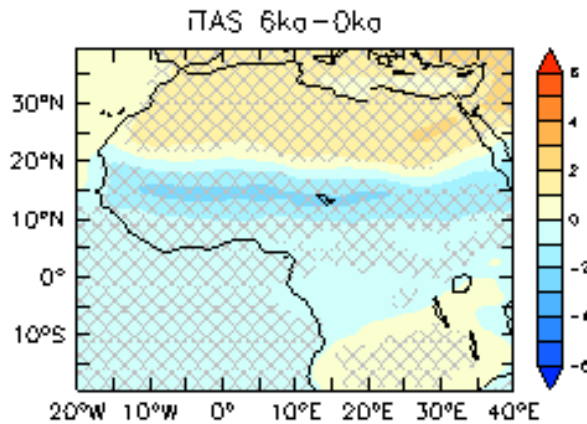
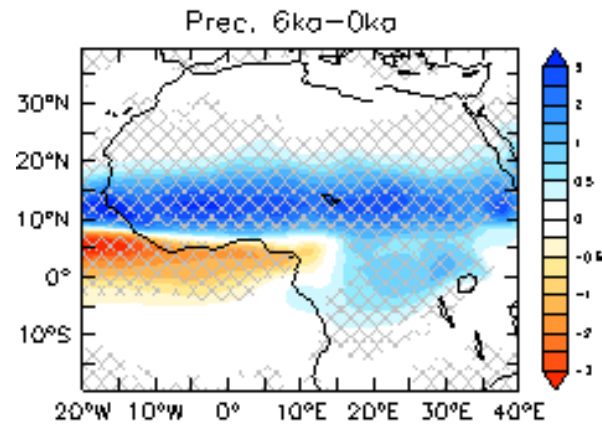


Difference de comportement:
 RCP8.5 : dominé par CO2 (annuel)
 MH dominé par insolation (saisonnier)

D'Agostino et al. GRL, 2019
 Emprunté de D'Agostino, PACMEDY Webinar, 2019

Mousson africaine JJAS

6k – 0k

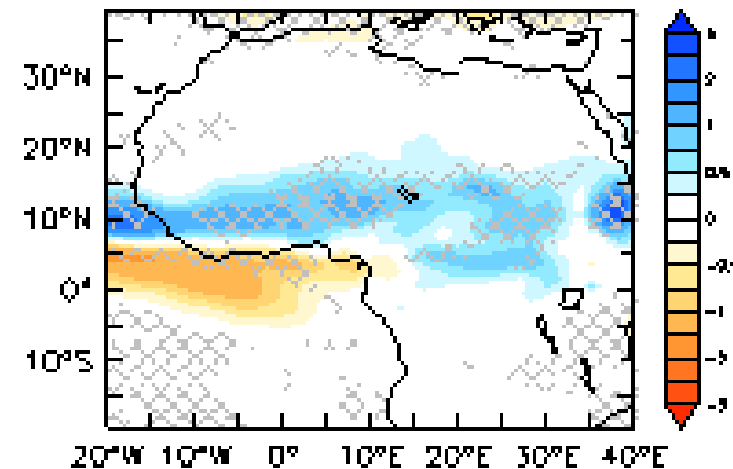


Analogie entre l'Holocène moyen et
4CO2sstclim

Test la partie du signal liée à gradient inter-
hémisphérique et terre/mer

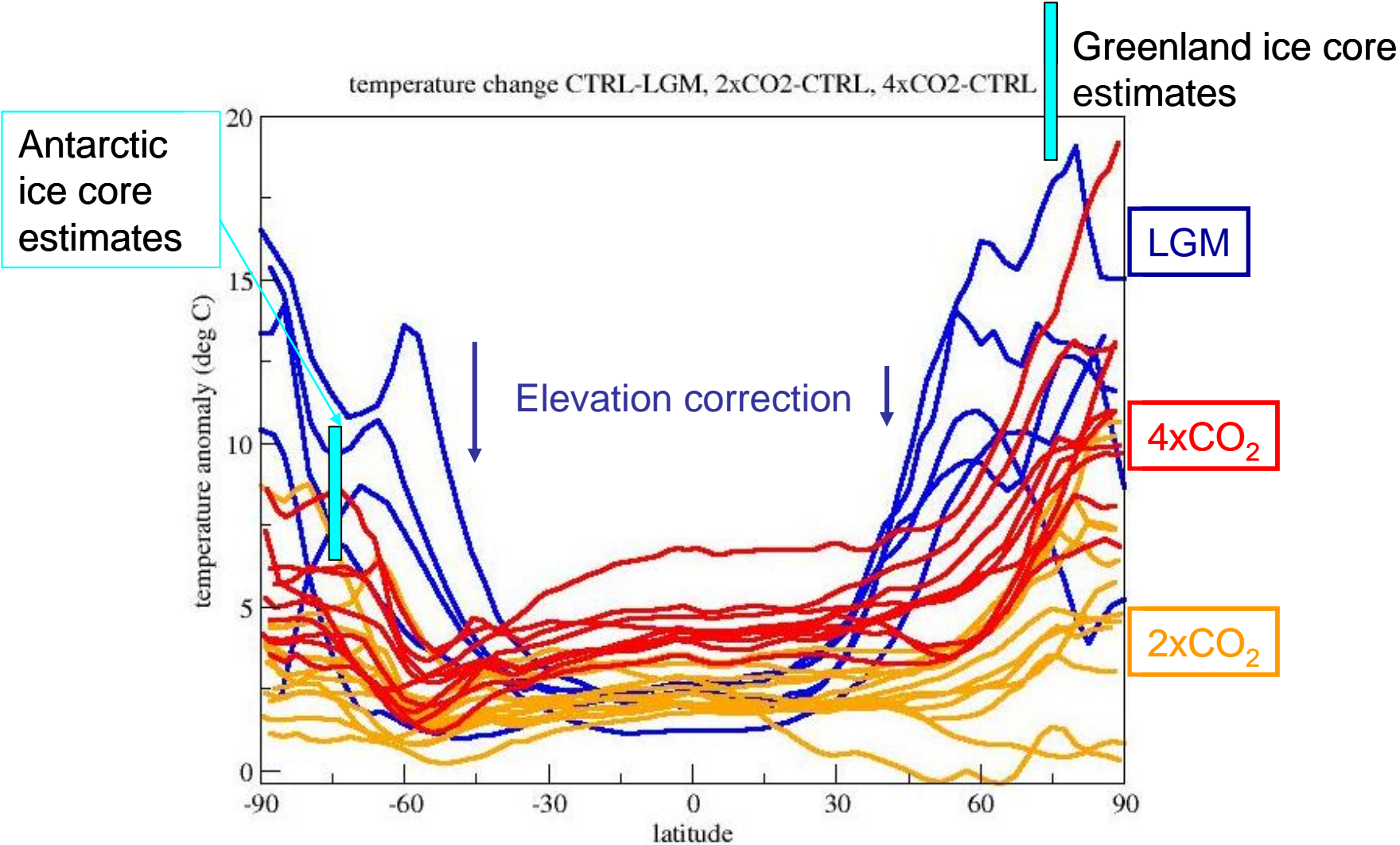
sstClim4xCO2-sstClim

MMM

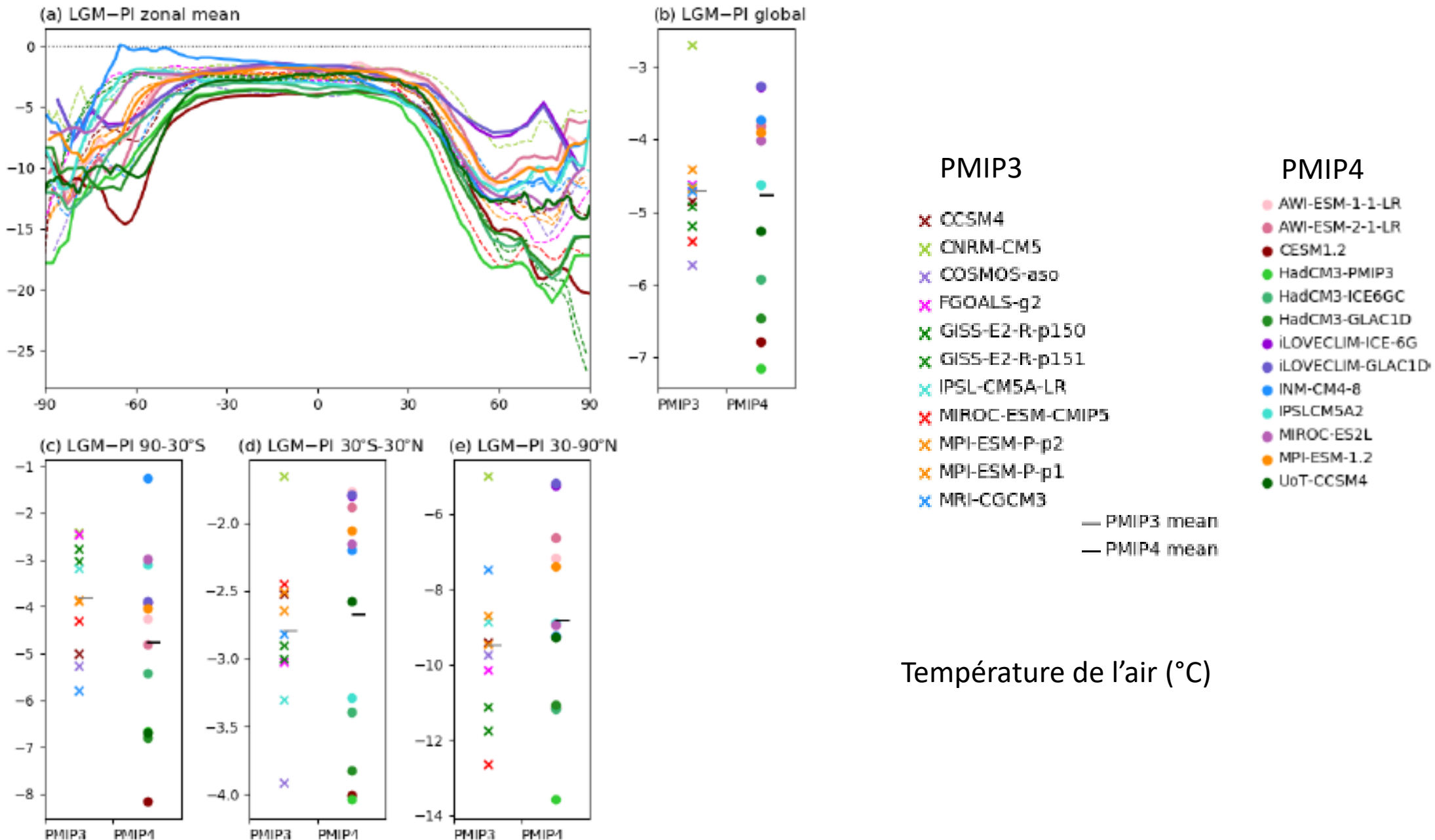


Hautes latitudes

Polar amplification (PMIP2)



Changement de température simulées pour PMIP 3 (CMIP5) et PMIP4(CMIP6)



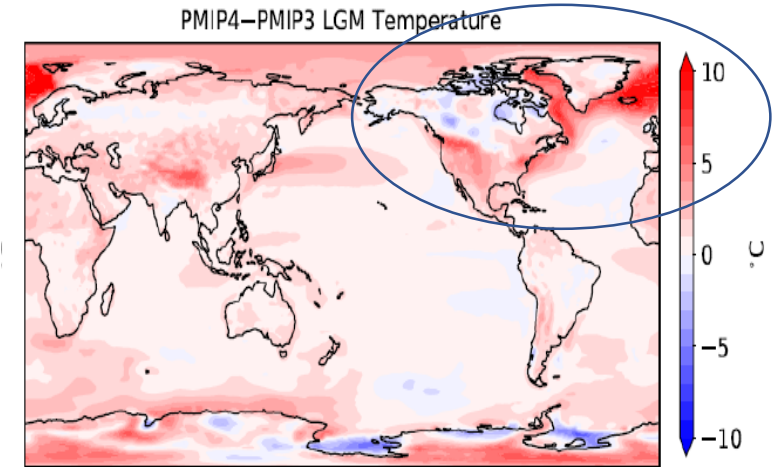
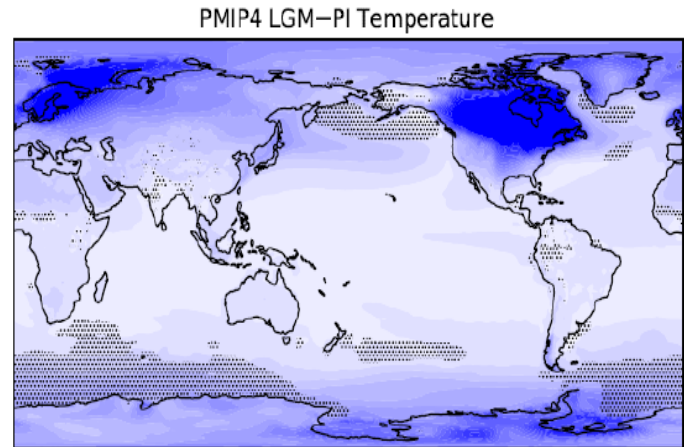
Température DMG simulées pour PMIP3 et PMIP4

