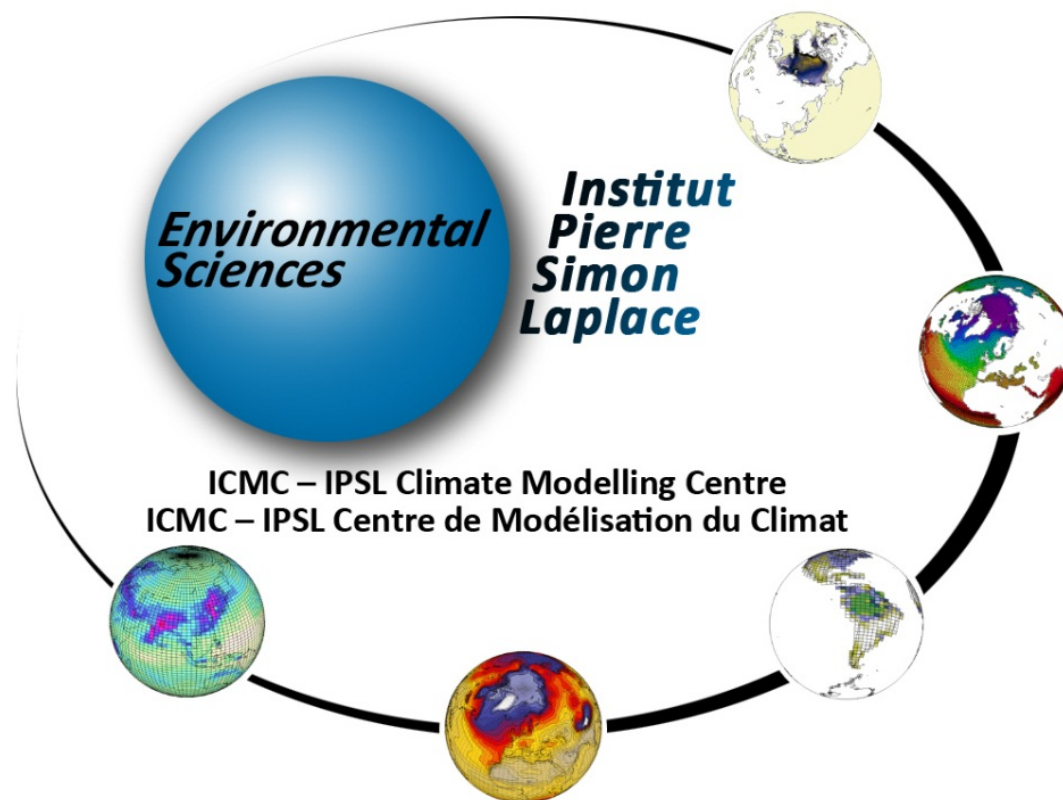


Contribution de l' IPSL au projet CMIP5



Paris, 26 février 2013

Plan

- I. Réalisation des simulations CMIP5
- II. Robustesses et incertitudes de quelques aspect des changements climatiques
- III. Réalisation pratique et premiers bilans

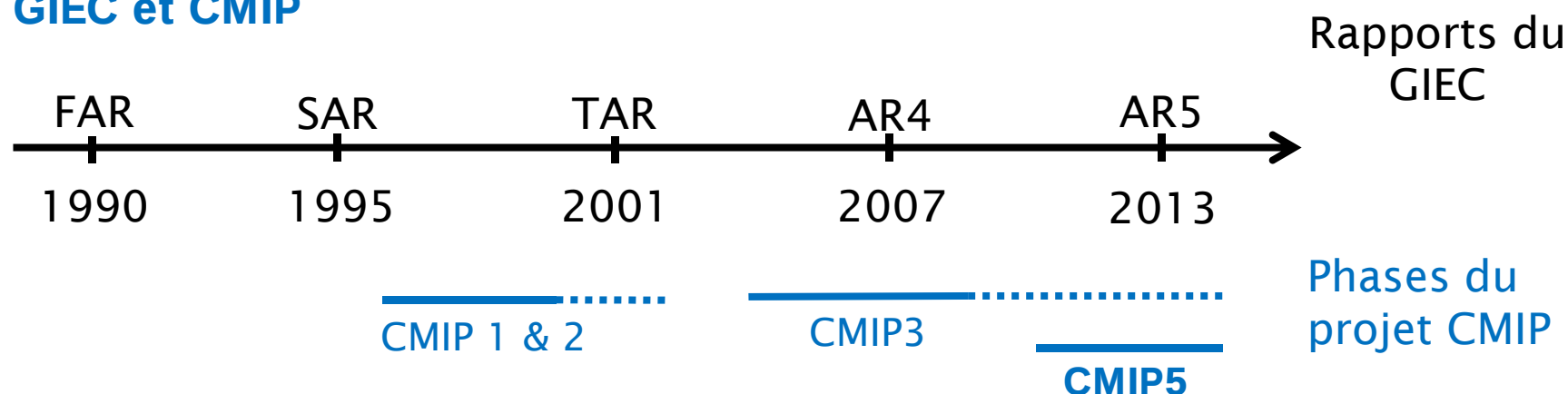
CMIP

Coupled Model Intercomparison Project

Un projet de comparaison de résultats de modèles climatiques

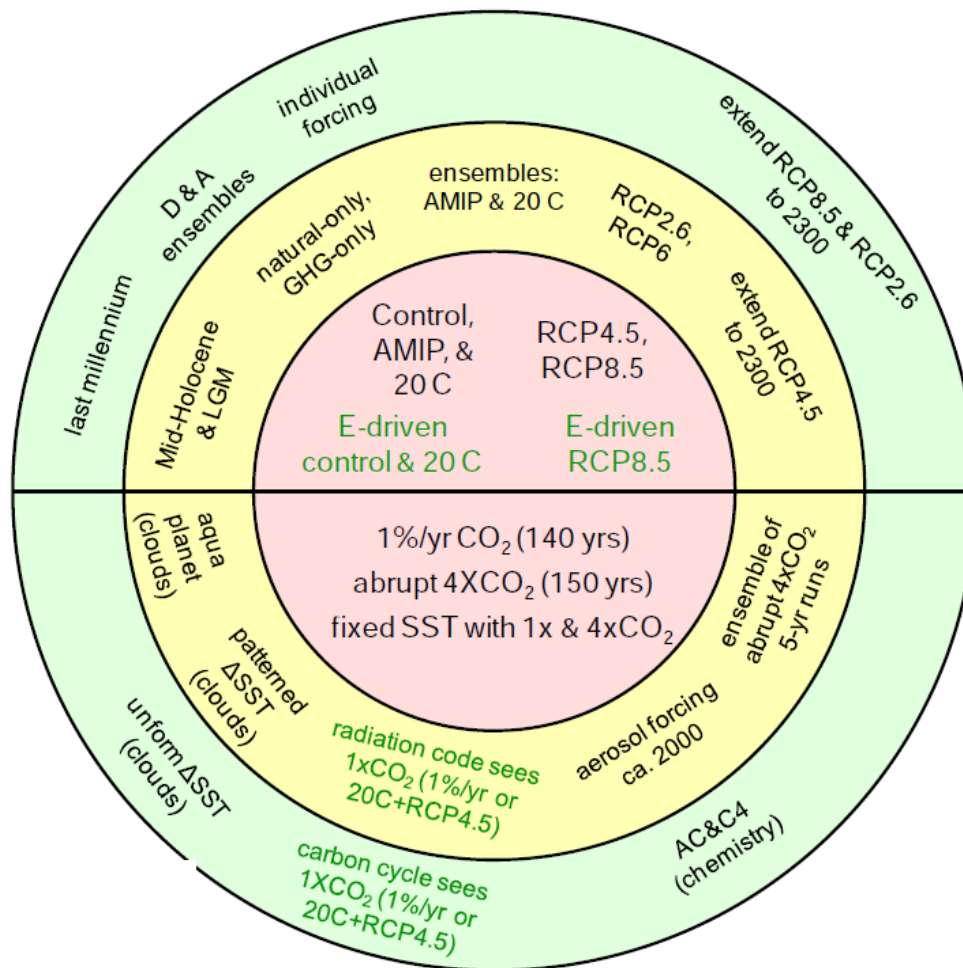
- Modèle couplé Atmosphère – Continent – Océan – Glace
- Simulations numériques en respectant un protocole défini
- Mise à disposition des résultats selon un protocole défini
- Publications scientifiques décrivant le modèle et ses résultats
- Piloté par le Programme Mondial de Recherche sur le Climat

GIEC et CMIP

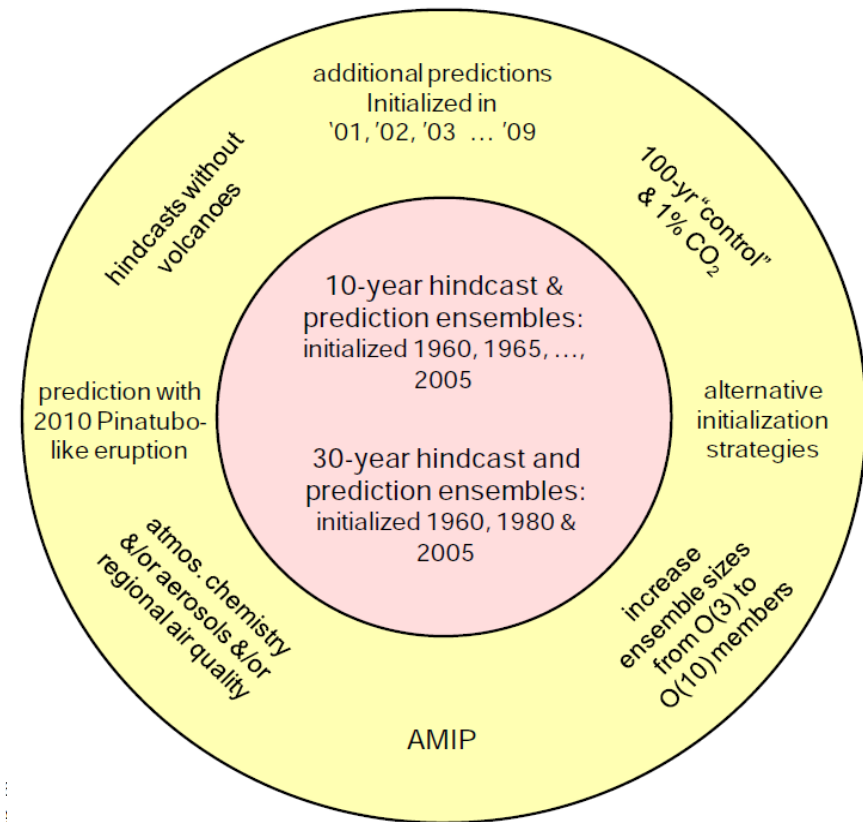


Simulations proposées par CMIP-5

Long terme (centennal)

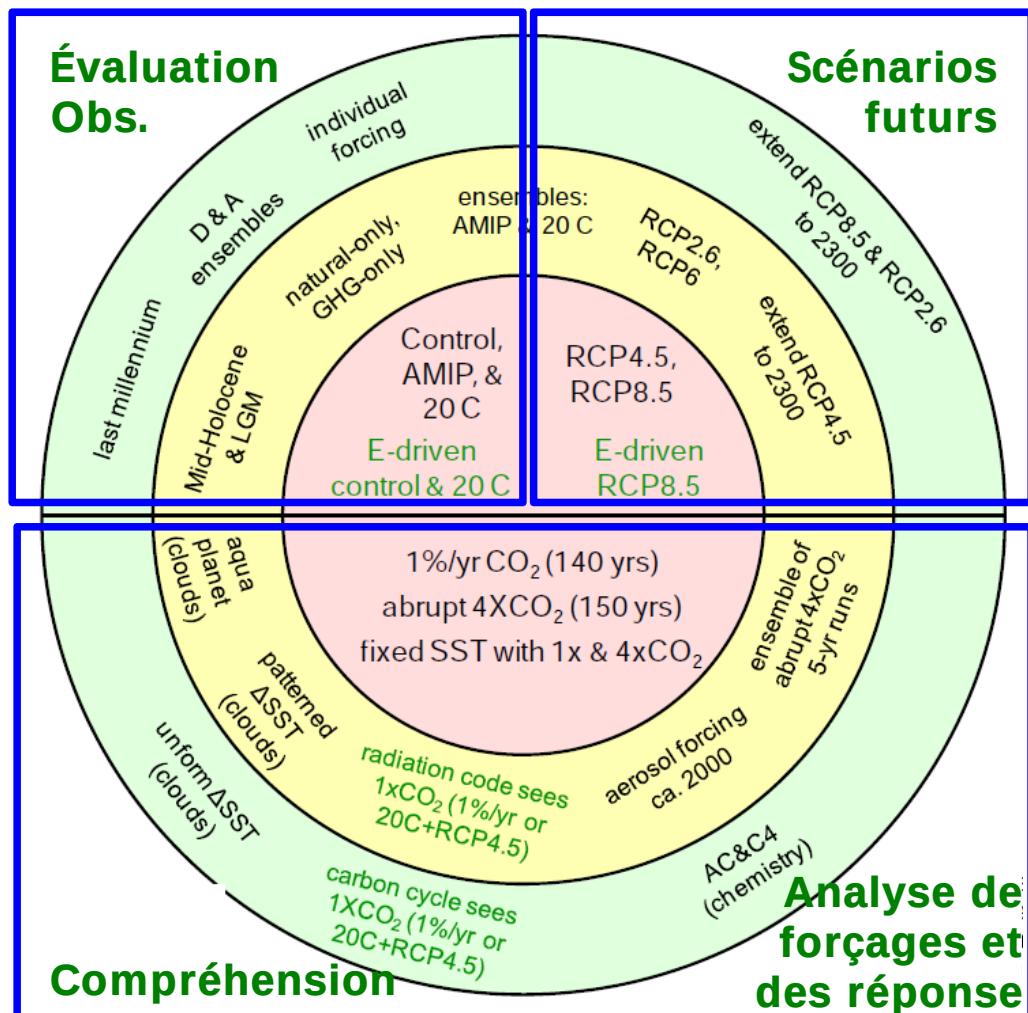


Court terme (décennal)