PMIP4-CMIP6 :

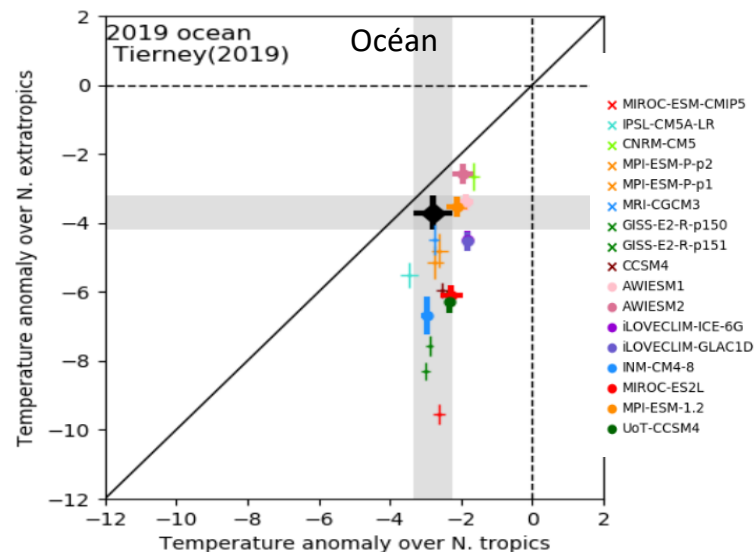
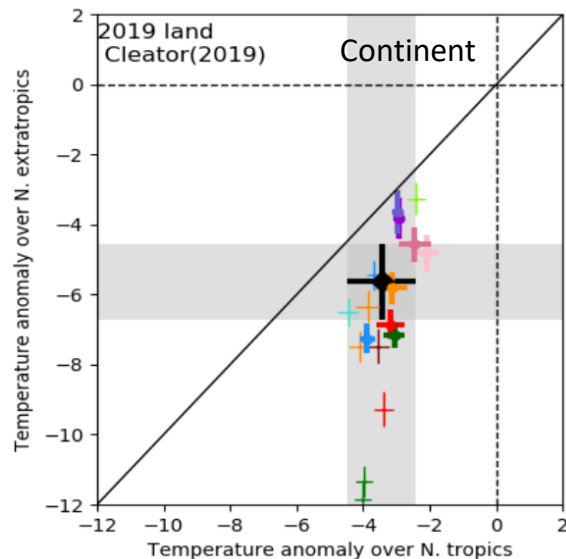
- Refroidissement moins marqué
- Moins de modèles extrêmes
- Tendance à trop froid dans les régions extratropicales N

Refroidissement annuel

Différence CMIP6 - CMIP5

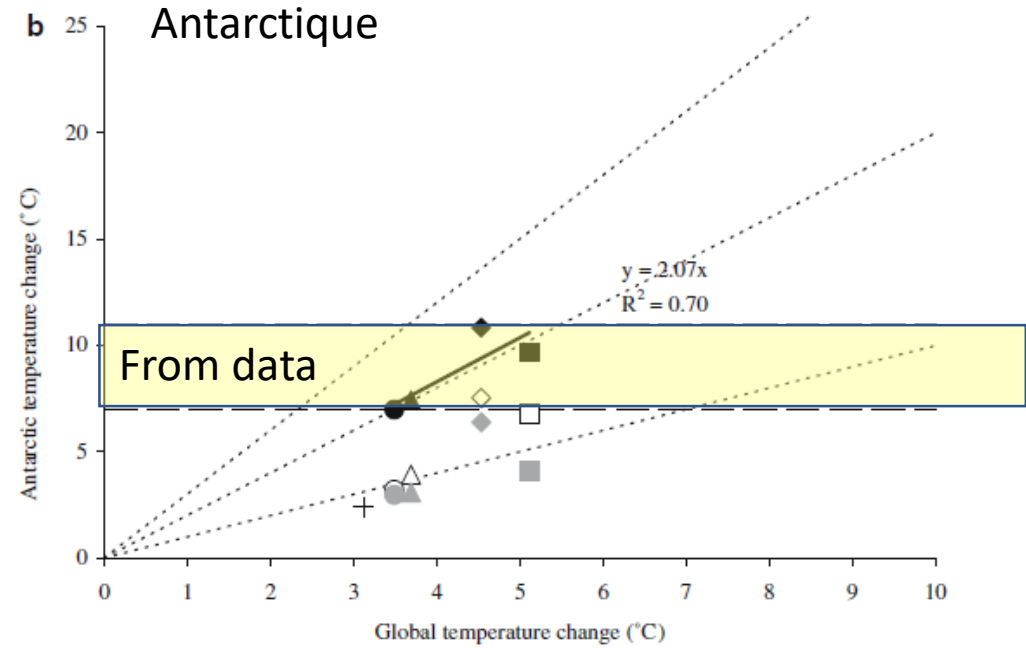
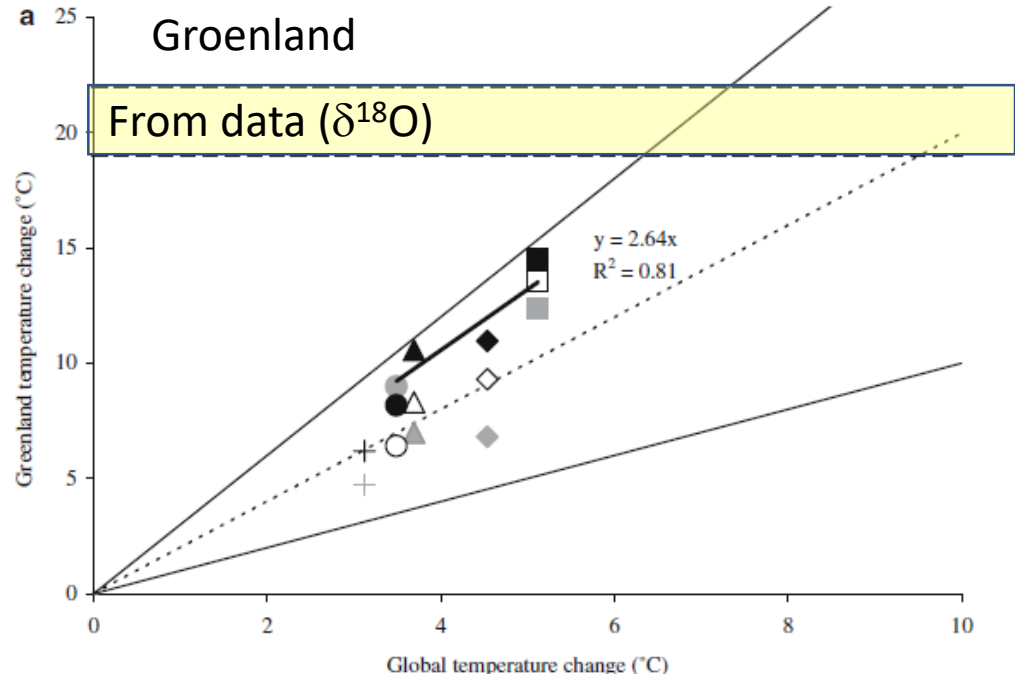


Comparaison modèles – reconstructions (échantillonnage aux sites de prélèvements)



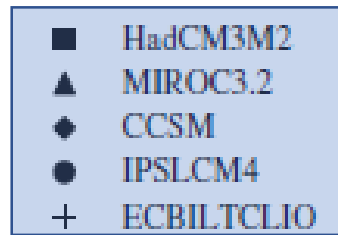
- × MIROC-ESM-CMIP5
- × IPSL-CM5A-LR
- × CNRM-CM5
- × MPI-ESM-P-p2
- × MPI-ESM-P-p1
- × MRI-CGCM3
- × GISS-E2-R-p150
- × GISS-E2-R-p151
- × CCSM4
- × AWIESM1
- × AWIESM2
- × ILOVECLIM-ICE-6G
- × ILOVECLIM-GLAC1D
- × INM-CM4-8
- × MIROC-ES2L
- × MPI-ESM-1.2
- × UoT-CCSM4

Pôles



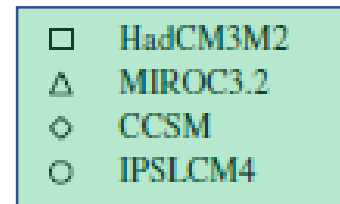
Prise en compte de différents effets

Sorties modèles



----- slope 3

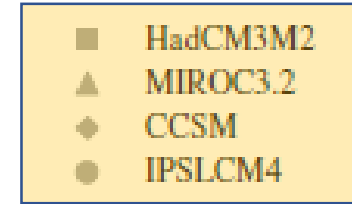
Correction altitude



----- slope 1

— range of reconstructions

Correction altitude + effet précipitation

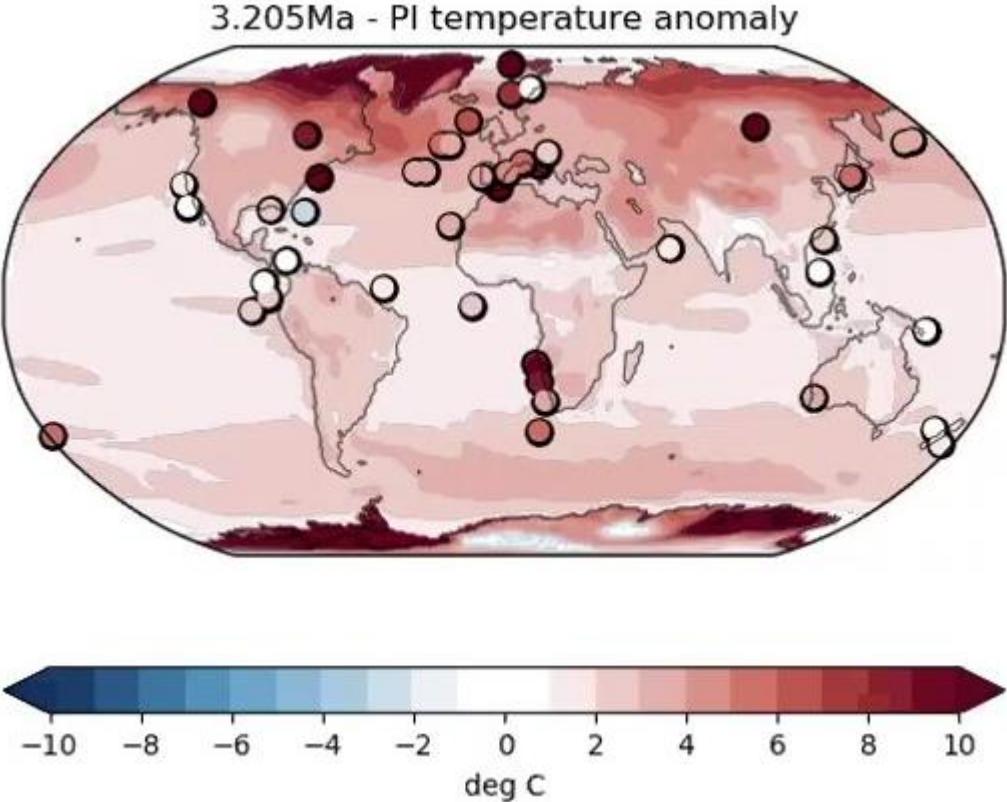


----- slope 2

— range of reconstructions

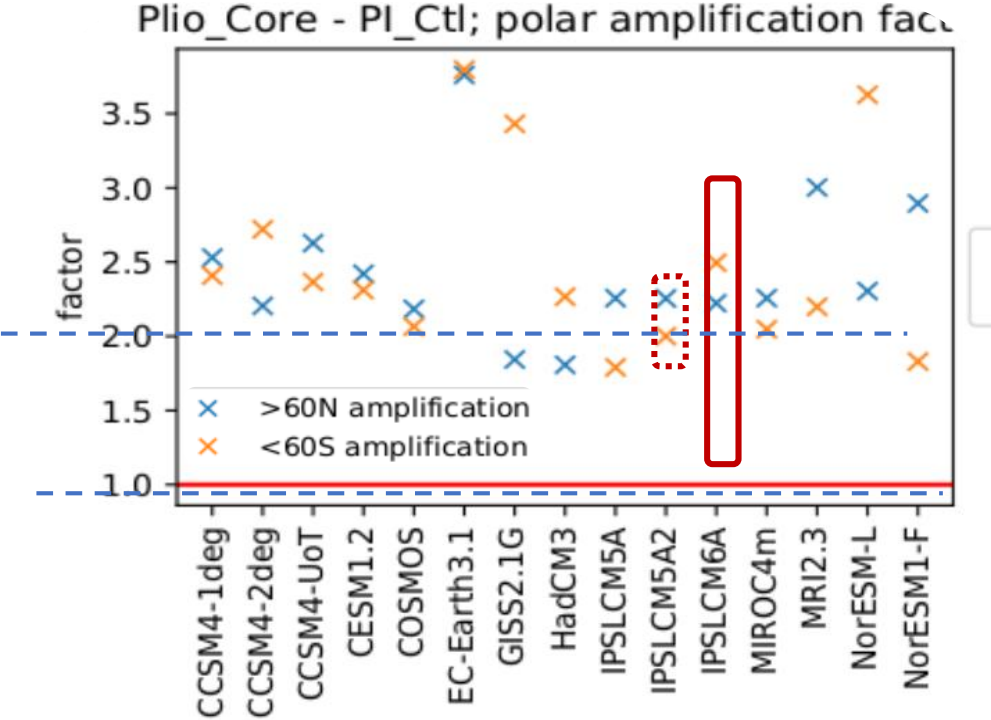
L'amplification polaire : Pliocène

Températures océanique
Pliocène – PI



Tan et al. 2020

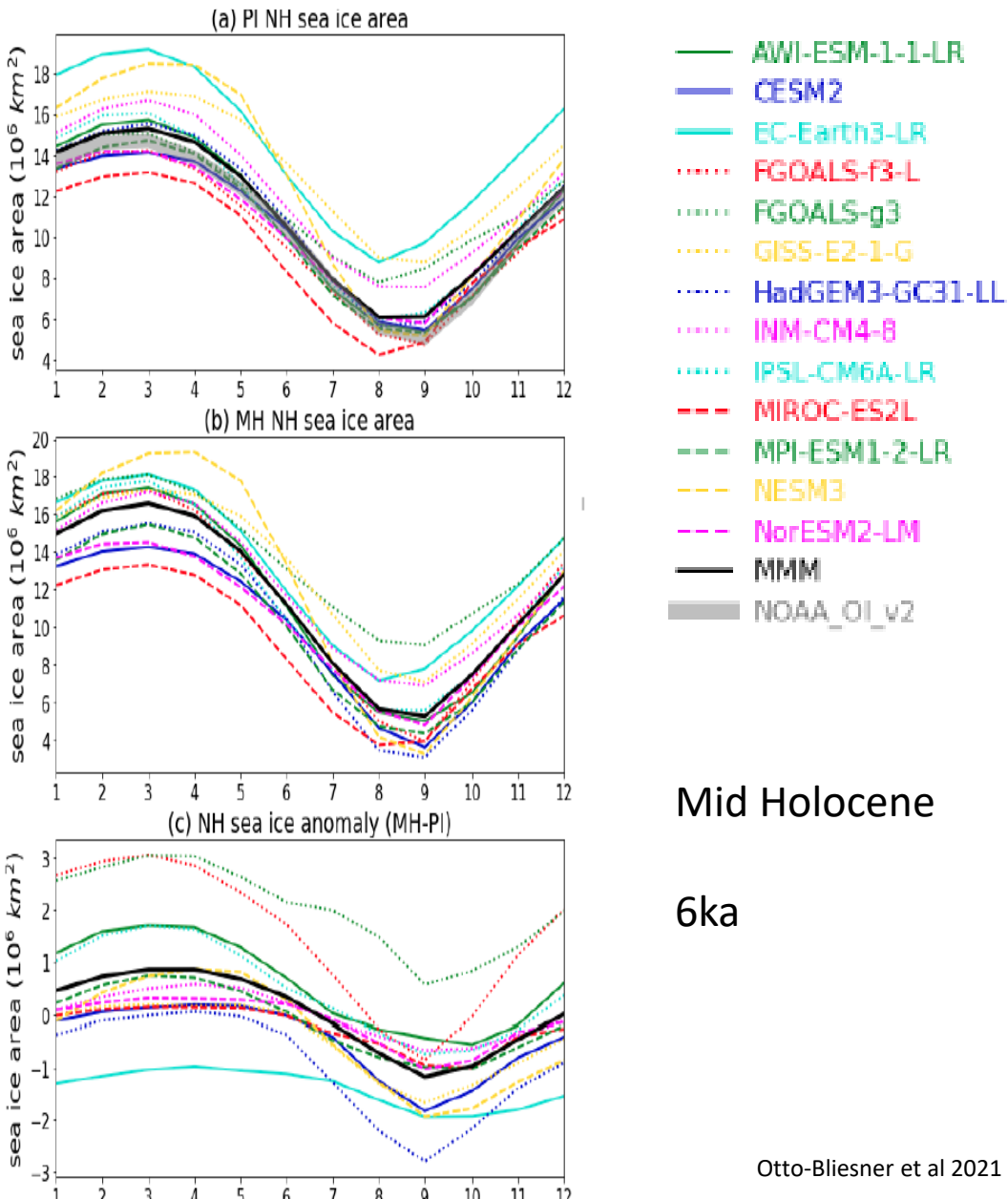
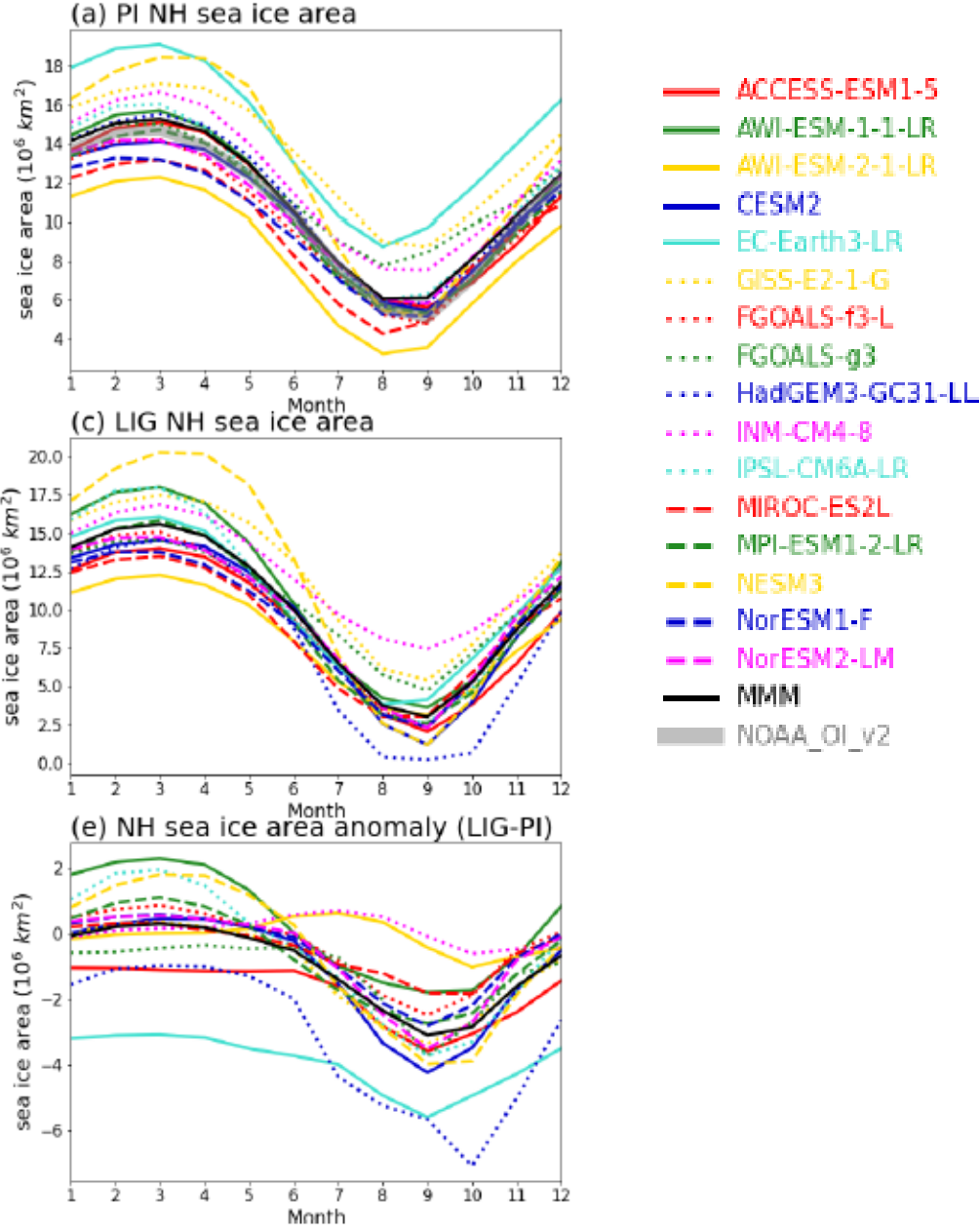
Facteur d'amplification polaire