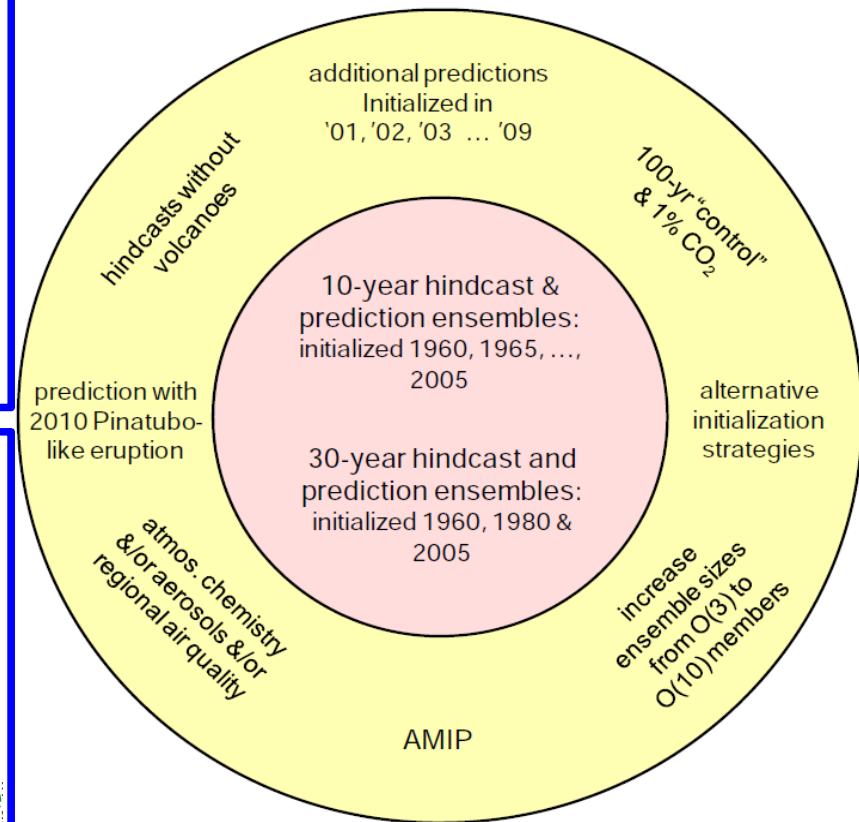


Simulations proposées par CMIP-5

Long terme (centennal)



Court terme (décennal)



[Taylor et al., 2012]

Simulations proposées par CMIP-5

Thématiques
d'intérêt pour
l'IPSL

Climat-carbone

(C4MIP)

Nuages

(CFMIP)

Paléoclimat

(PMIP)

Aérosols

(AEROCOM)

Emissions

(GEIA)

Ozone

(CCMVal)

**Évolution du
climat au 20e
siècle**

**Paléo-
climats**

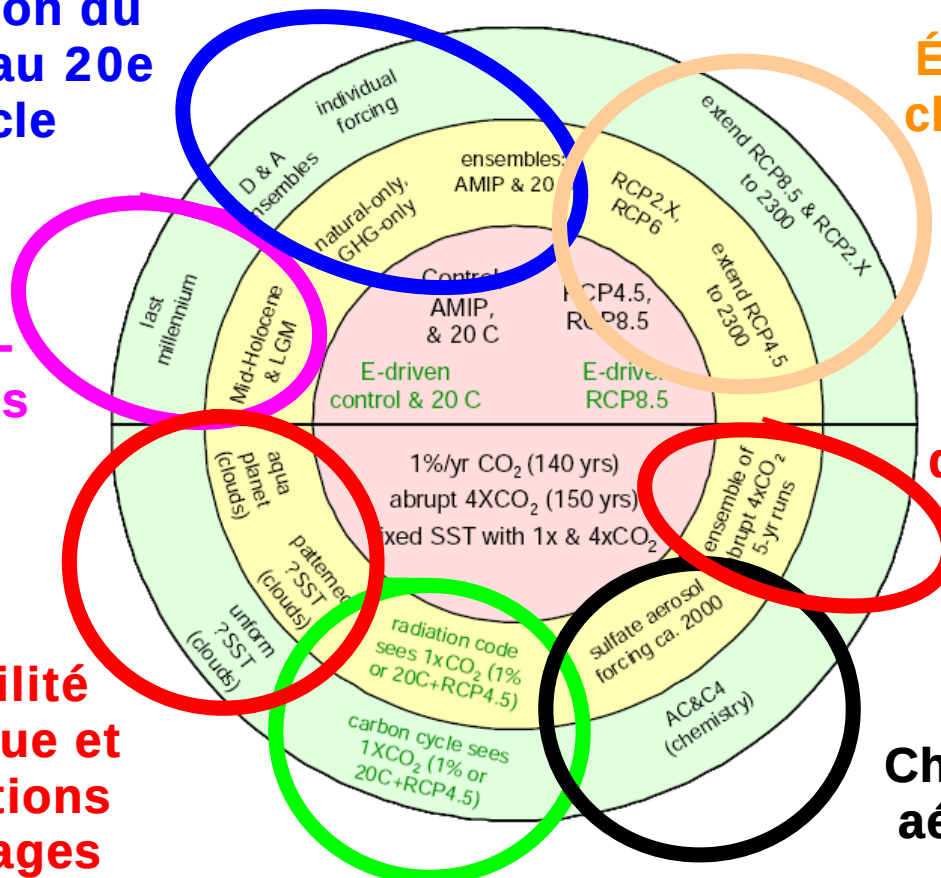
**Sensibilité
climatique et
rétroactions
des nuages**

Couplage climat-carbone

**Évolution du
climat au 21e
siècle**

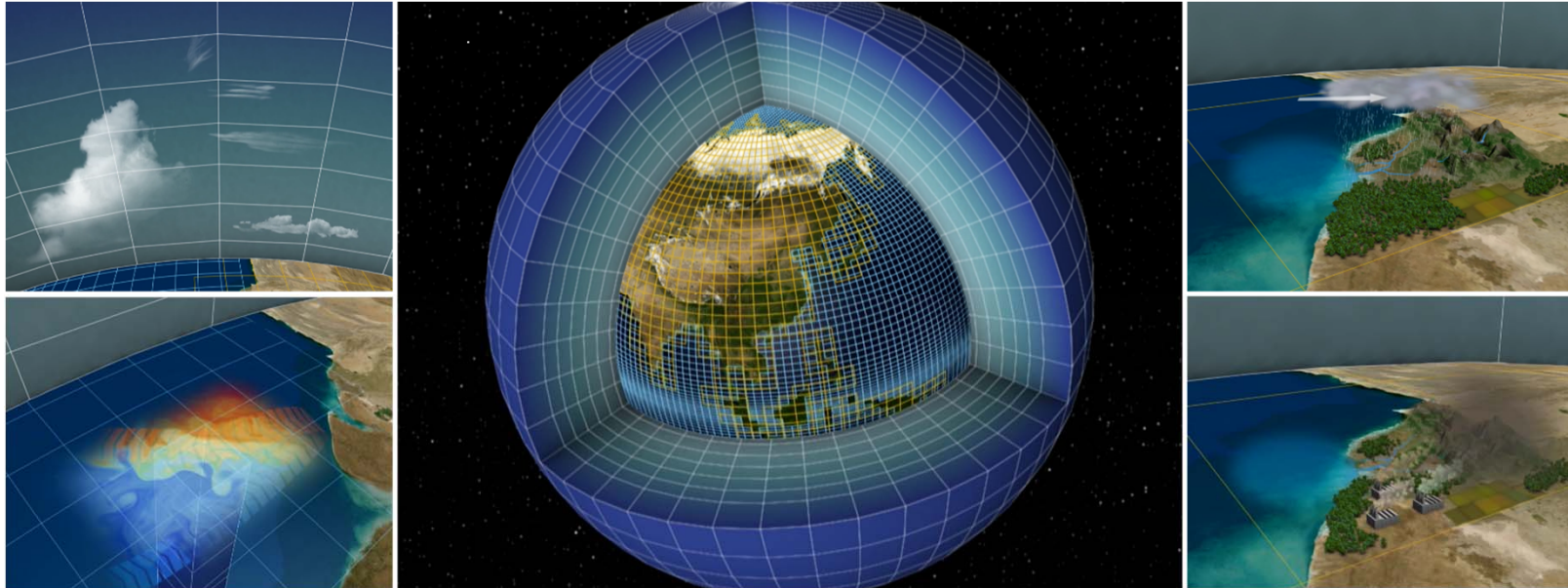
**Estimation
des forçages
radiatifs**

**Chimie et
aérosols**



Modèle de climat

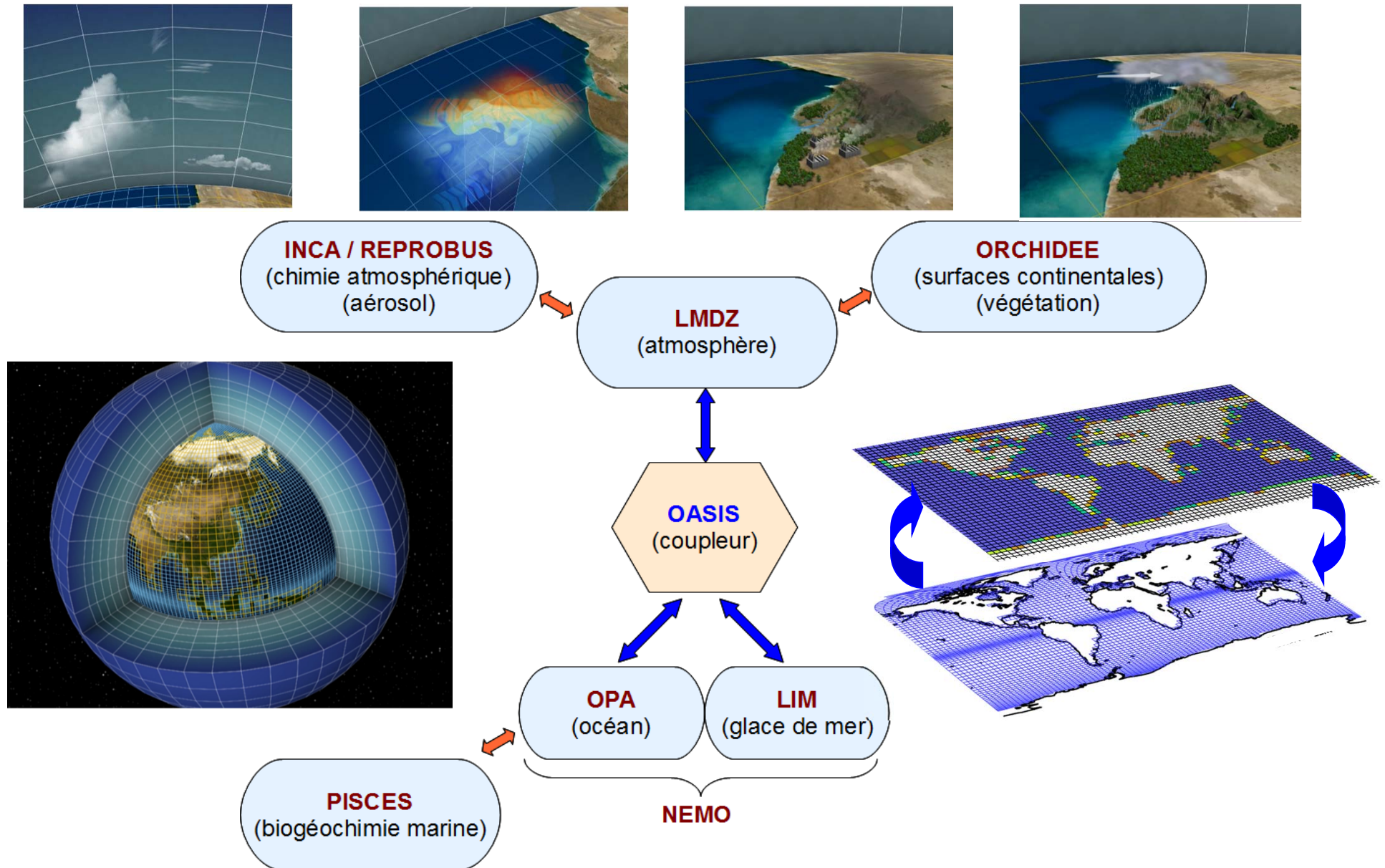
(Modèle de circulation générale)



Images issues d'un film présentant la modélisation du climat. Copyright CEA

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

Le modèle couplé "Système Terre" de l'IPSL



Modèles de l'IPSL pour CMIP5

LMDZ-ORCHIDEE-ORCA-LIM-PISCES-INCA-REPROBUS-OASIS

IPSL-CM5A

Modèle intégré du système
Terre (ESM)

IPSL-CM5B

Idem IPSL-CM5A, avec modèle
atmosphérique LMDZ5B

IPSL-CM5A-LR

Basse résolution
atm: 3.75° x 2° L39
oce: 2° L31

IPSL-CM5A-MR

Moyenne résolution
atm: 2.5° x 1.25° L39
oce: 2° L31

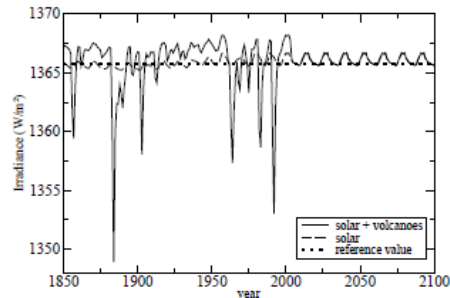
IPSL-CM5B-LR

Basse résolution
atm: 3.75° x 2° L39
oce: 2° L31

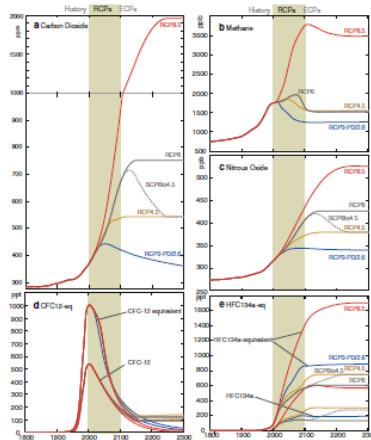
Le modèle couplé "Système Terre" de l'IPSL