Haywood et al. 2020

Sea-ice seasonality : response to insolation changes

Last
Interglacial
127ka

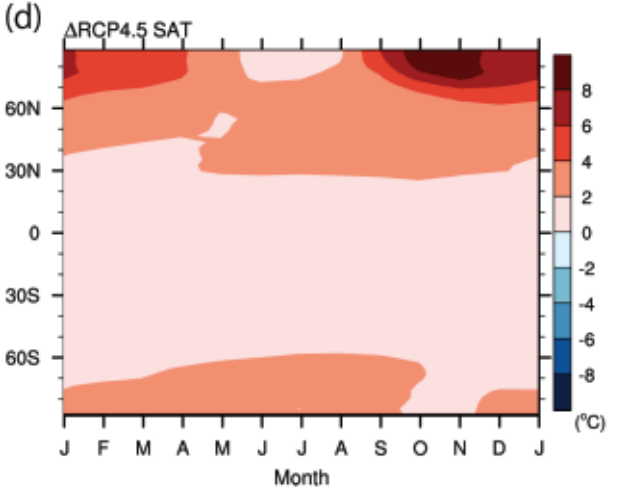
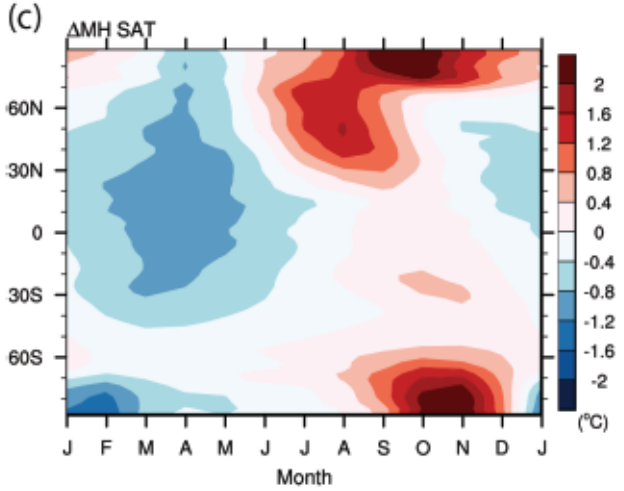
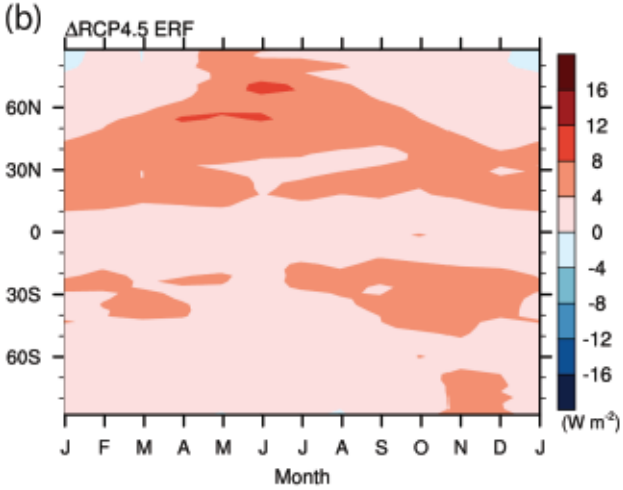
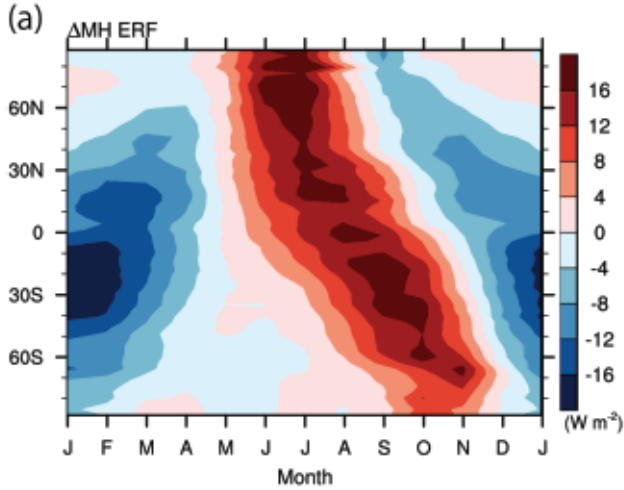
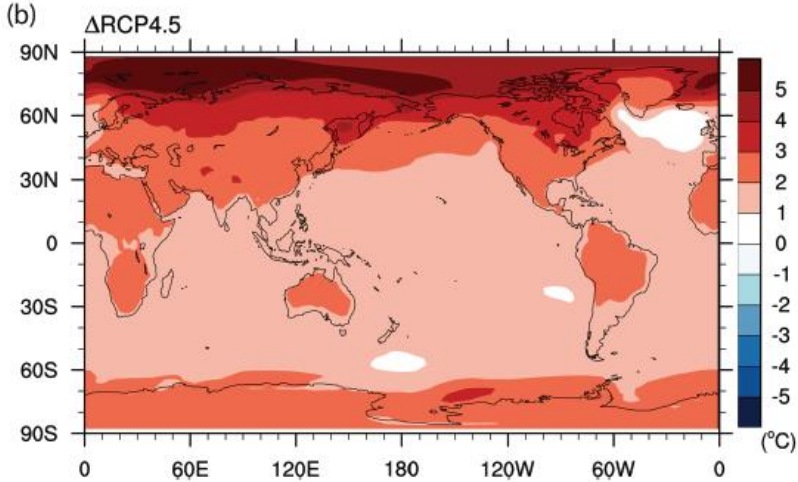
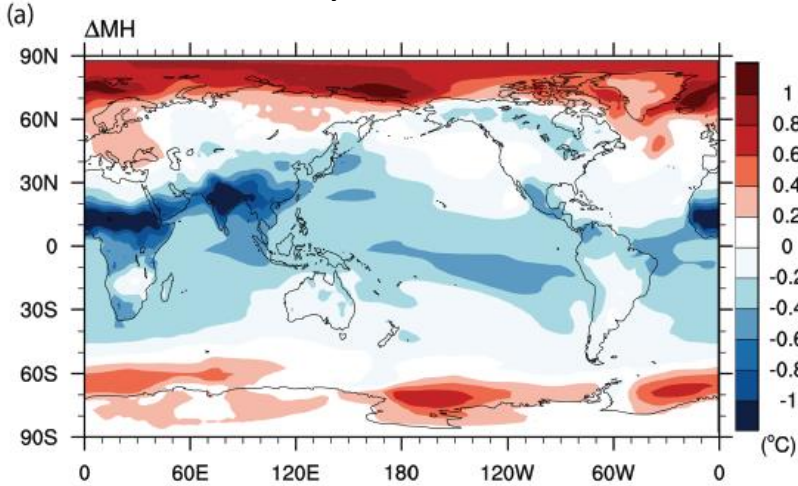


Mid Holocene
6ka

Bilan énergétique pour la surface océan N

Forçage effectif : moyenne zonale ($W.m^{-2}$)

ΔT annuel $^{\circ}C$ moyenne multi-modèles



Bilan de surface

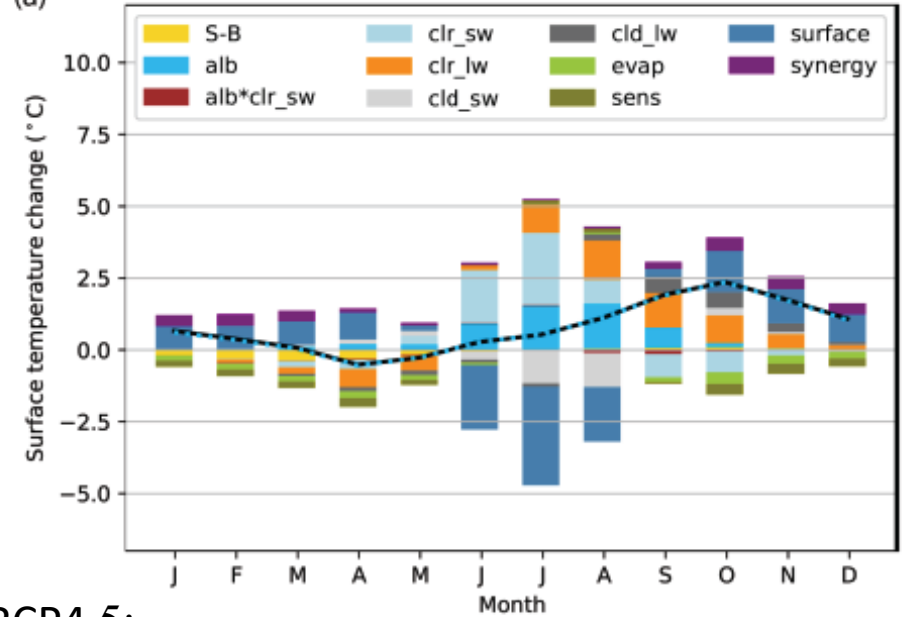
$$4\sigma T_s^3 \Delta T_s = \left[\begin{array}{l} -\Delta\alpha S - \Delta\alpha\Delta S + (1-\alpha)\Delta S^{clr} + (1-\alpha)\Delta S^{cld} \\ +\Delta F^{clr} + \Delta F^{cld} - \Delta H - \Delta L - \Delta Q \end{array} \right] \equiv \sum_j \Delta R_j$$

$$\Delta T_s = \overline{\left(\frac{\partial T_s}{\partial R}\right)} \sum_j \Delta R_j' + \left(\frac{\partial T_s}{\partial R}\right)' \sum_j \overline{\Delta R_j} + \left(\frac{\partial T_s}{\partial R}\right)' \sum_j \Delta R_j'$$

Analogies possibles durant période « estivale »

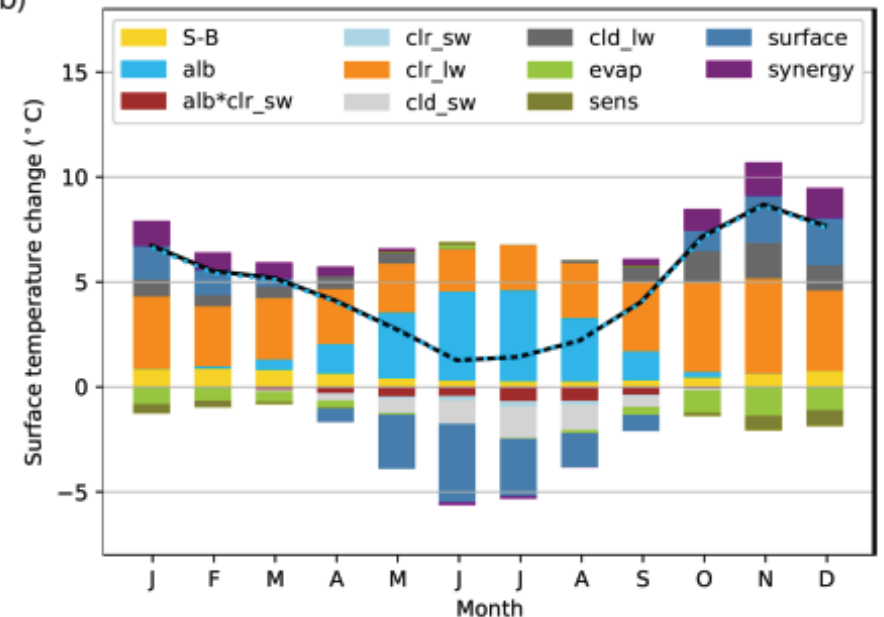
ΔMH

(a)



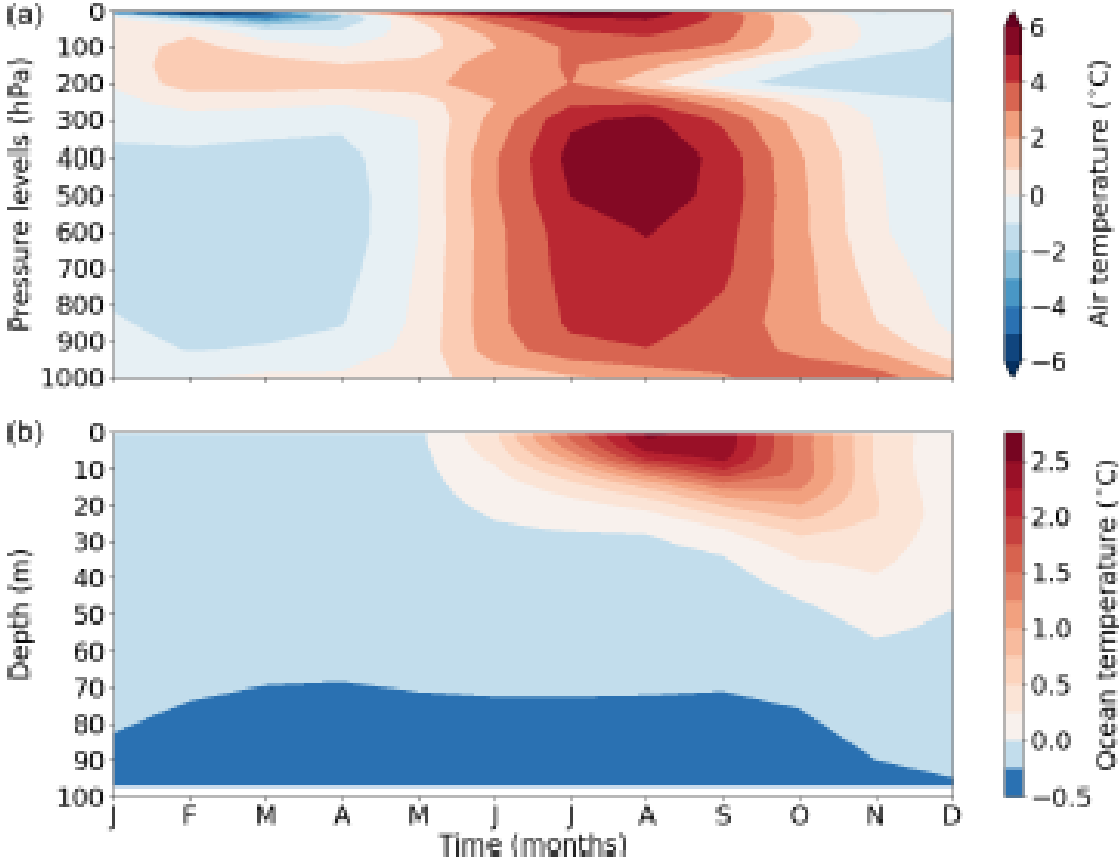
$\Delta RCP4.5:$

(b)

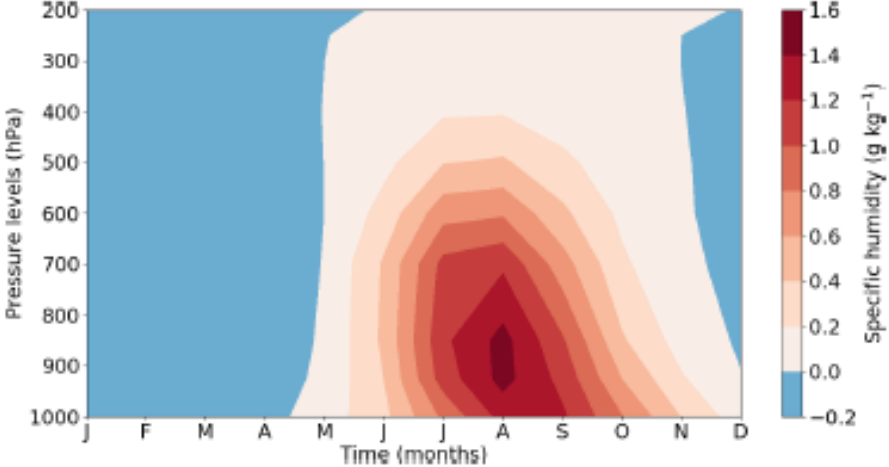


Le dernier interglaciaire (127ka) 60°N-90°N Arctique

Température en fonction de l'altitude (profondeur)

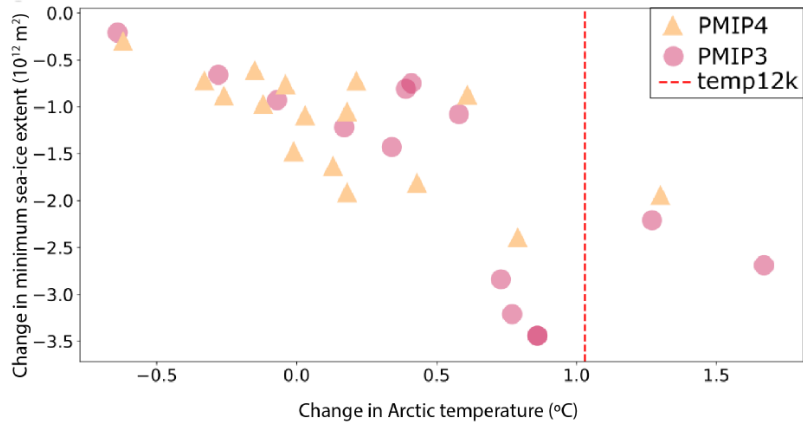


Humidité spécifique



Polar amplification and sea ice: further constraint from multi periods?

Mid Holocene seaice/Arctic temperature

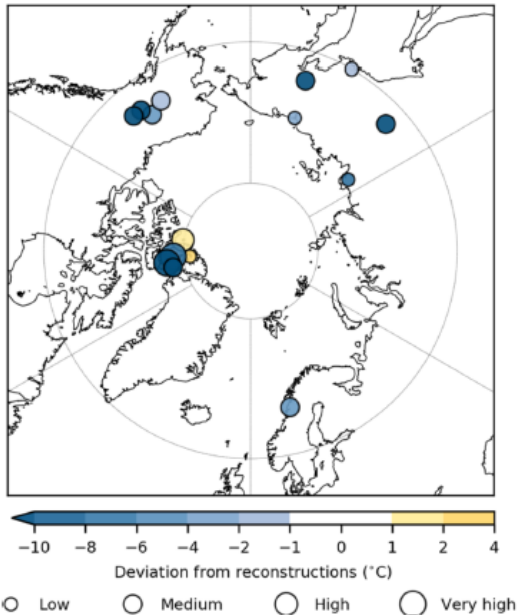


Brierley et al. 2020, Brierley et al PAGES 2021



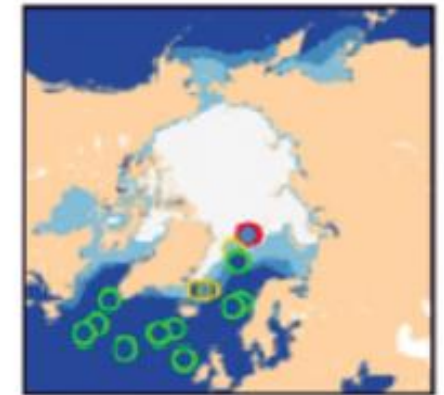
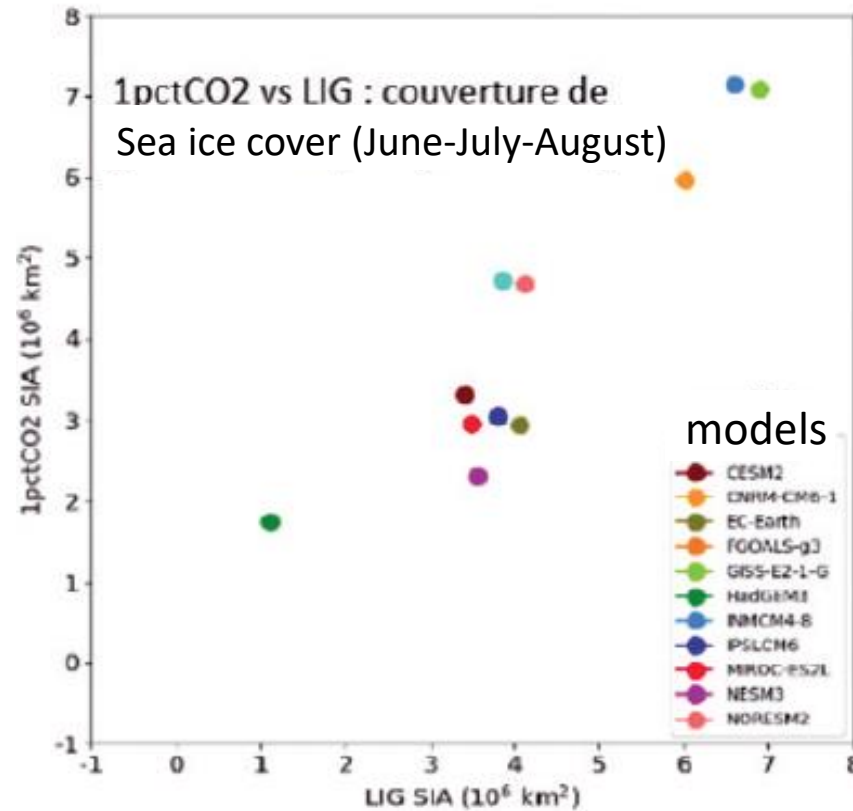
Constraints from annual AND seasonal information to provide both metrics and linkages with key feedbacks : multi periods and fit for purpose approaches (processes)

Pliocene:
Multimodel
mean
temperature
difference with
reconstruction



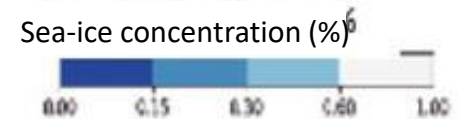
Nooijer et al. CP 2020

Multimodel ensemble mean



Nb of models in agreement with reconstructions

- < 5
- de 5 à 9
- > 9

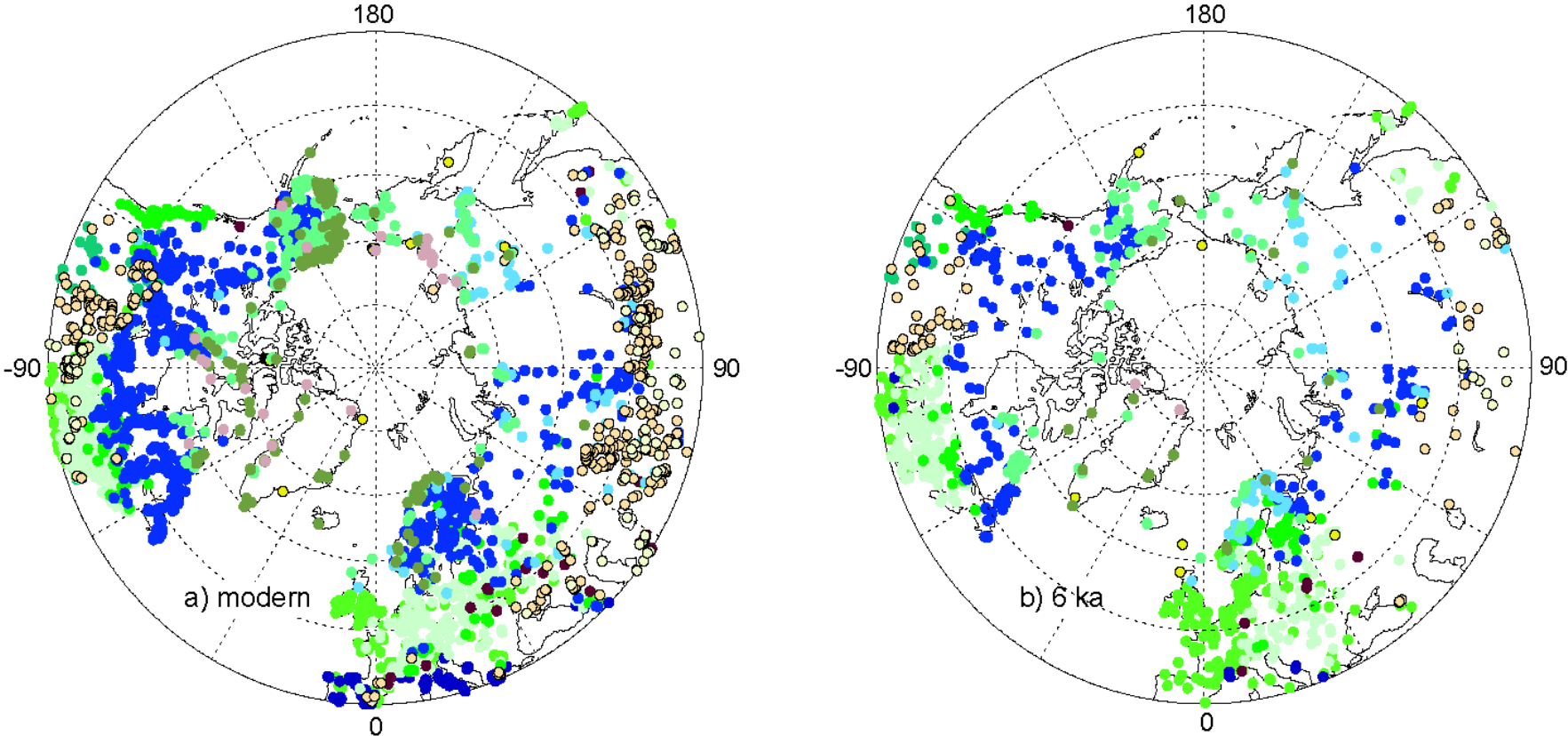


Kageyama et al. 2021, Otto-Bliesner et al. 2021 ...