Forçages naturels et anthropiques

Soleil et volcans

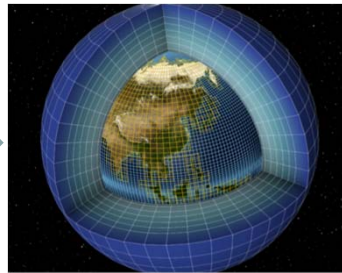


Gaz à effet de serre ou chimiquement actifs

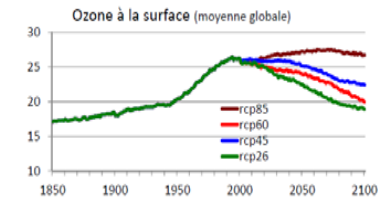


Concentration de CO₂

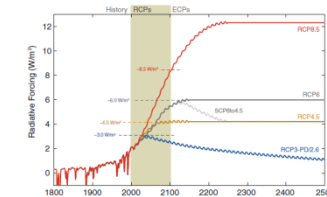
IPSL-CM5A-LR



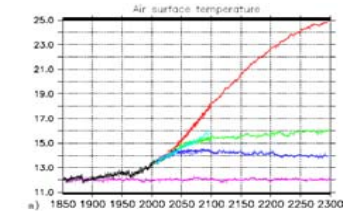
Composition de l'atmosphère



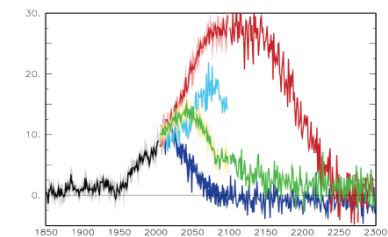
Forçage radiatif



Changement climatique



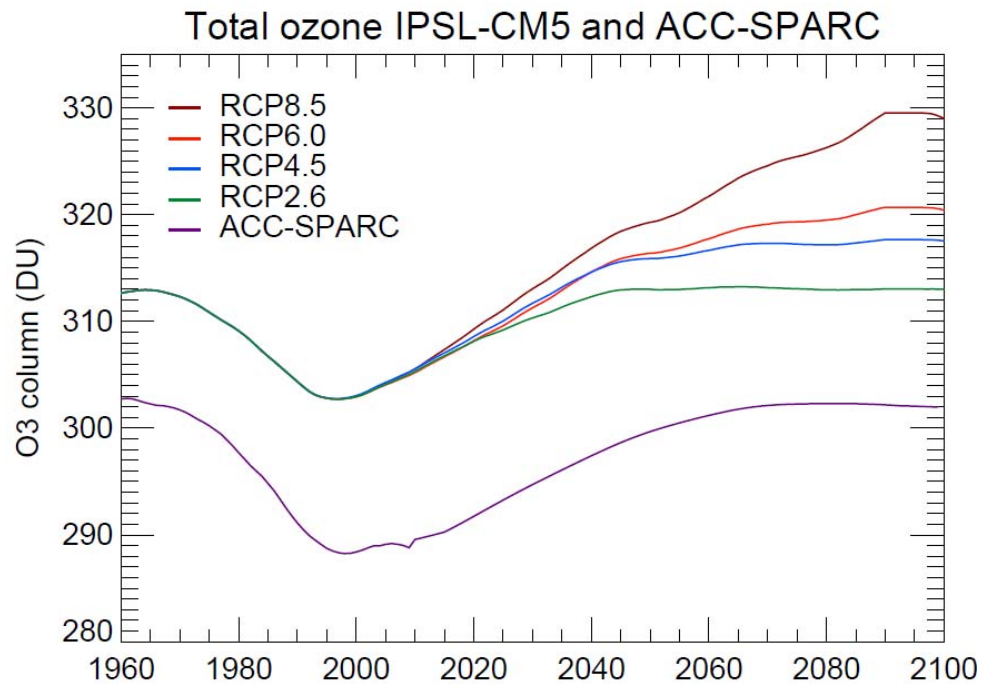
Émission autorisée de CO₂



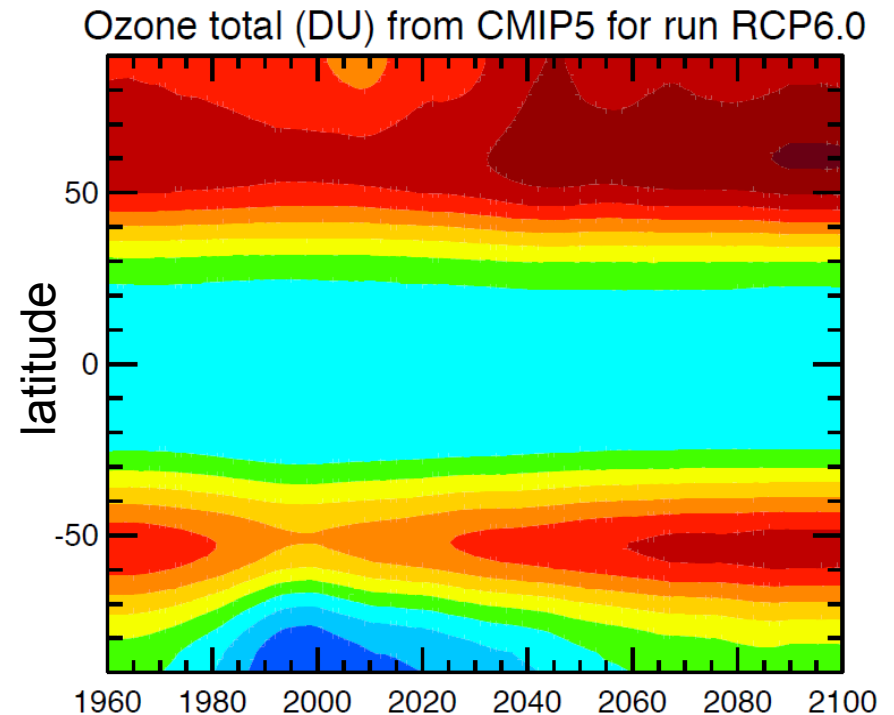
Calcul des champs d'ozone et d'aérosols

- Calcul des concentrations en fonction des émissions des composés réactifs et des changements climatiques
- Projet international dédié: ACCMIP

Moyenne globale de l'ozone



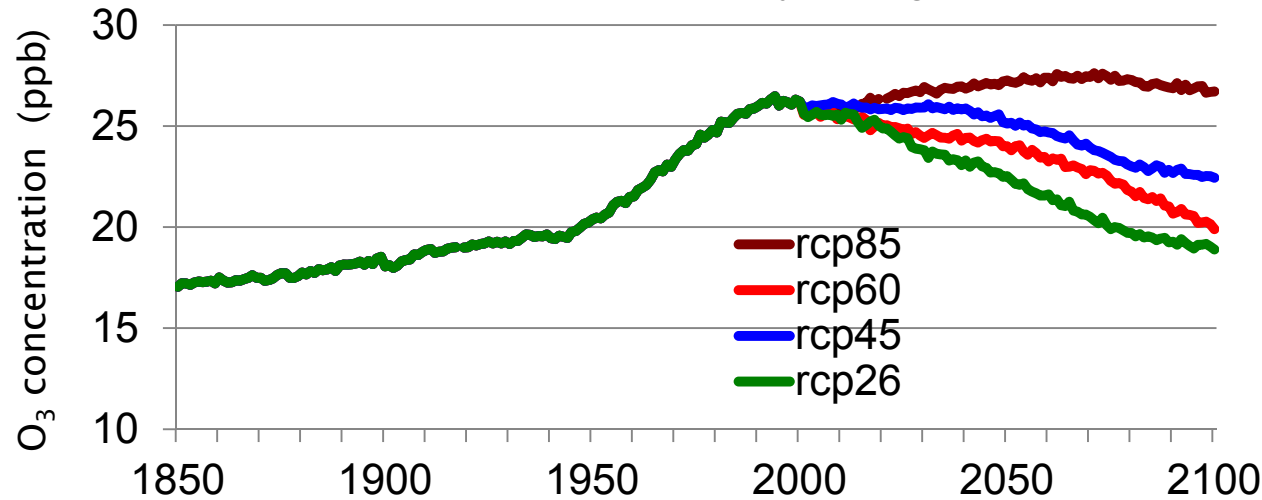
Moyenne zonale de l'ozone



[Bekki et al. 2013]

Ozone troposphérique

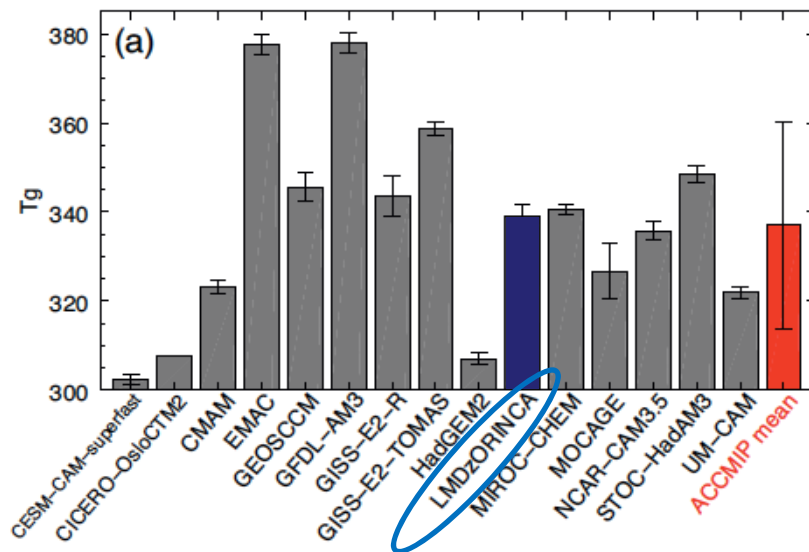
Ozone à la surface (moyenne globale)



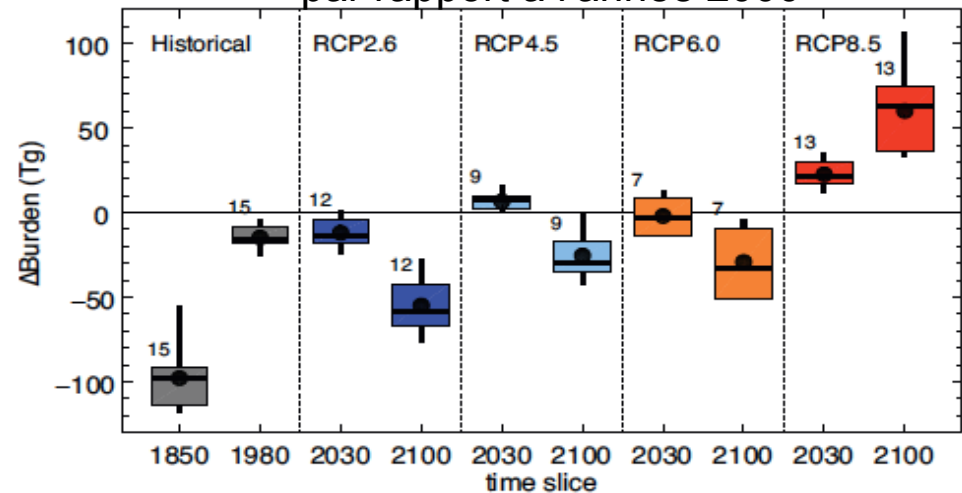
IPSL
LMDZ-INCA

[Szopa et al., 2013]

Quantité d'ozone tropo, année 2000



Changement de la quantité d'ozone
par rapport à l'année 2000



[Young et al. 2013]

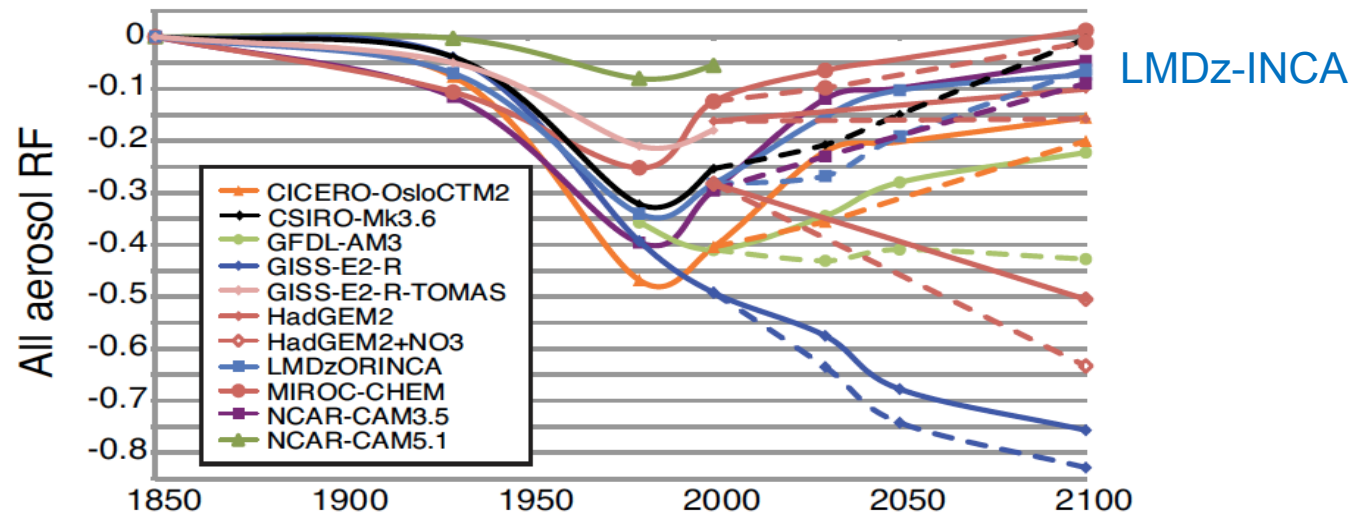
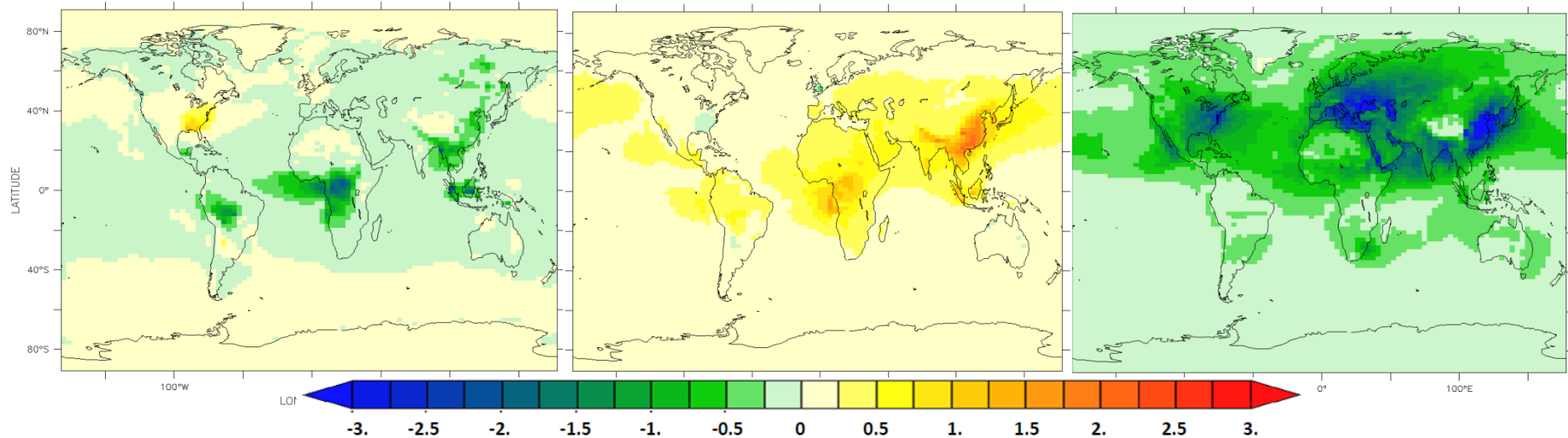
Aérosols

Forçage Radiatif ($W.m^{-2}$)