It requires making use of specific « proxy » dependant « environnemental » information in model-data comparison

Réponse de la végétation

Reconstitution de la végétation à l'Holocène moyen

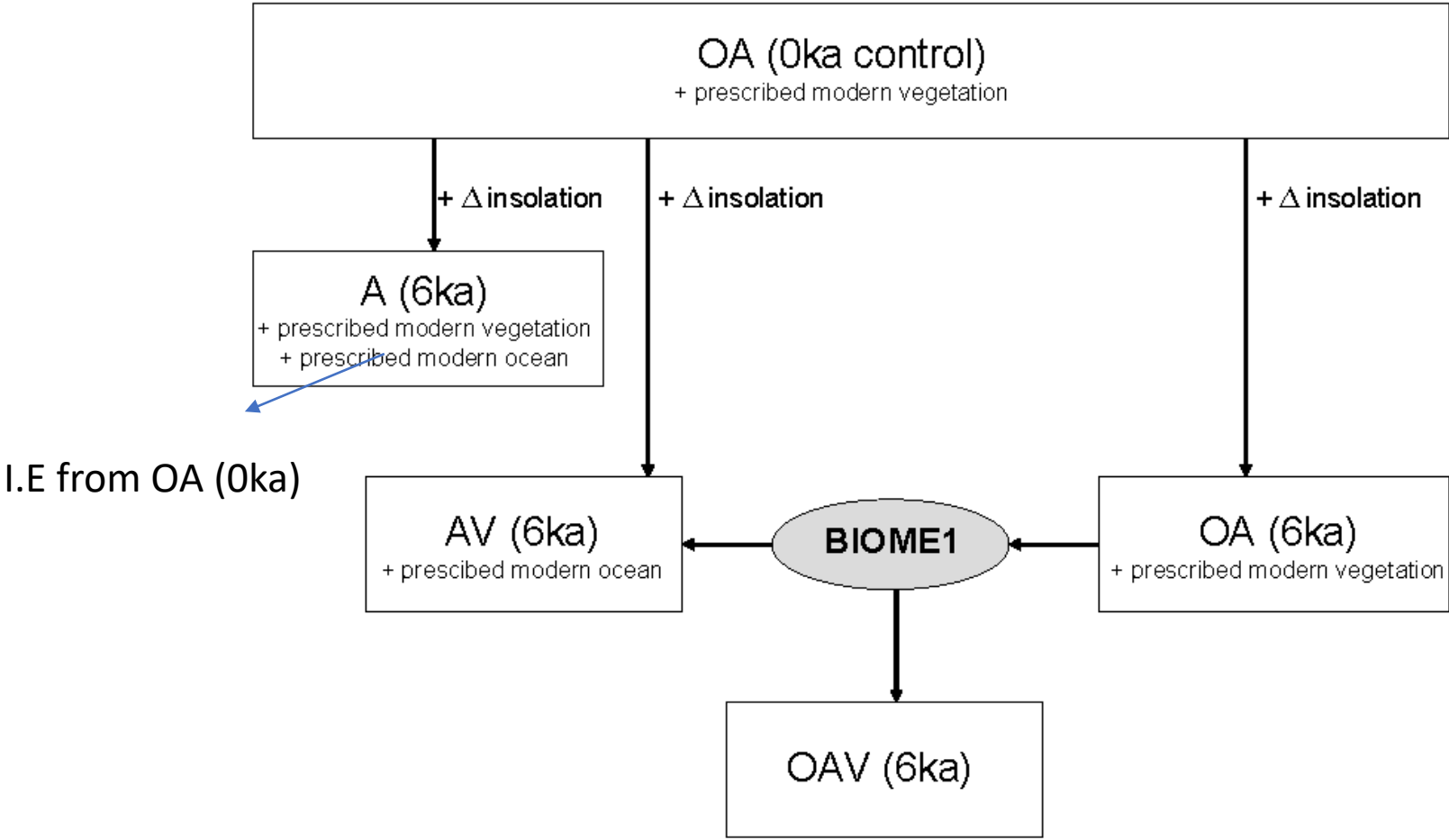


a) modern

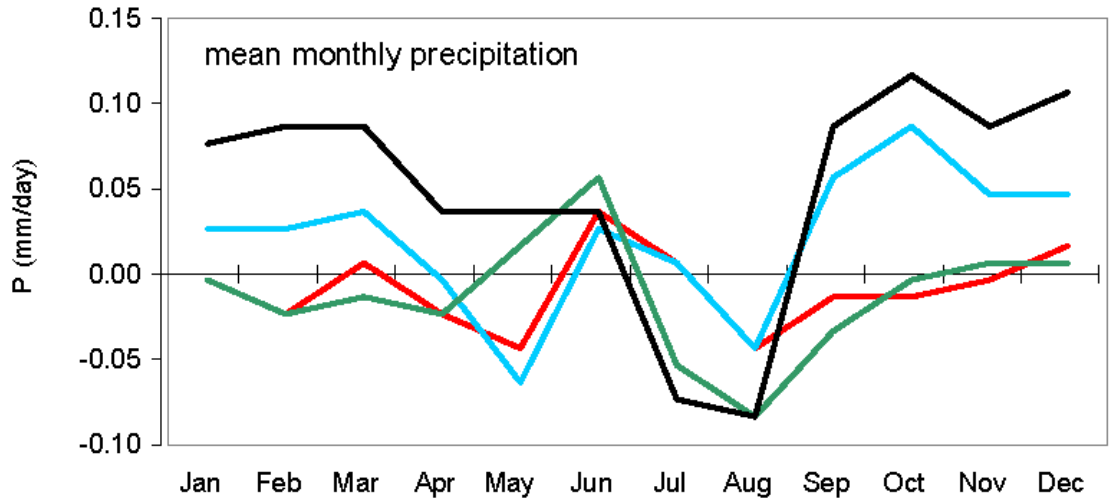
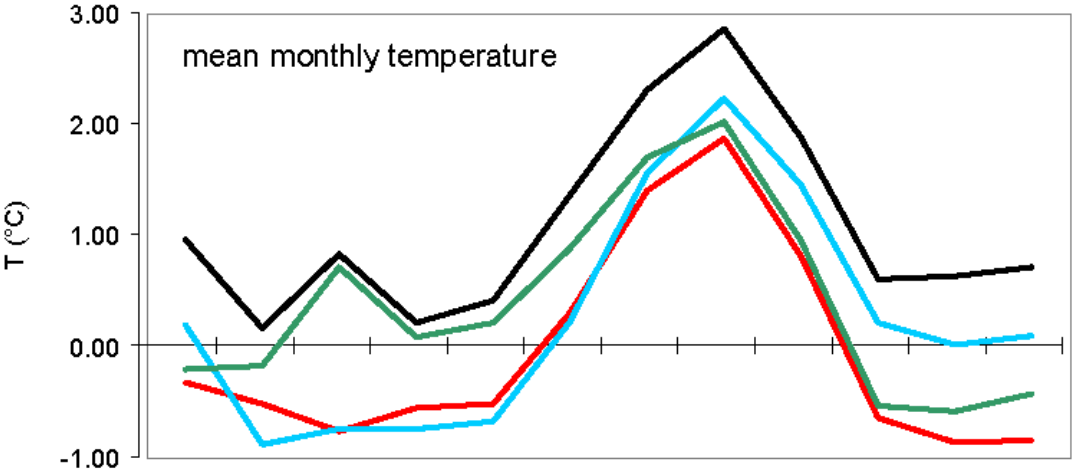
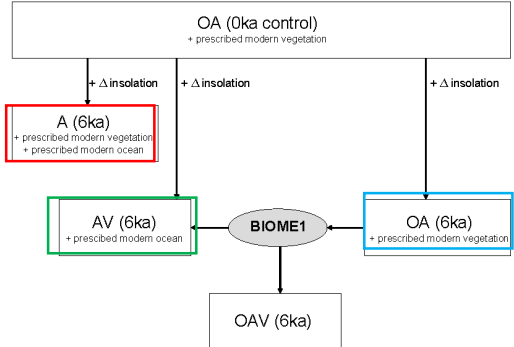
b) 6 ka



Simulations avec changements de végétation interactifs

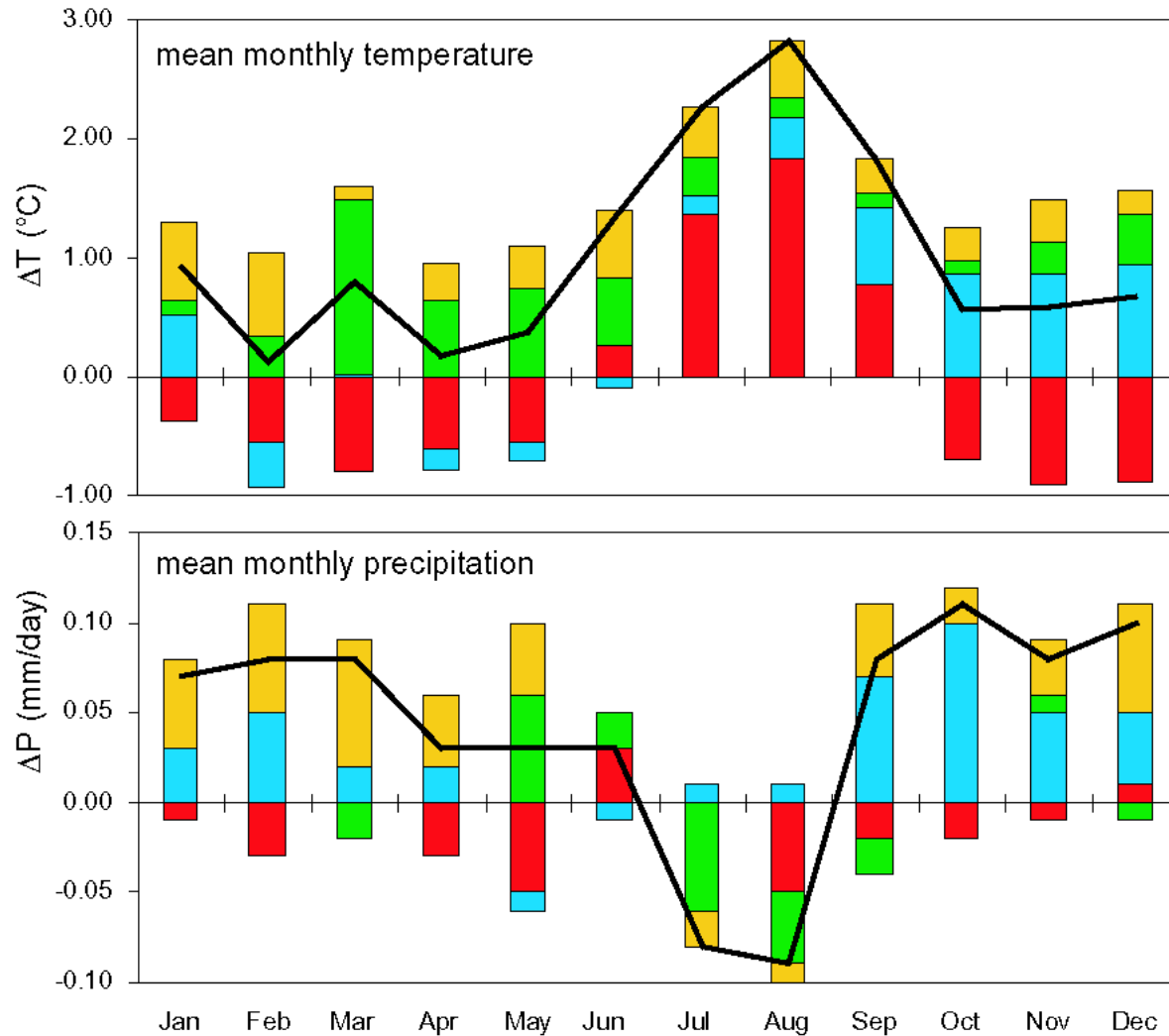


Simulations avec végétation interactive (2)



- A 6ka
- OA 6ka
- AV 6ka
- OAV 6ka

Décomposition des différents effets : moyennes latitudes > 40°N



$$A - OA0k \rightarrow \Delta A_f$$

$$AV - OA0k \rightarrow \Delta A_f + \Delta V_f + \Delta SAV$$

$$OA - OA0k \rightarrow \Delta A_f + \Delta O_f + \Delta SOA$$

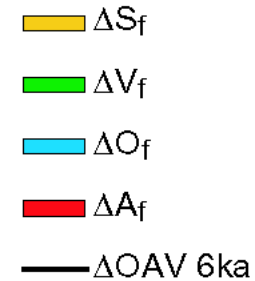
$$OAV - OA0k \rightarrow \Delta A + \Delta V_f + \Delta O_f + \Delta S$$

$$AV - A \rightarrow \Delta V_f + \Delta SAV$$

$$OA - A \rightarrow \Delta O_f + \Delta SOA$$

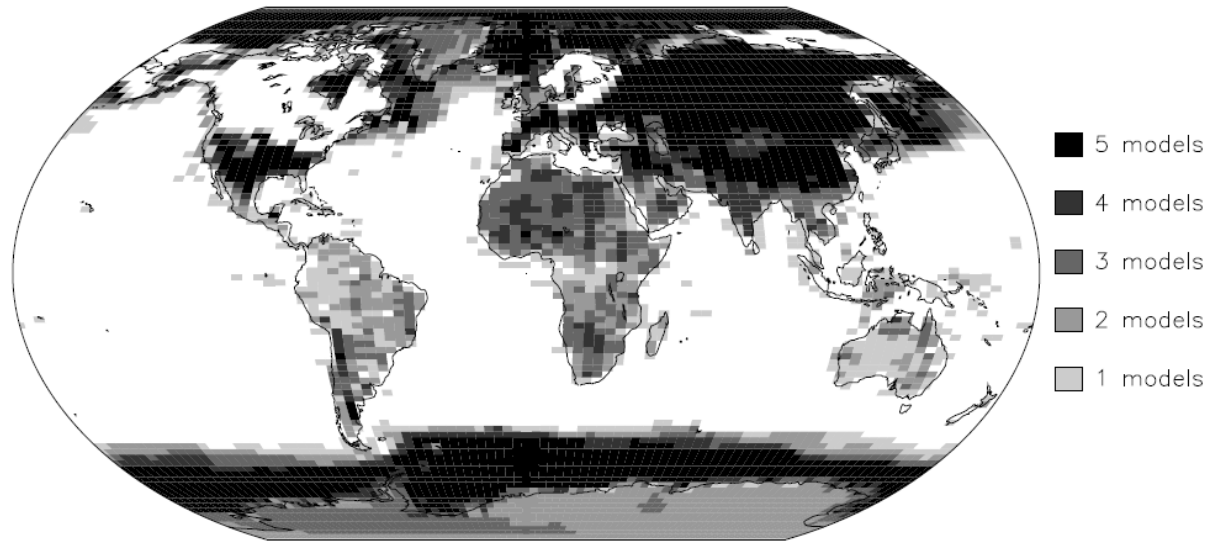
$$OA - AV \rightarrow \Delta V_f + \Delta SOV$$

Combinaisons entre les simulations pour estimer ΔA_f , ΔO , ΔV_f et ΔS

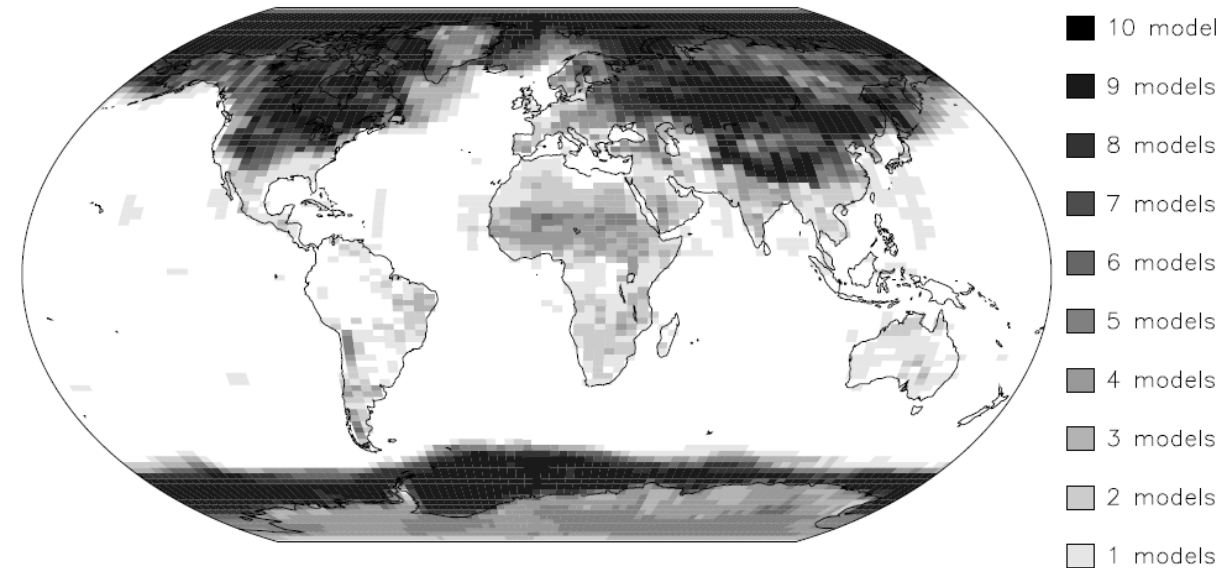


Rétroaction lié au changement d'albédo de surface (neige et végétation)

LGM



MH



Critère au moins 1 mois dans l'année ou $|\text{effet}| > 0.5 \text{ W.m}^2$

Modèle ayant soit un cycle du carbone interactif (LAI de la végétation ou végétation dynamique)

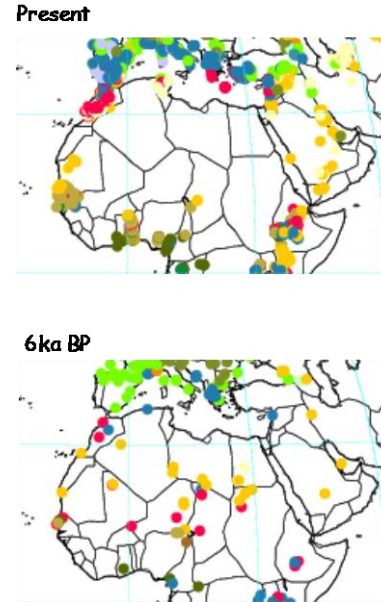
La mousson africaine

(see IPCC 2001)

: Desert/stepp transition for the Mid-Holocene

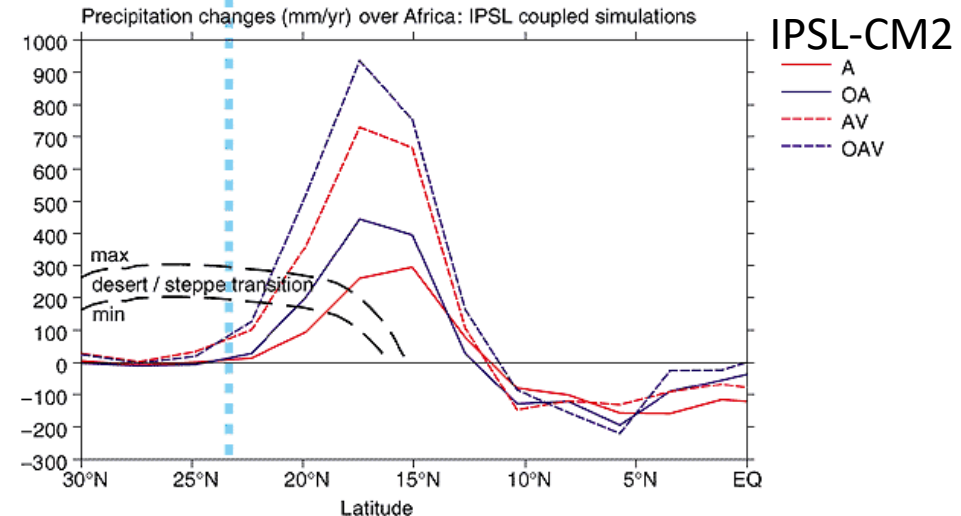
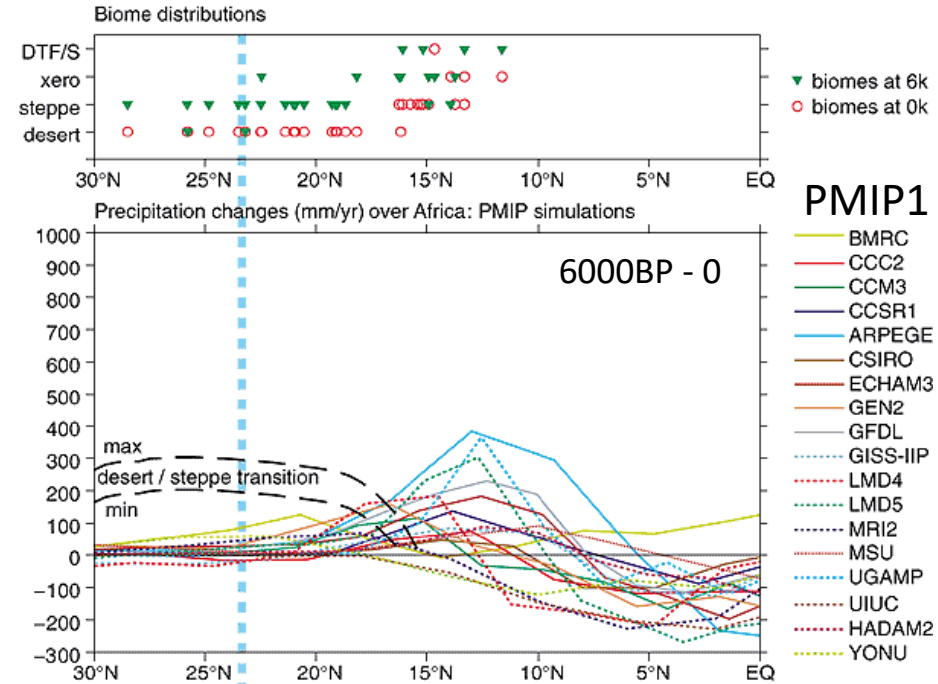
or

"Is the simulated change in African monsoon far enough to the north?"



Jolly et al 1998, Harrison et al. 1998

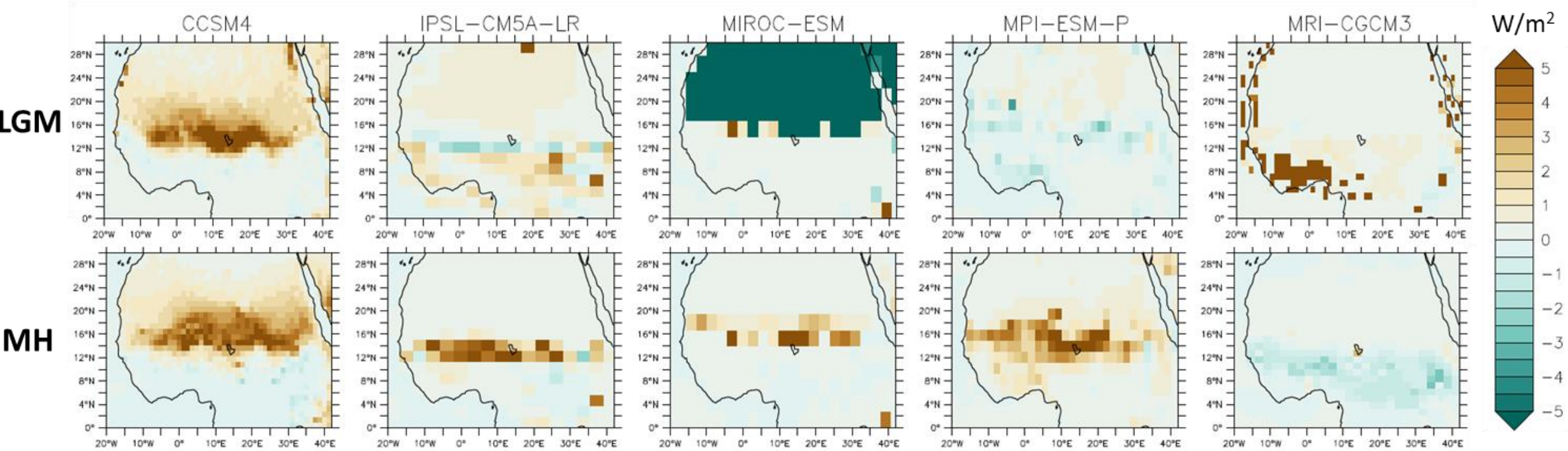
- Model underestimate northward shift
- Ocean and vegetation feedback needed
- But still a long way to be able to do fully reproduce the African environment.