Matière organique

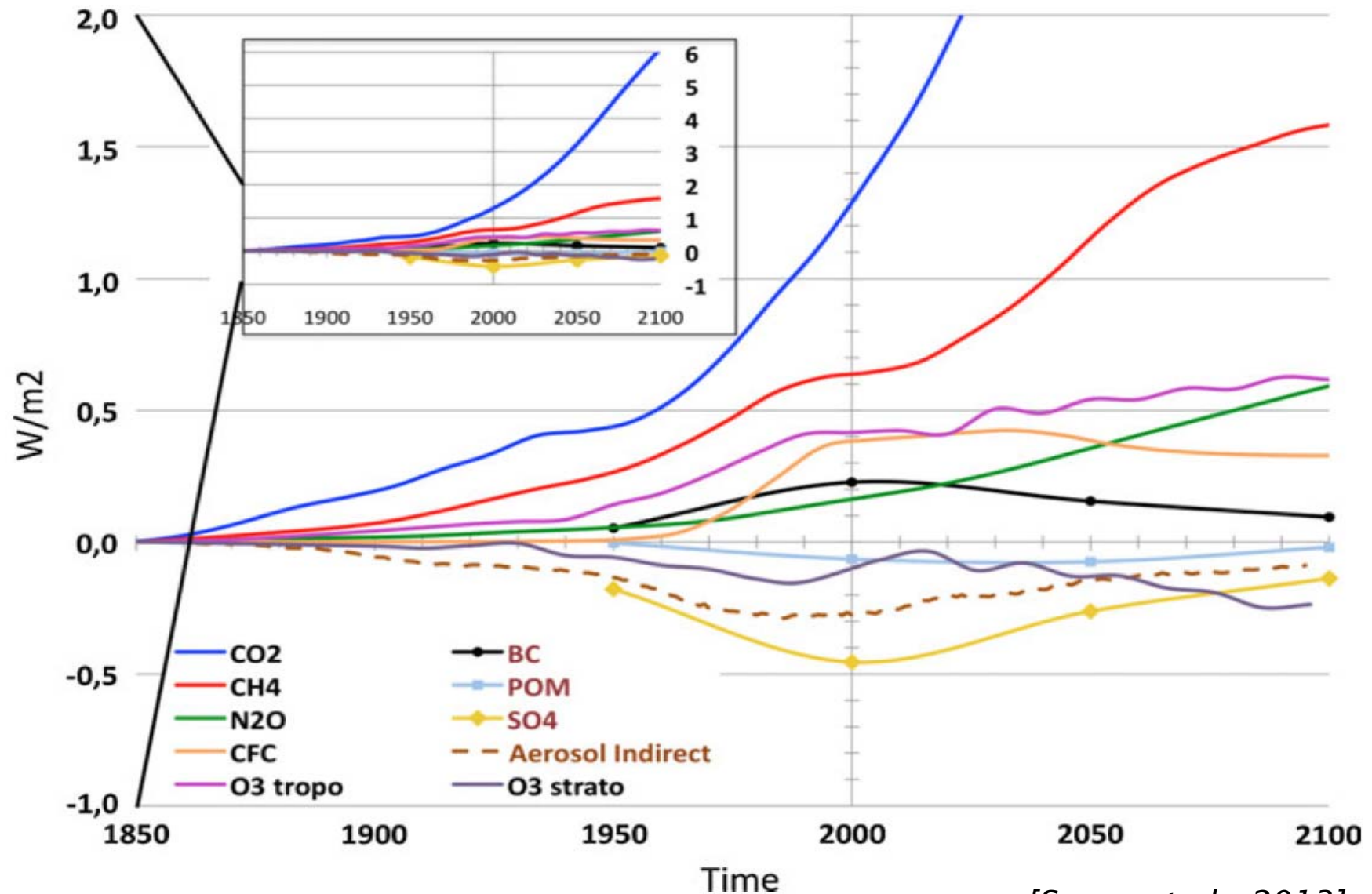
Carbone suie

Sulfates



Shindell et al., 2012

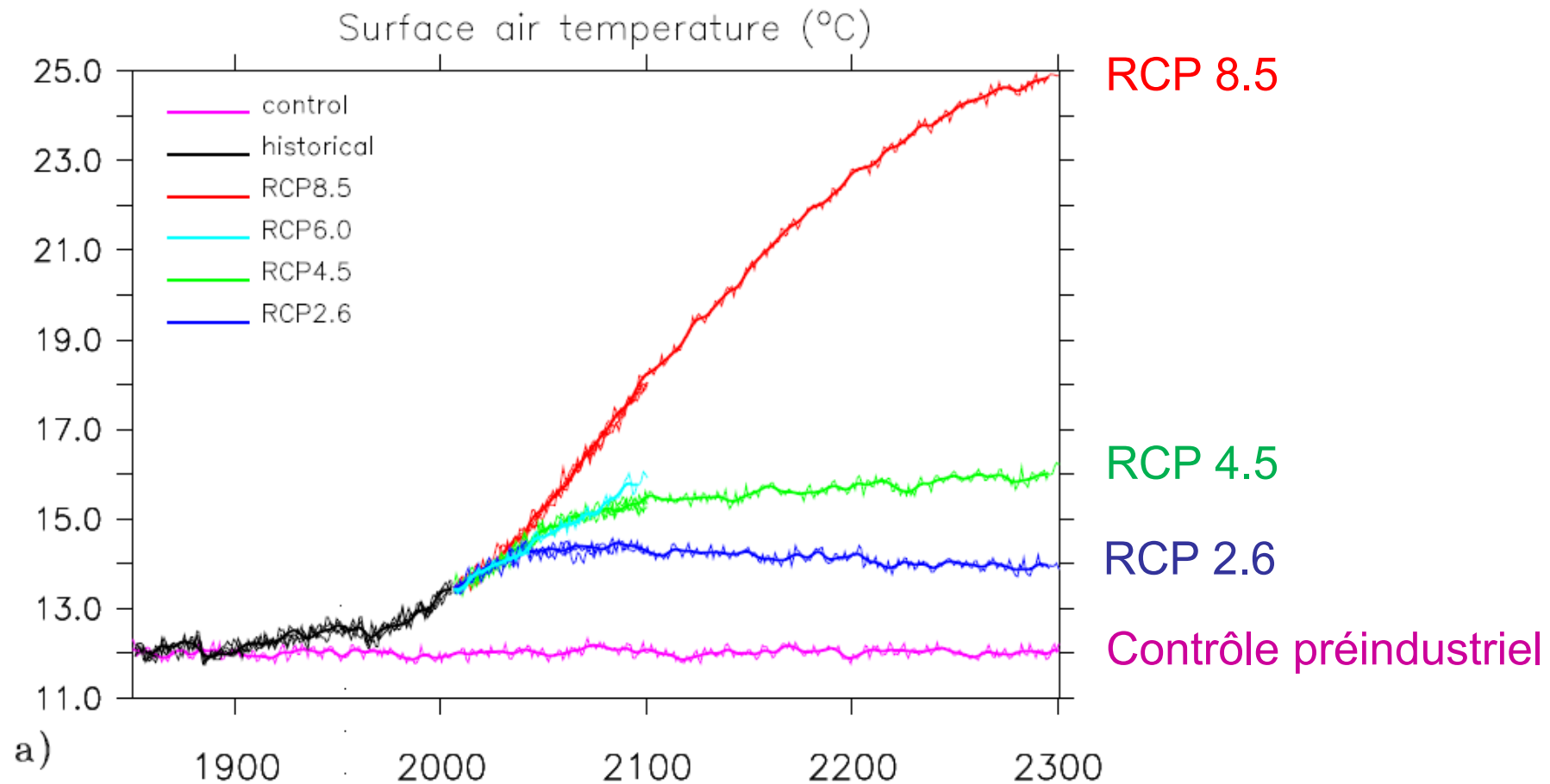
Évolution des forçages radiatifs sur la période historique et future avec le scénario RCP8.5 (modèle IPSL-CM5A-LR)



[Szopa et al., 2013]

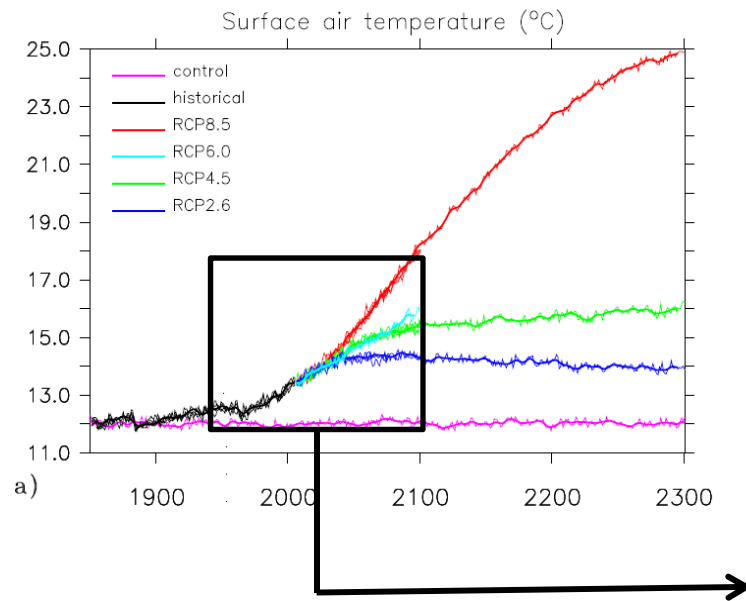
Moyenne globale de la température de surface

De 1850 à 2300
modèle IPSL-CM5A-LR

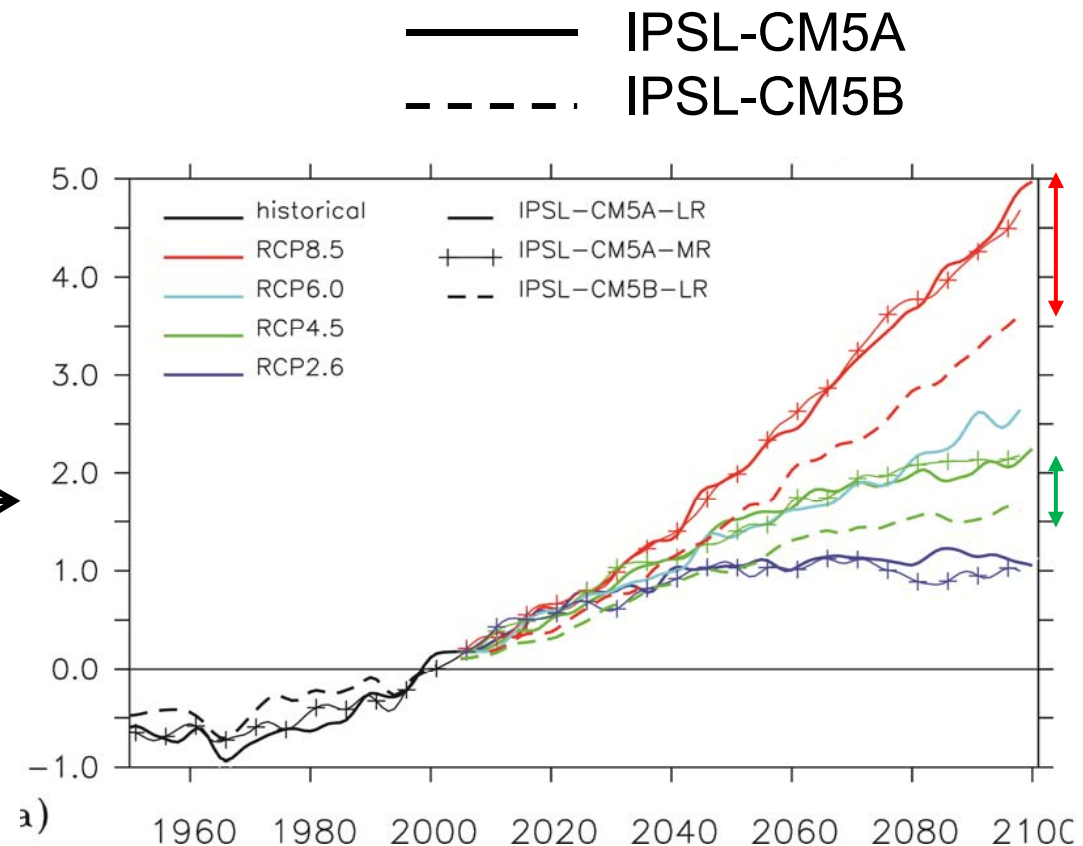


Moyenne globale de la température de surface

De 1850 à 2300
modèle IPSL-CM5A-LR

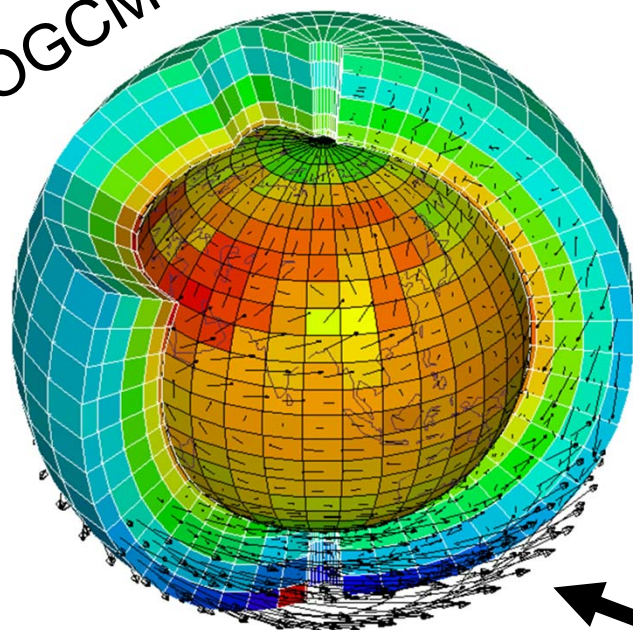


De 1950 à 2100
Anomalie de température par rapport à la
période 1985-2015

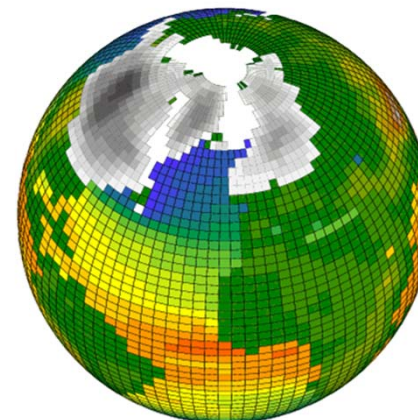


Simulation du climat du Dernier Maximum Glaciaire

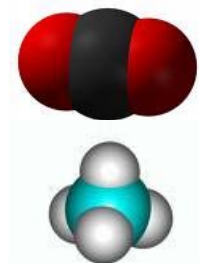
AOGCM



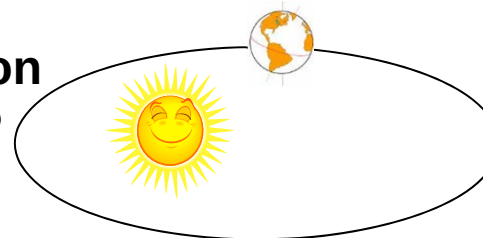
Calottes
glaciaires



Composition
atmosphérique
CO₂: 185 ppm
CH₄: 350 ppb...



Insolation
21ky BP



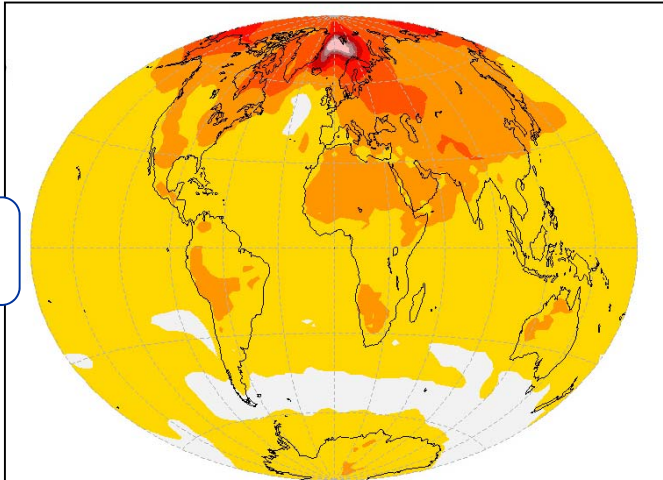
Forçage en gaz à effet de serre ~ climat futur
Autre forçage majeur: calottes glaciaire

Changement de température de surface

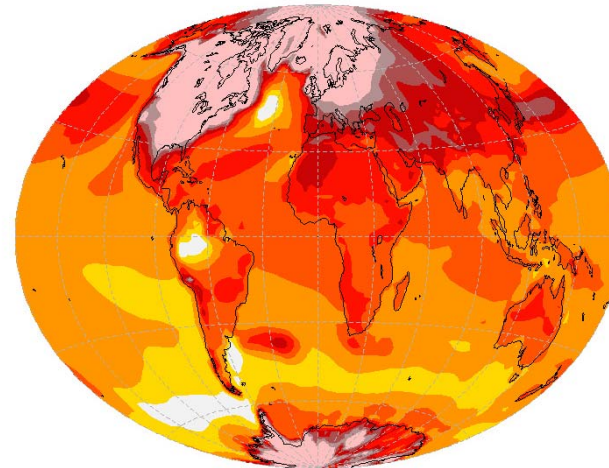
Différence entre 2100 et 1990

IPSL-CM5A-LR

RCP2.6

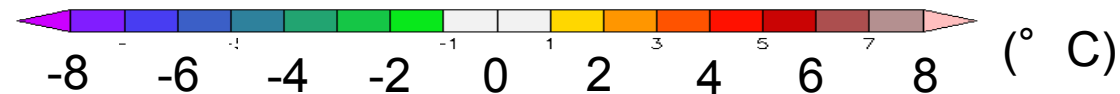
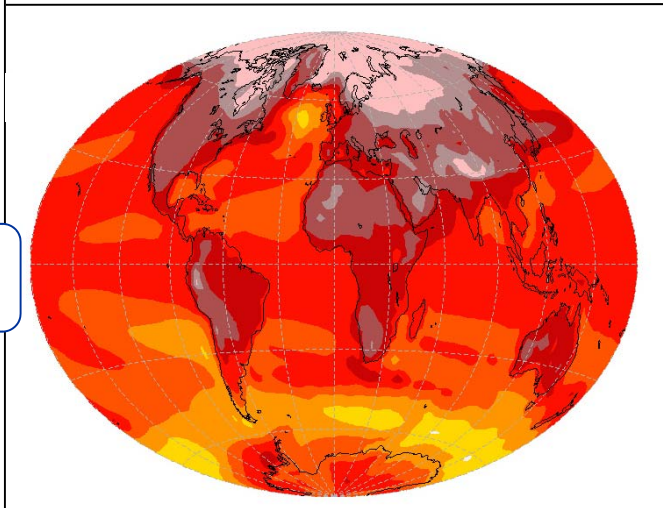


Entre préindustriel et glaciaire



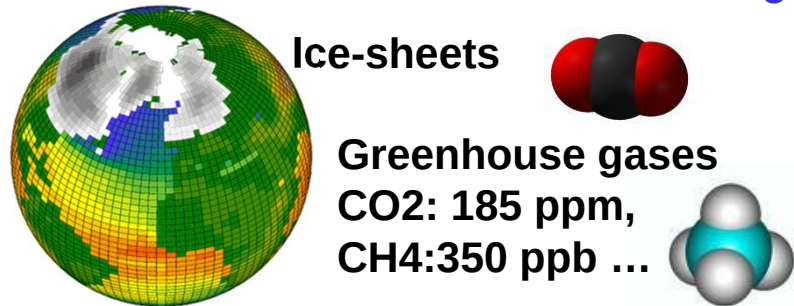
Glaciaire

RCP8.5



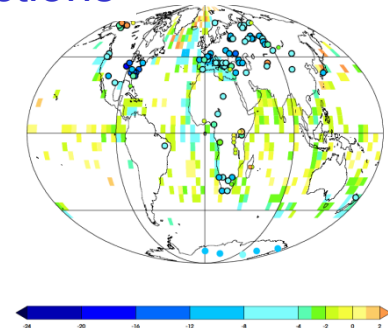
Land-sea contrasts and polar amplification in past and future climates

Last Glacial Maximum main forcings



LGM climate reconstructions

Land data
(pollen and plant macrofossils):
Bartlein et al, Clim Dynam 2011
Ocean data (multi proxy):
MARGO, NGS 2009
Ice-core data:
Masson-Delmotte et al pers. comm

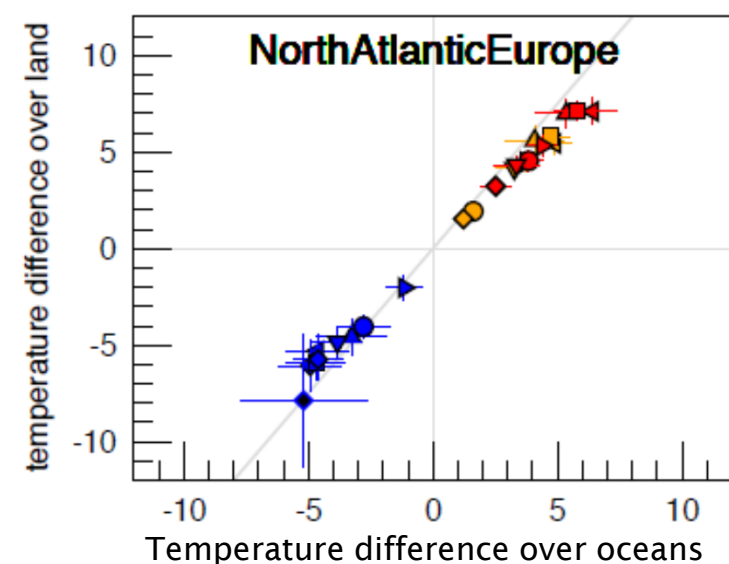
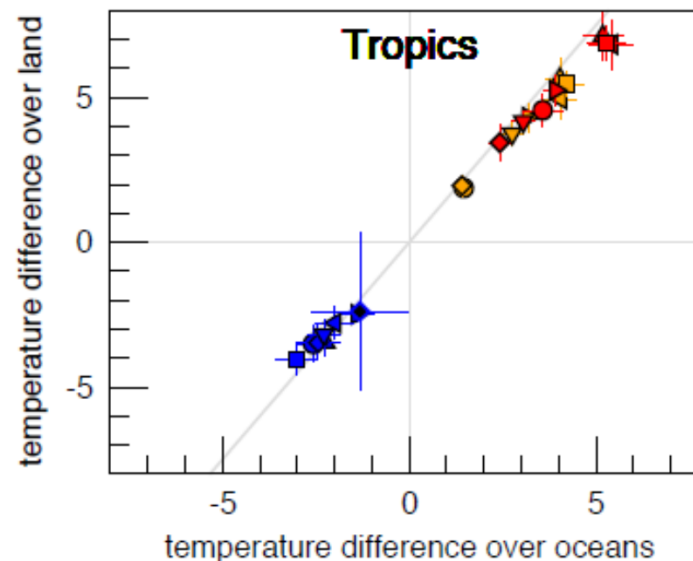


Relationships between LGM vs higher CO₂ climates?

Are the large scale relationships stable? Can we evaluate them from paleodata ?

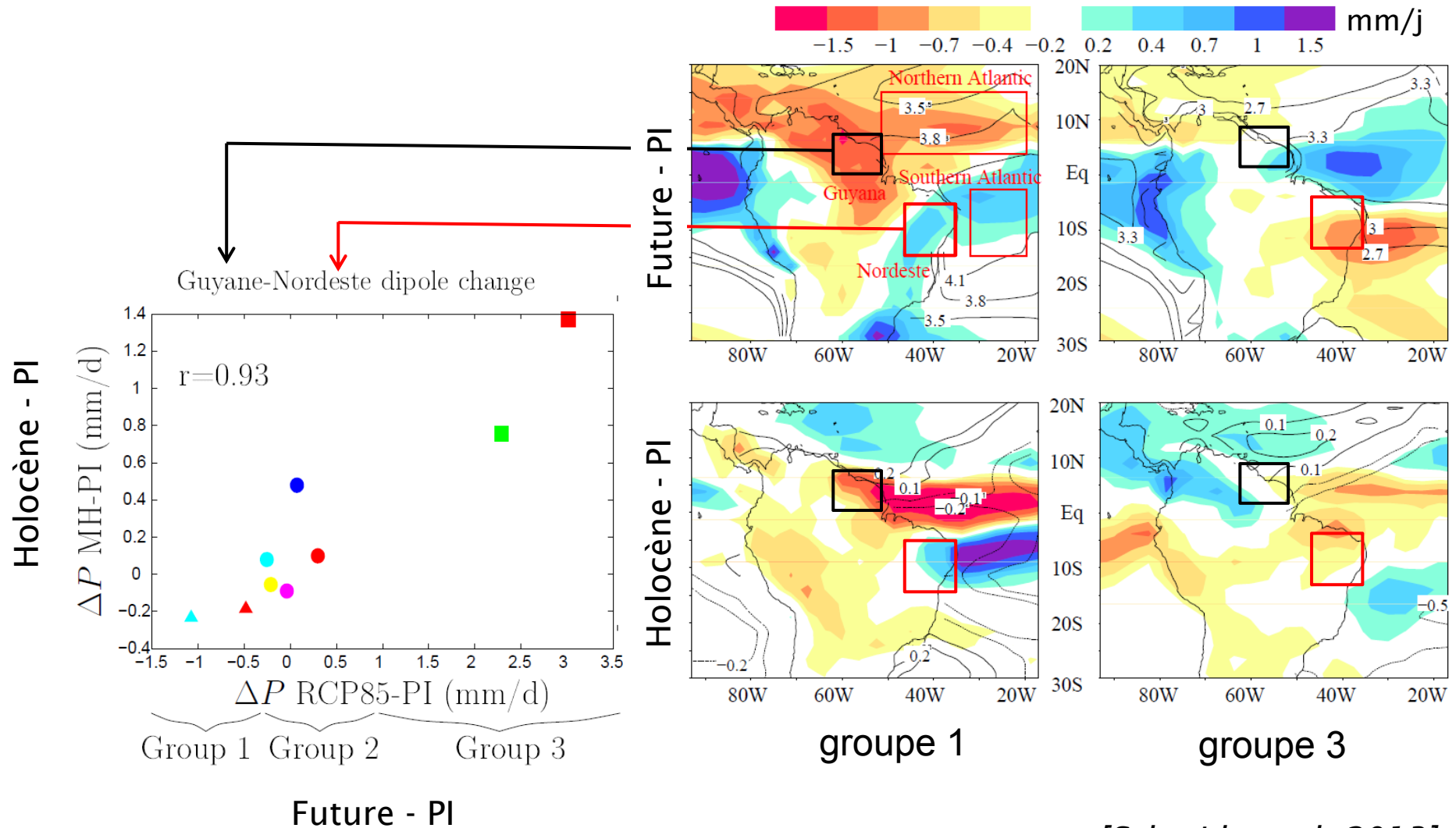
Example: Land sea contrasts

Note: all model averages calculated from grid points where LGM data is available



Changement de précipitations

Holocène moyen - préindustriel - future (RCP8.5)

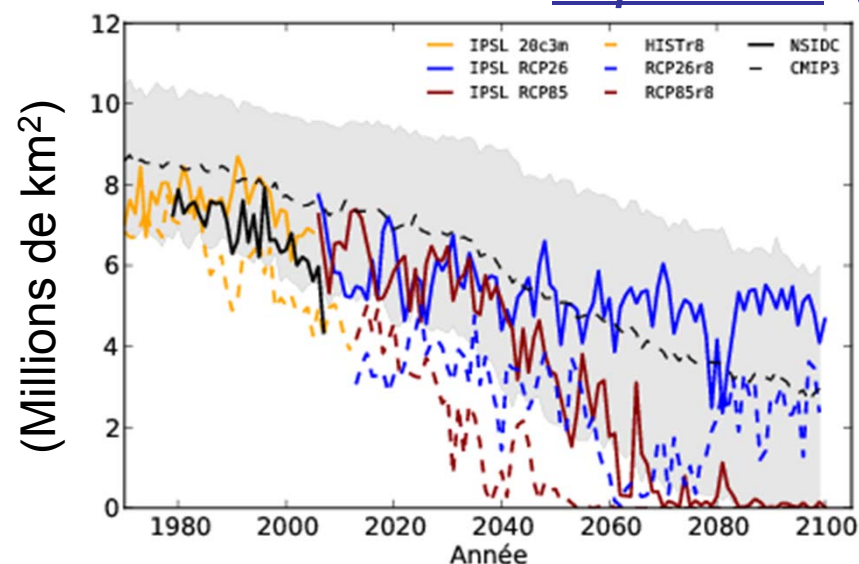


[Schmidt et al, 2013]

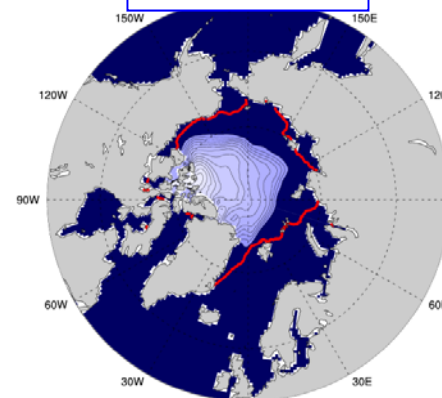
Glace de mer Arctique 1970-2100

Septembre (*extension minimale*)