Adapted from Joussaume et al 1999 and Braconnot et al. 1999 inspired from AV simulations Claussen and Gayler 1997, Texier et al. 1997)

Mousson Africaine

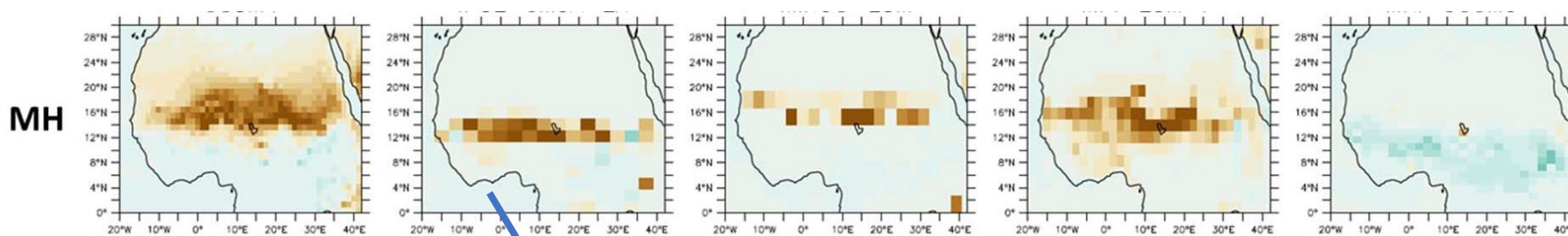
PMIP3 : Juillet-Août-Septembre



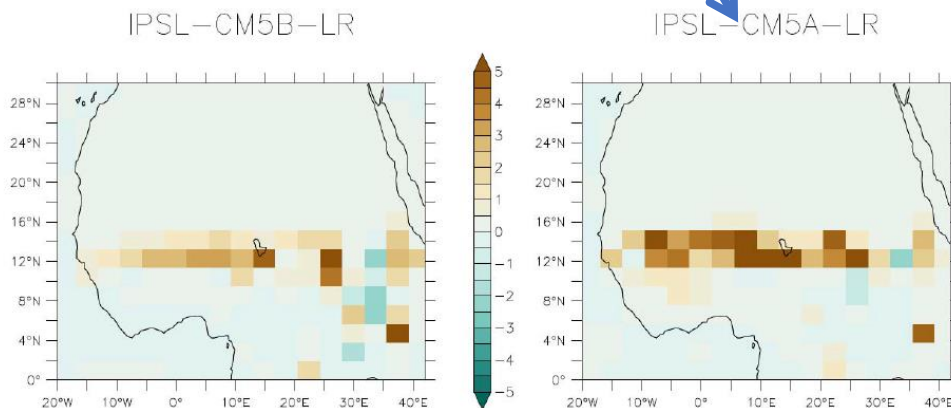
Impact radiatif de la végétation (August)

W/m²

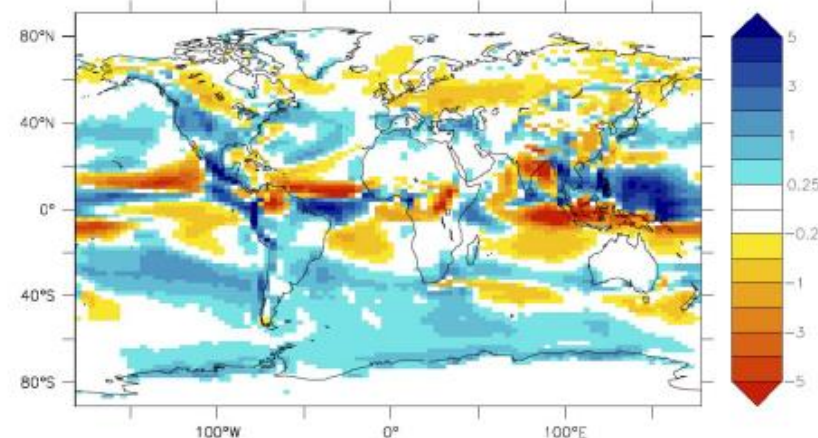
PMIP3 simulations (5 models): mid-Holocene (6ka)



Two versions of the IPSL model : differences only in atm physics.

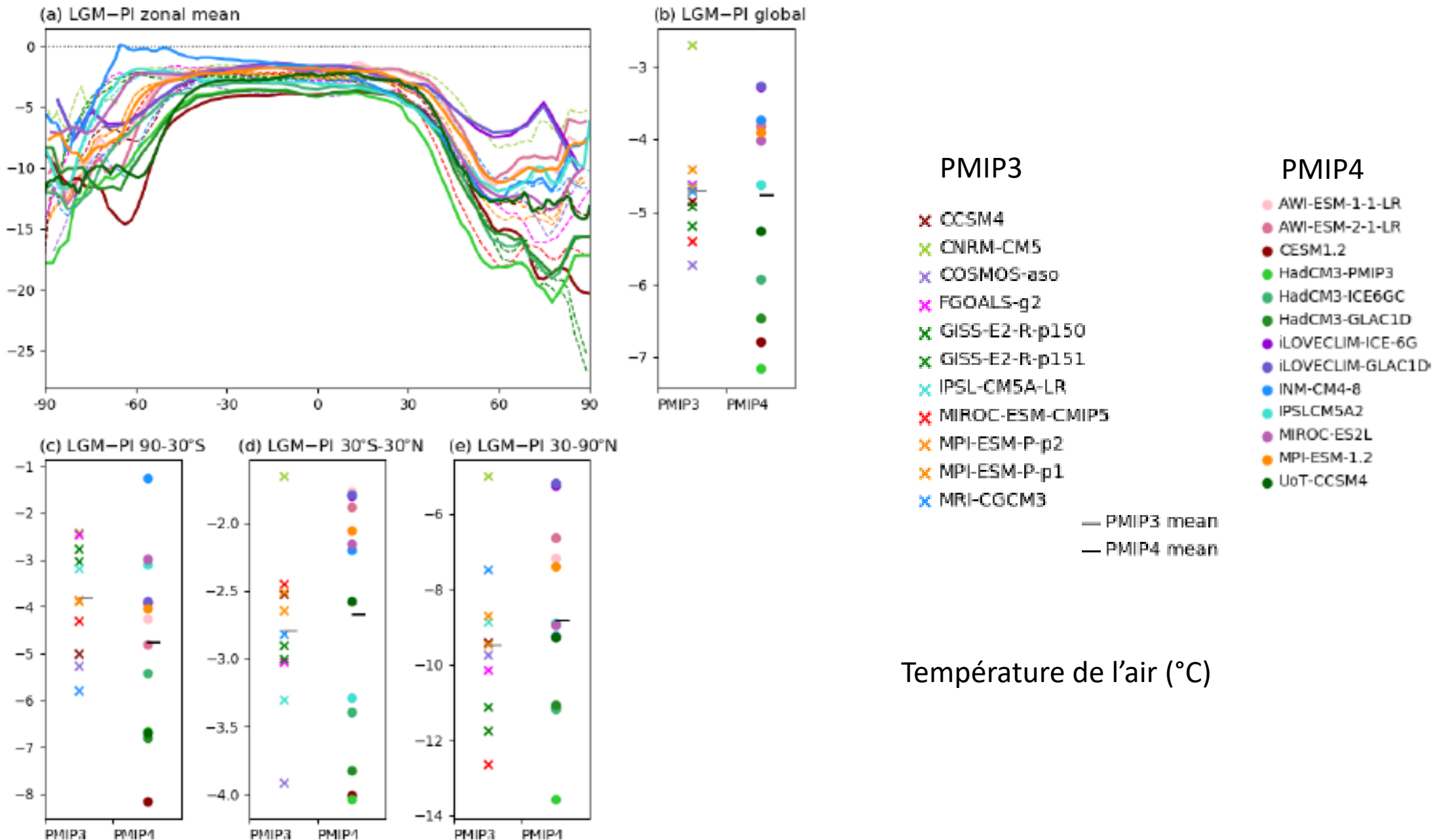


CM5B-CM5A 0ka I



Role or control simulation : not only vegetation or surface modeling but also
Location of ITCZ, precipitation /convective regimes, soil moisture in semi-arid area,
description of surface vegetation in model gridbox, model tuning....

Changement de température simulées pour PMIP 3 (CMIP5) et PMIP4(CMIP6)



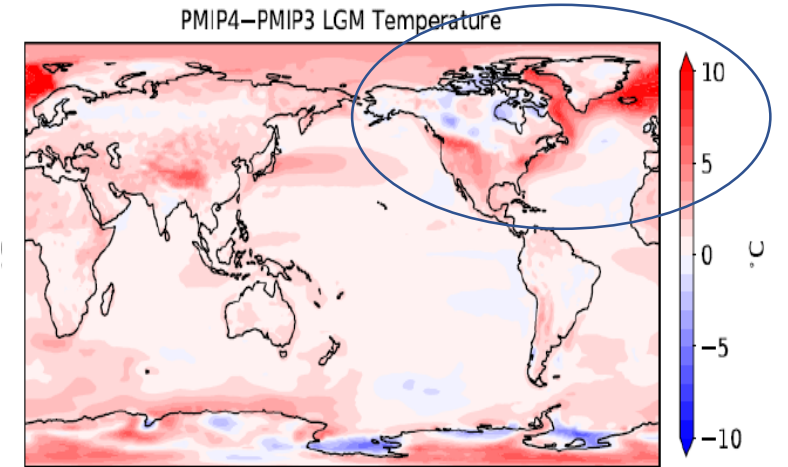
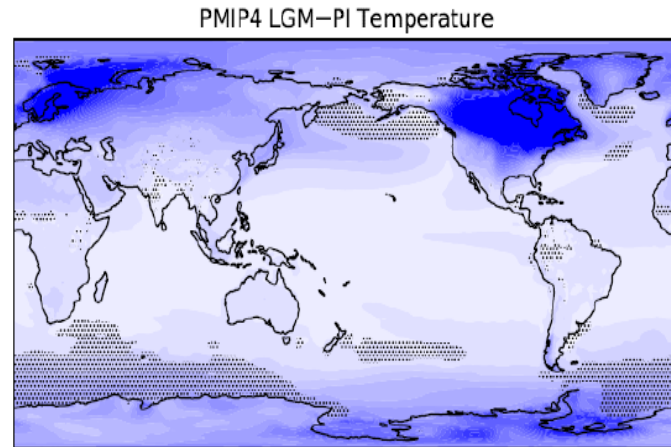
Température DMG simulées pour PMIP3 et PMIP4

PMIP4-CMIP6 :

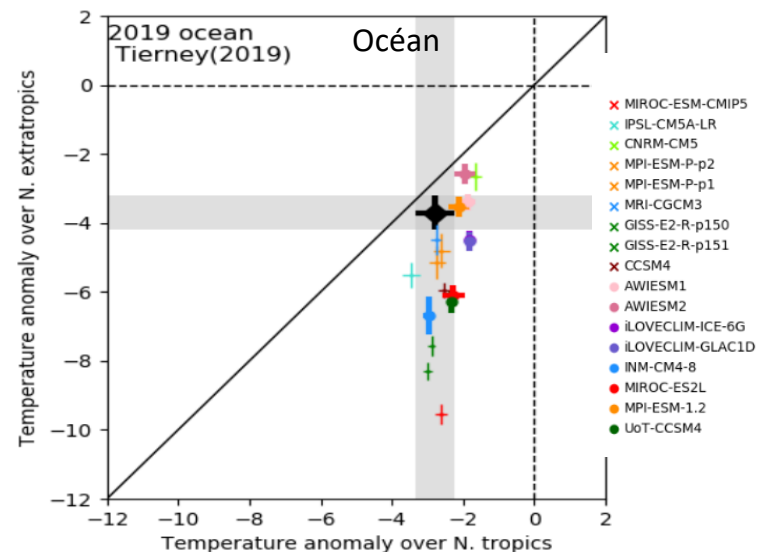
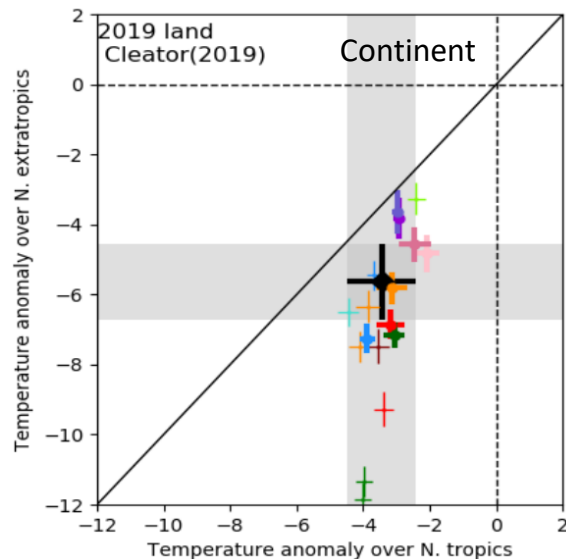
- Refroidissement moins marqué
- Moins de modèles extrêmes
- Tendance à trop froid dans les régions extratropicales N

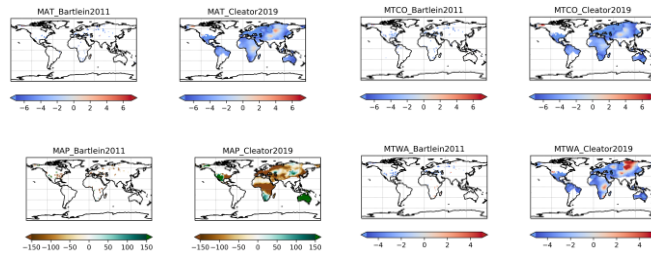
Refroidissement annuel

Différence CMIP6 - CMIP5



Comparaison modèles – reconstructions (échantillonnage aux sites de prélèvements)





- ❖ Improved data coverage (ex South America)
- ❖ New methodology to account for areal representation of the different data points (see Cleator et al, CPD, 2019)