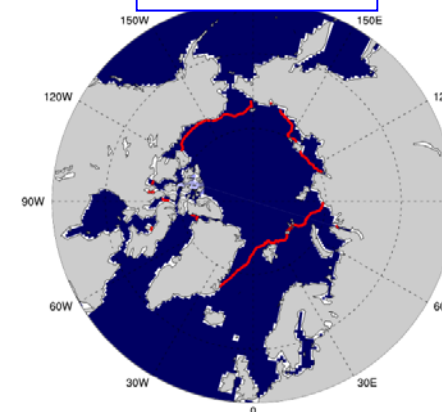
IPSL-CM5A-LR



RCP 2.6

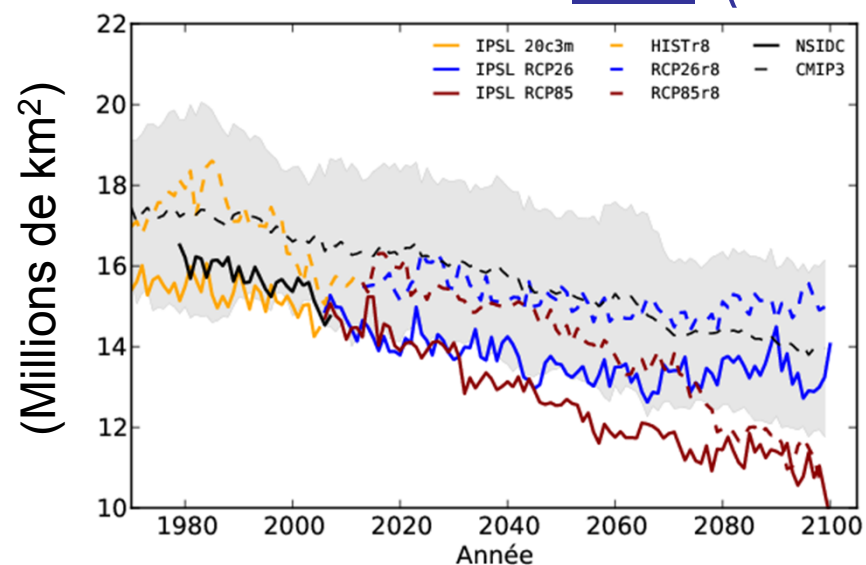


RCP 8.5

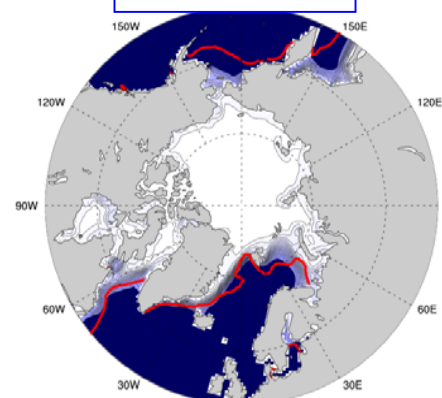


Mars (*extension maximale*)

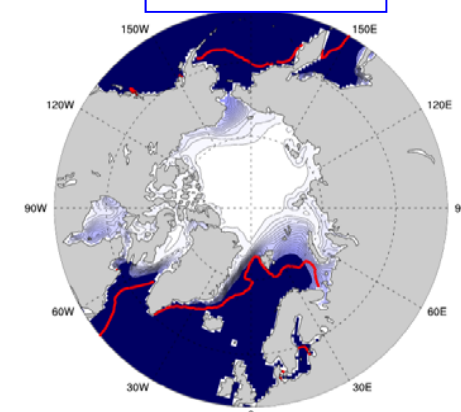
IPSL-CM5A-LR



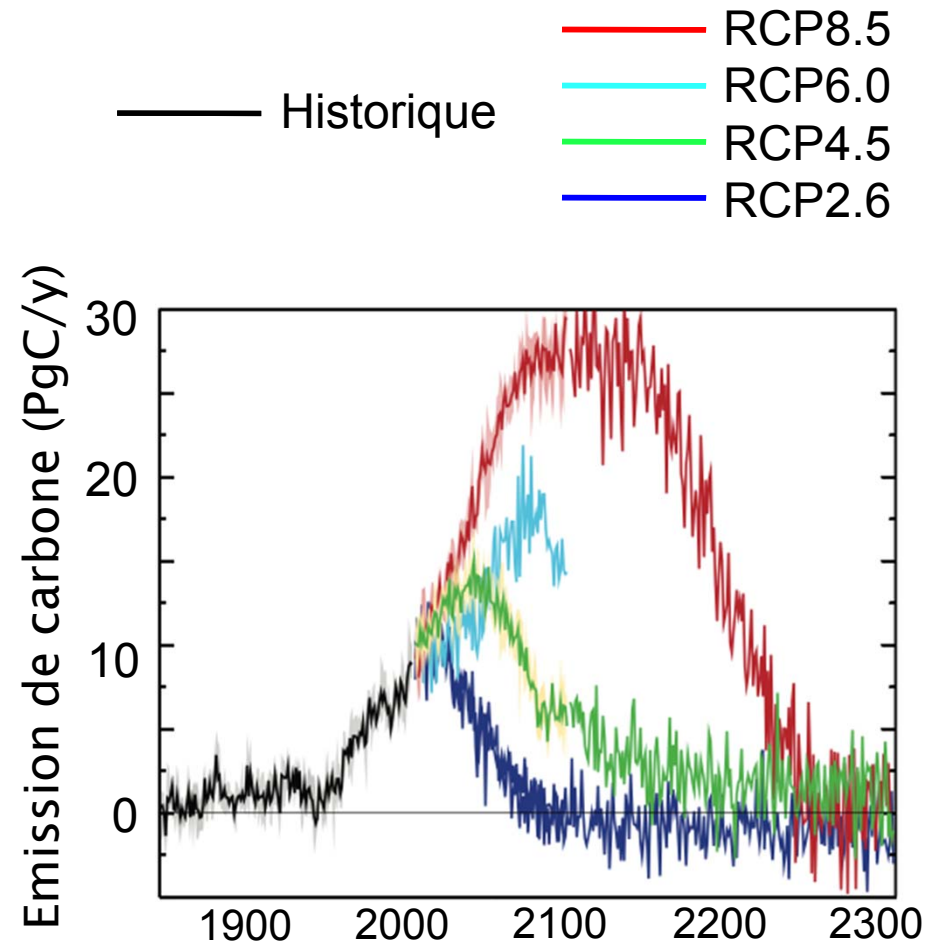
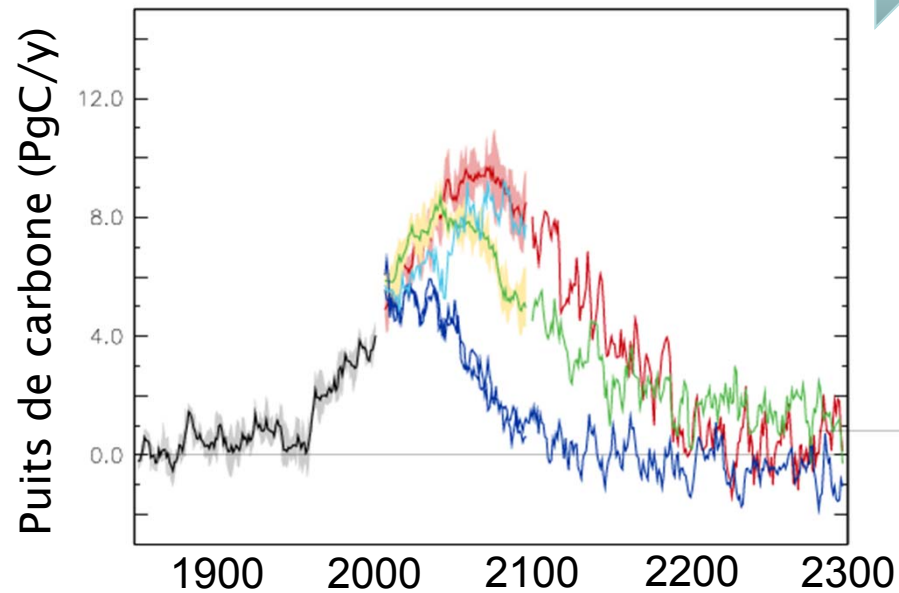
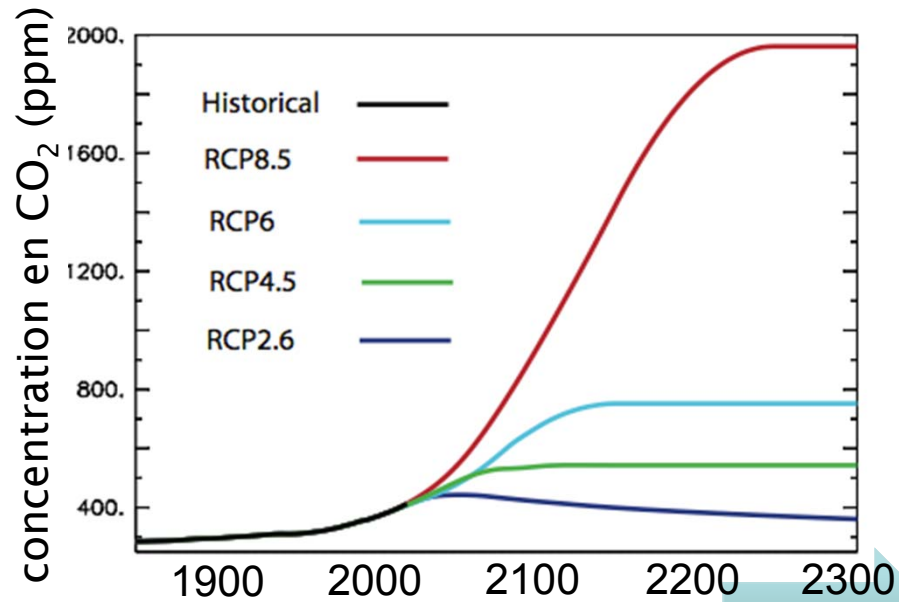
RCP 2.6



RCP 8.5

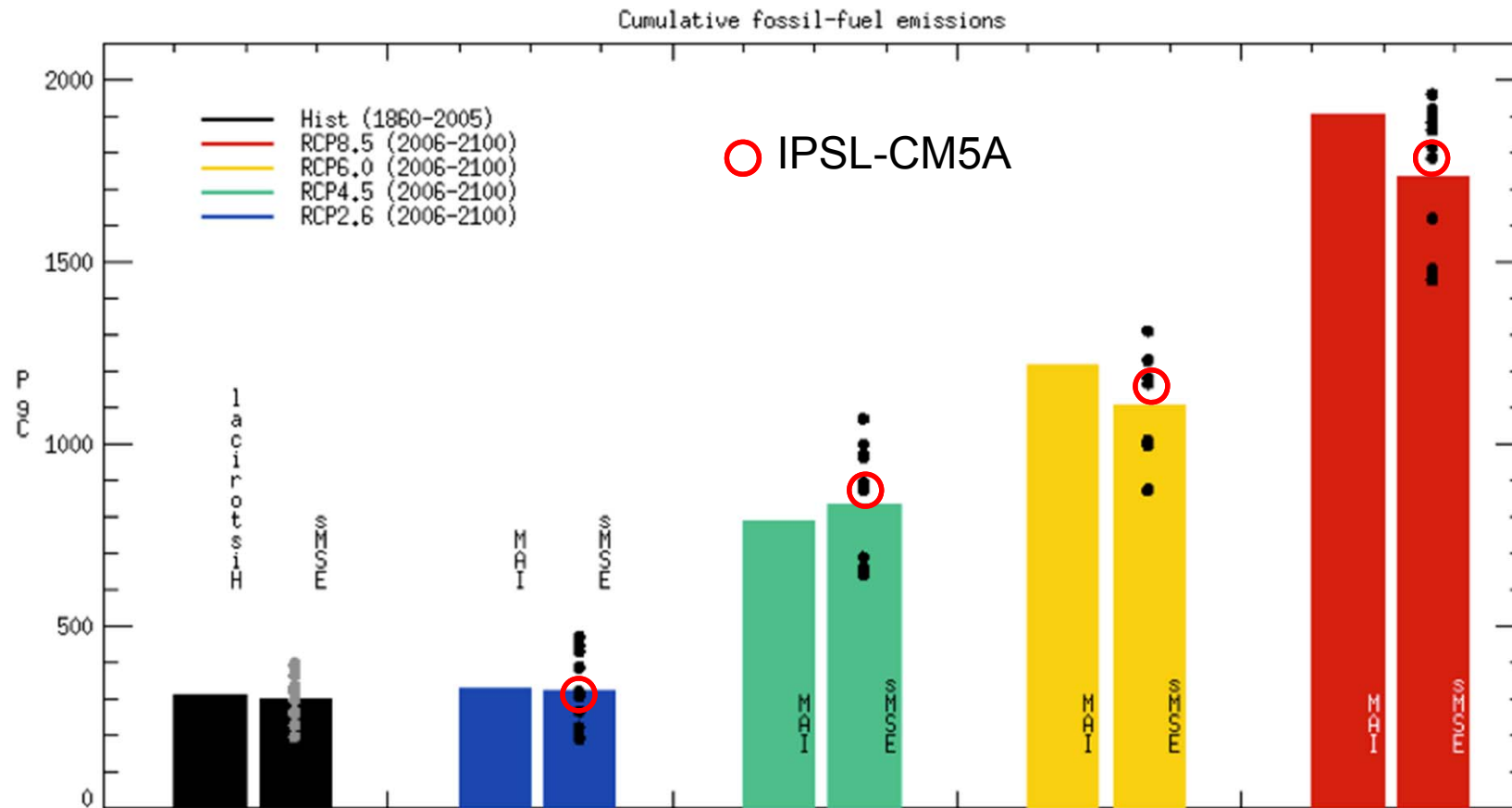


Les émissions autorisées de CO₂ avec IPSL-CM5



Les Emissions autorisées : Multi-modèle

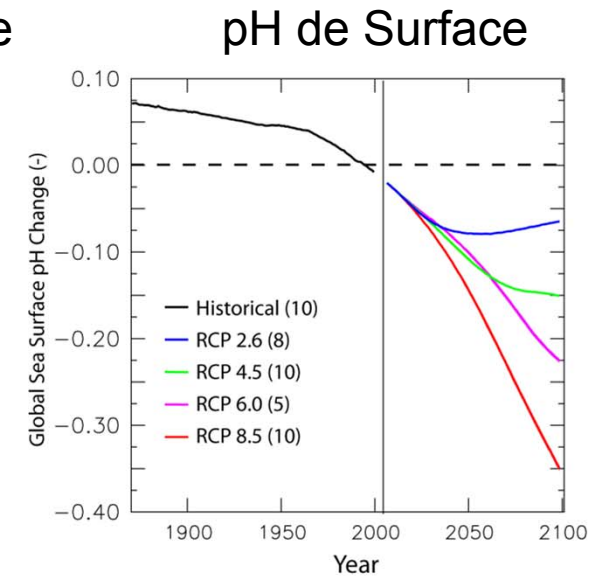
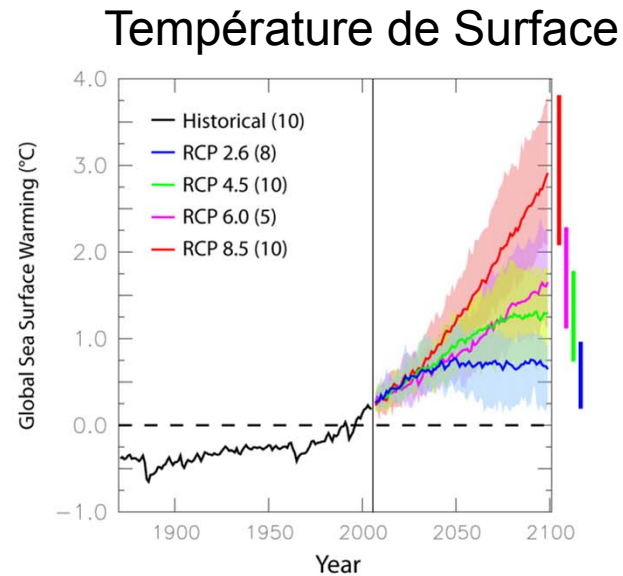
Calcul des émissions autorisées pour les 4 scénarios et 9 modèles système-Terre



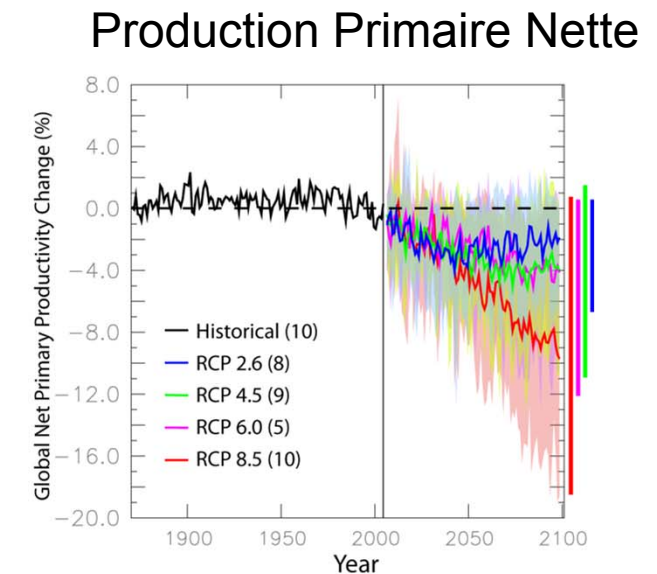
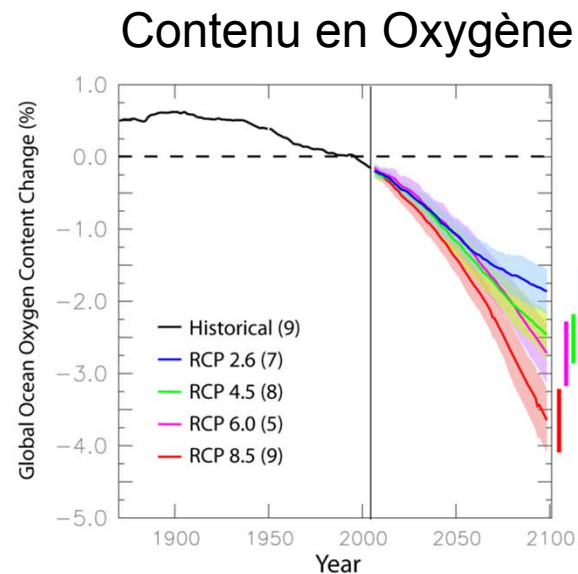
Jones et al. in press

Impacts du changement climatique sur les écosystèmes marins : Multi-modèle

Des eaux de surface plus chaudes...
et plus acides



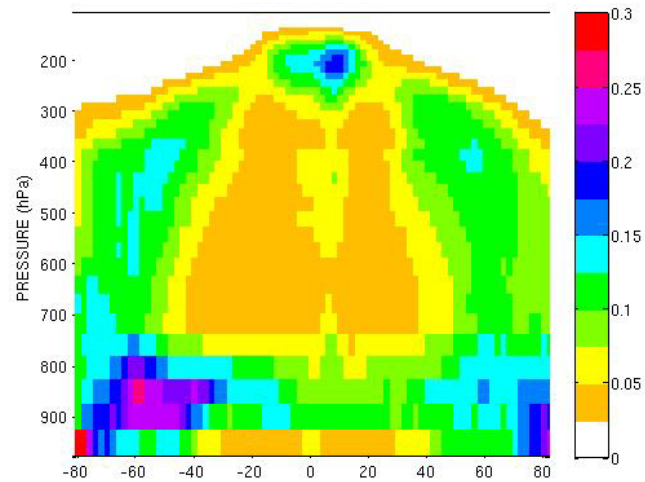
Moins d'oxygène et
moins de production
primaire



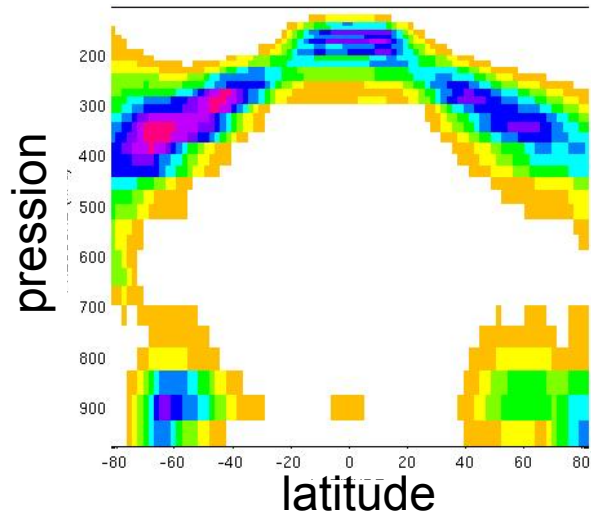
Évaluation de la structure verticale des nuages

CALIPSO – simulateur COSP – projet CFMIP

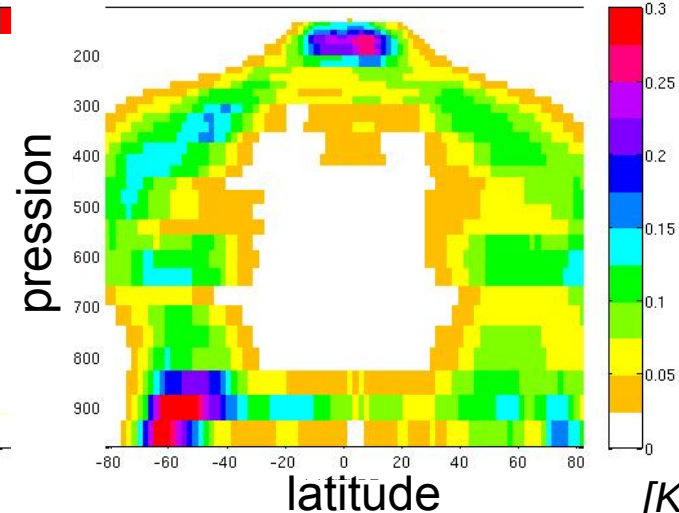
Fraction nuageuse observée (Calipso/GOCCP)



IPSL-CM5A + COSP



IPSL-CM5B + COSP



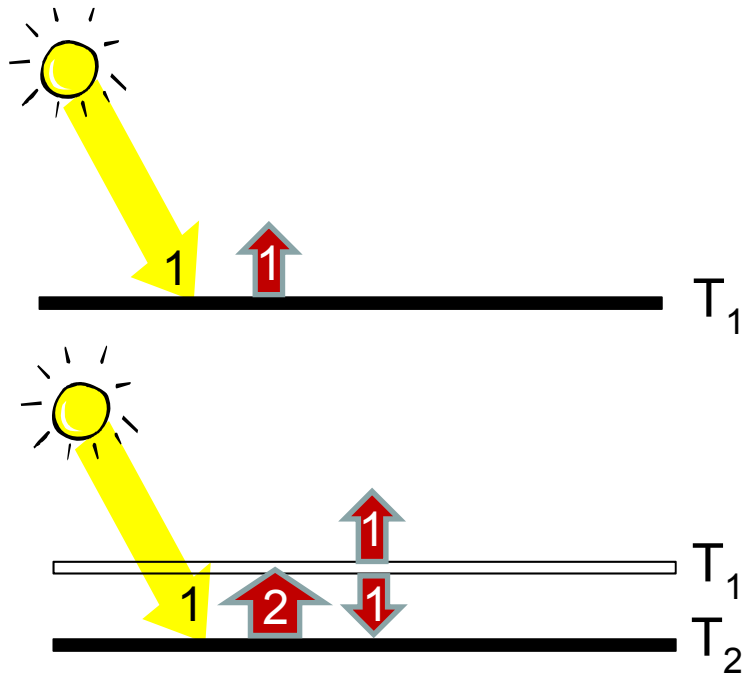
[Konsta et al., smi]

Plan

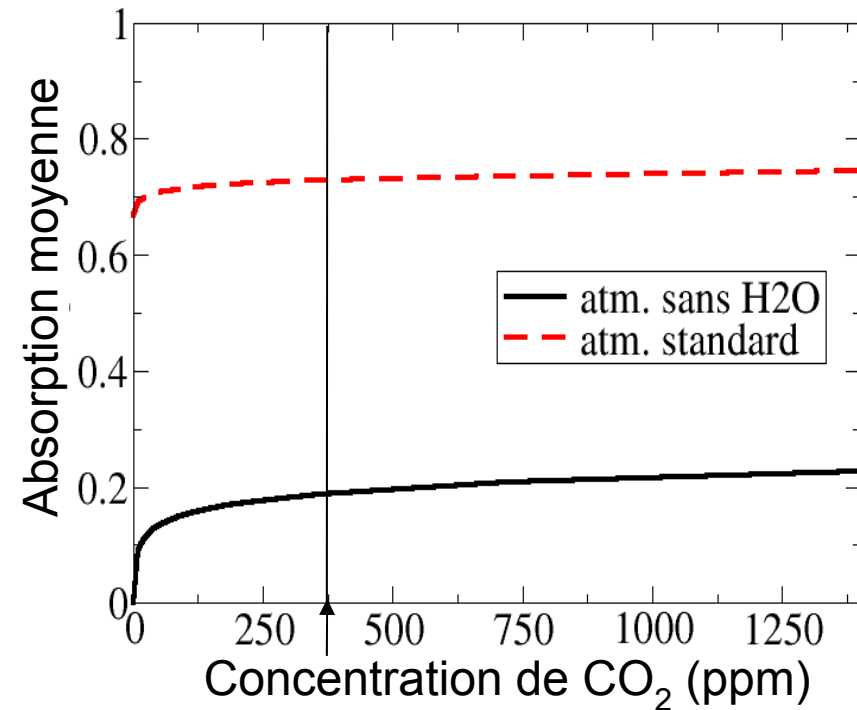
- I. Réalisation des simulations CMIP5
- II. Robustesses et incertitudes de quelques aspects des changements climatiques
 - Accroissement de température
 - Changements de précipitation
 - Émission de CO₂
- III. Réalisation pratique et premiers bilans

Accroissement de CO₂ et effet de serre

L'analogie de l'effet de serre



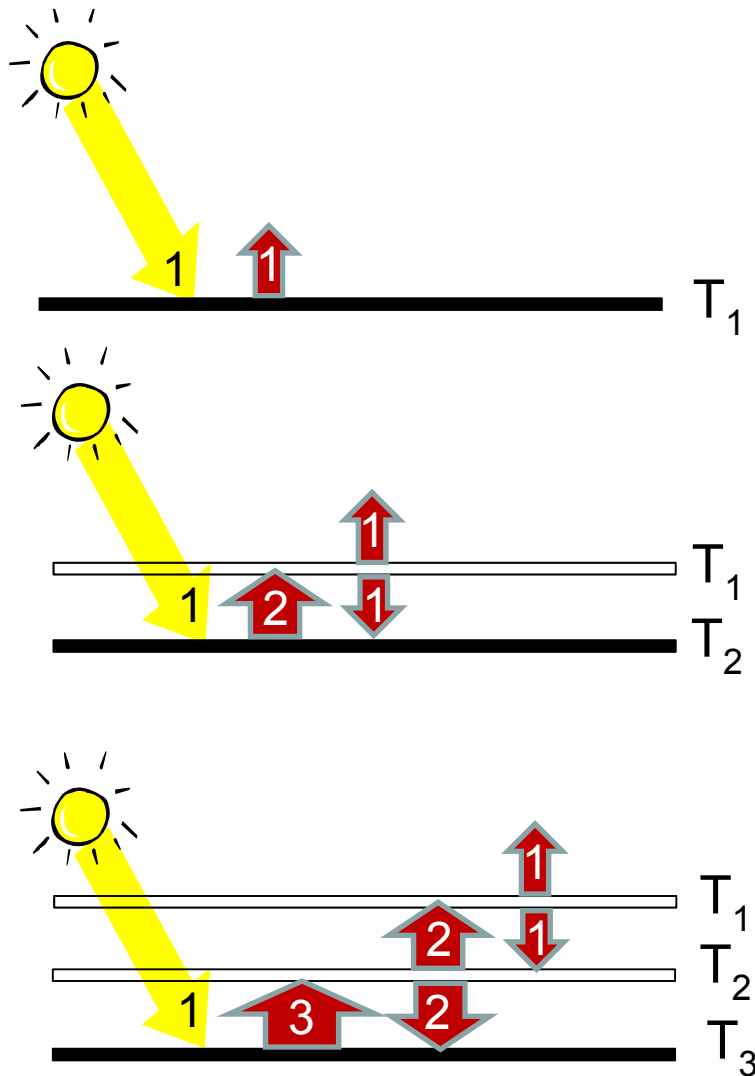
Absorption de l'atmosphère en fonction du CO₂, pour différentes valeurs de H₂O



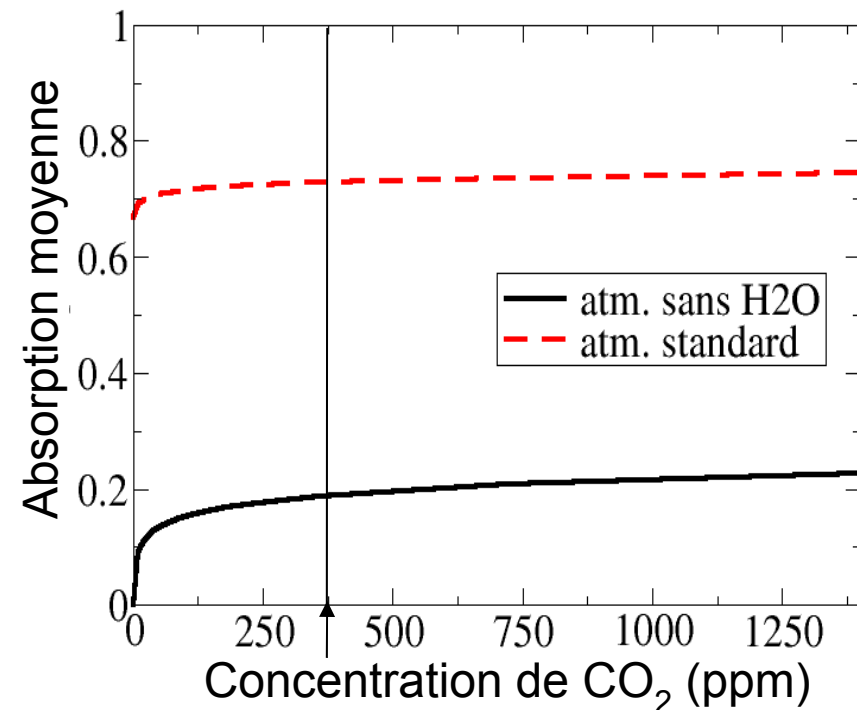
A-t-on atteint l'effet de serre maximum pour le CO₂?

Accroissement de CO_2 et effet de serre

L'analogie de l'effet de serre



Absorption de l'atmosphère en fonction du CO_2 , pour différentes valeurs de H_2O

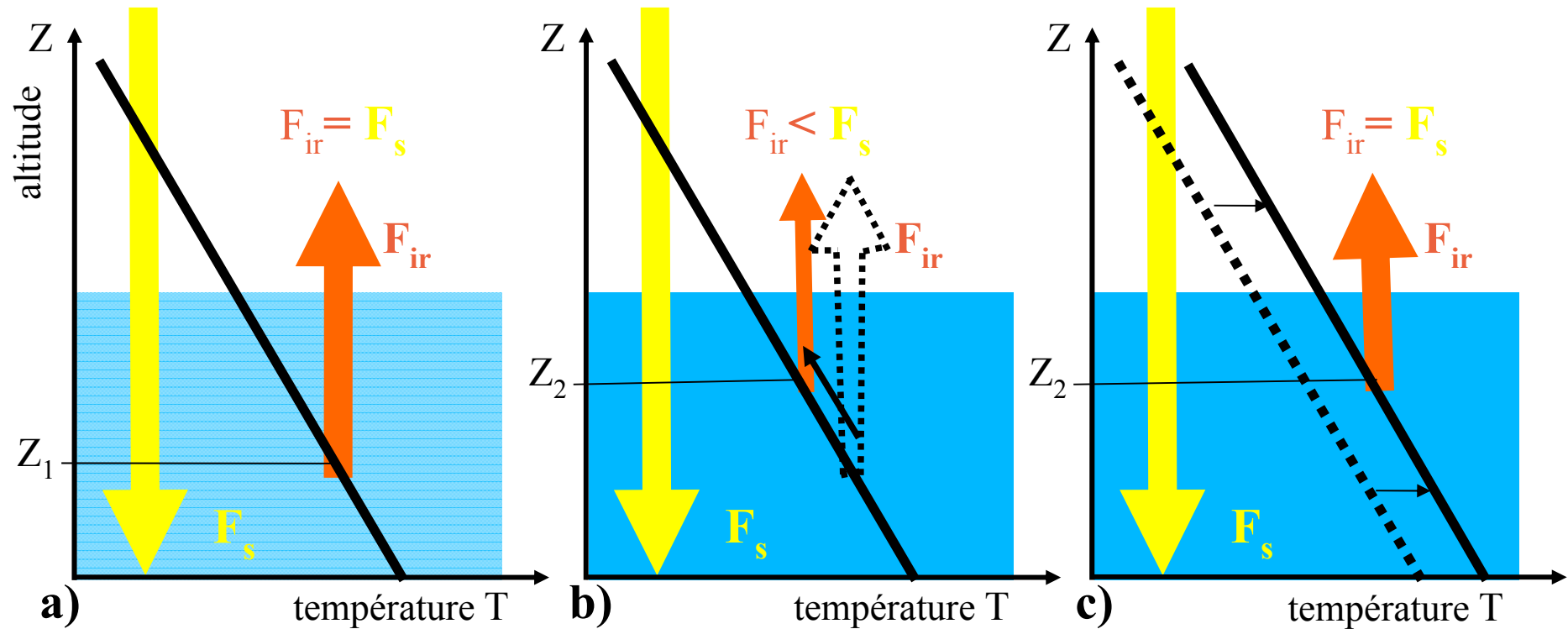


A-t-on atteint l'effet de serre maximum pour le CO_2 ?
NON!

Accroissement de CO₂ et effet de serre

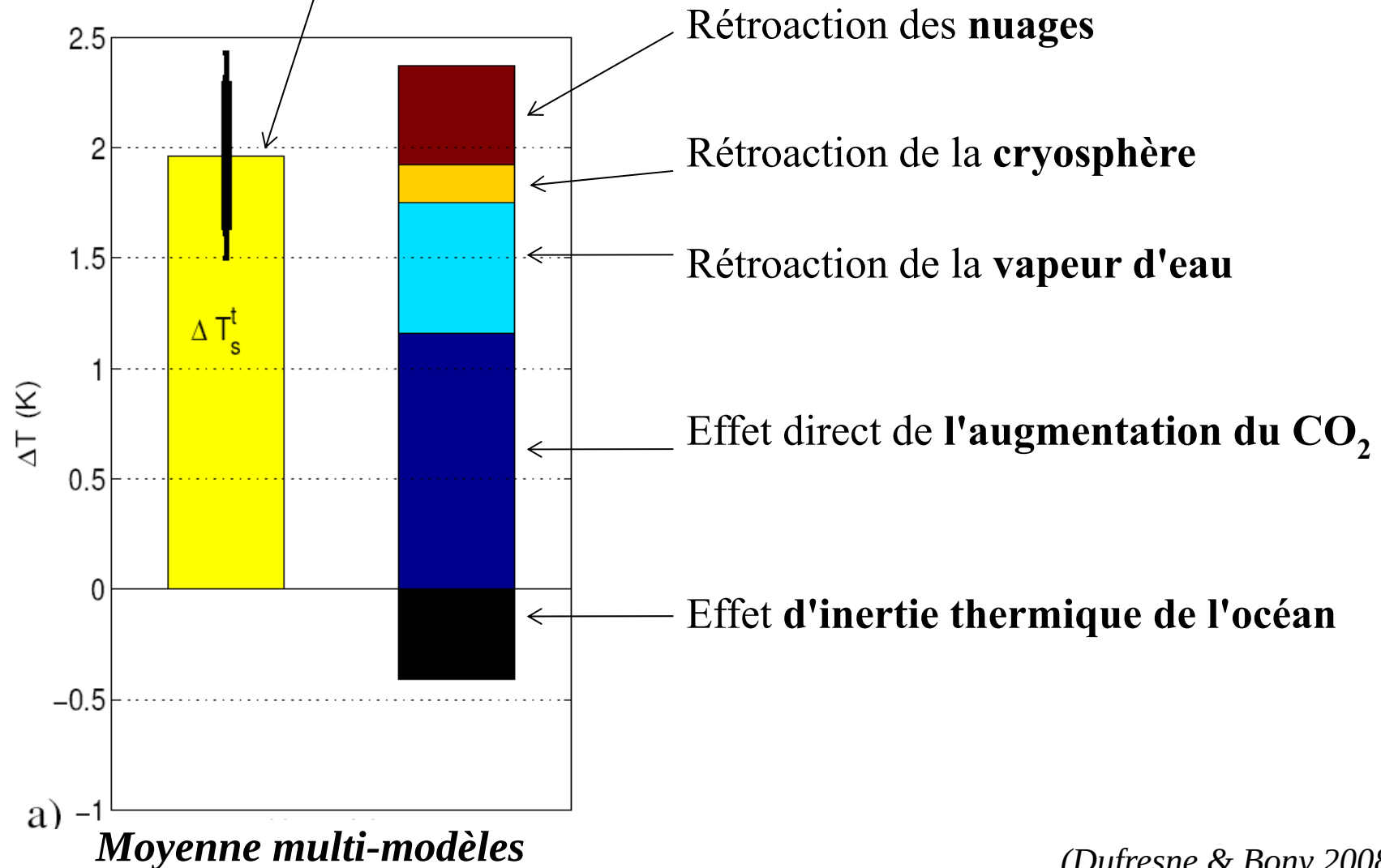
Rayonnement solaire net F_s

Rayonnement IR sortant F_{ir}



Accroissement de CO₂ et température

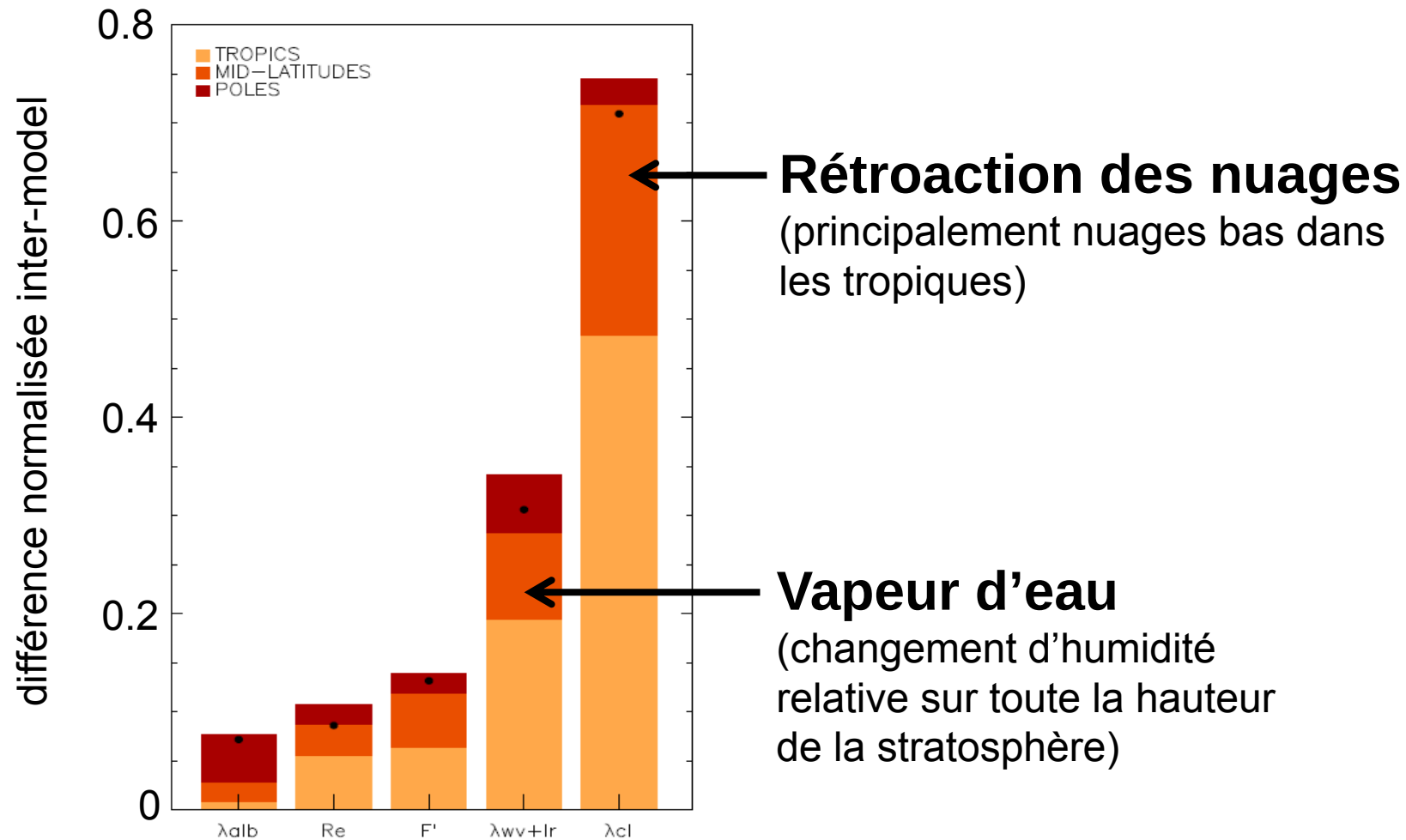
Réchauffement global pour un doublement de CO₂ en 70 ans



(Dufresne & Bony 2008)

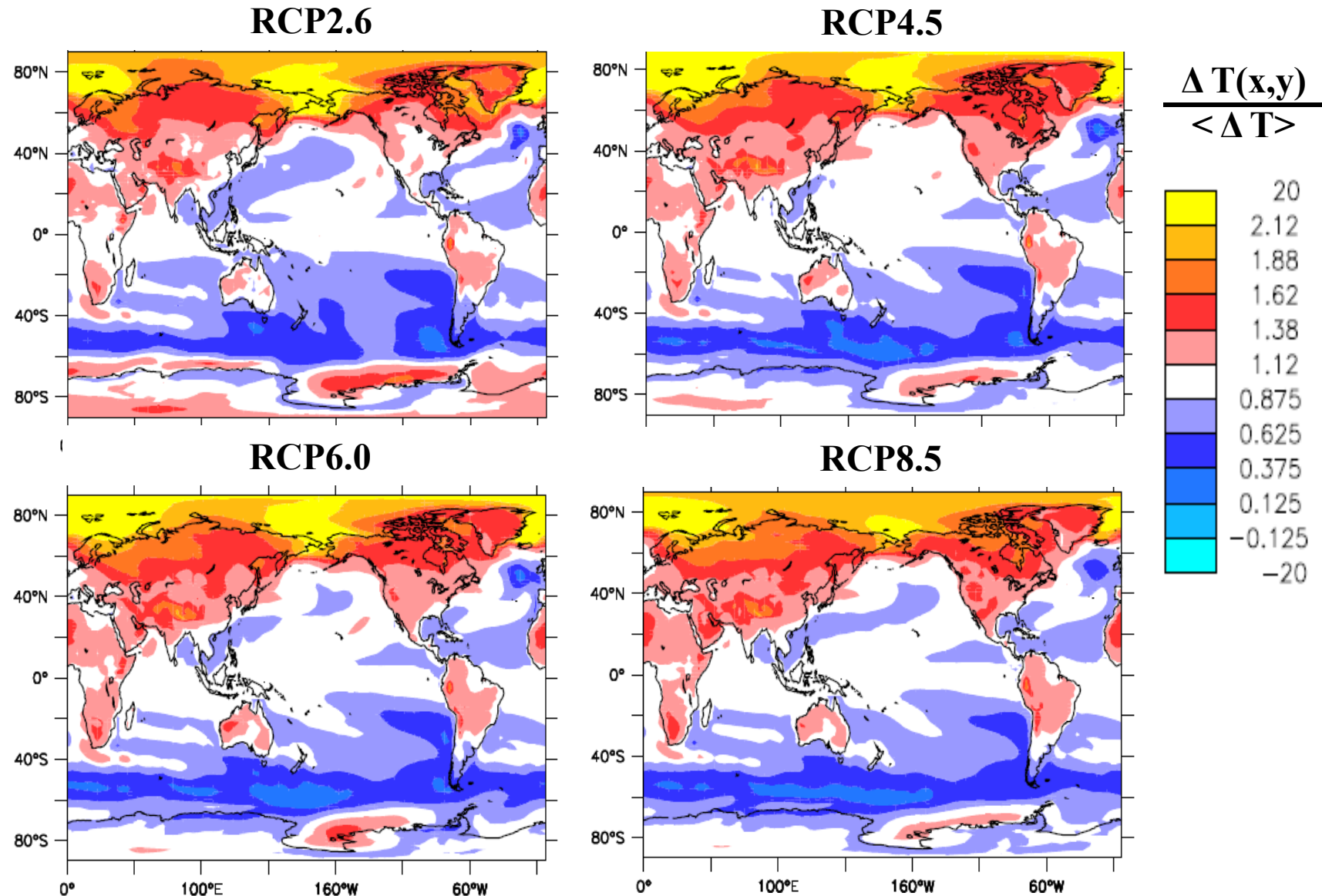
Accroissement de CO₂ et température

Origines de la dispersion entre les modèles



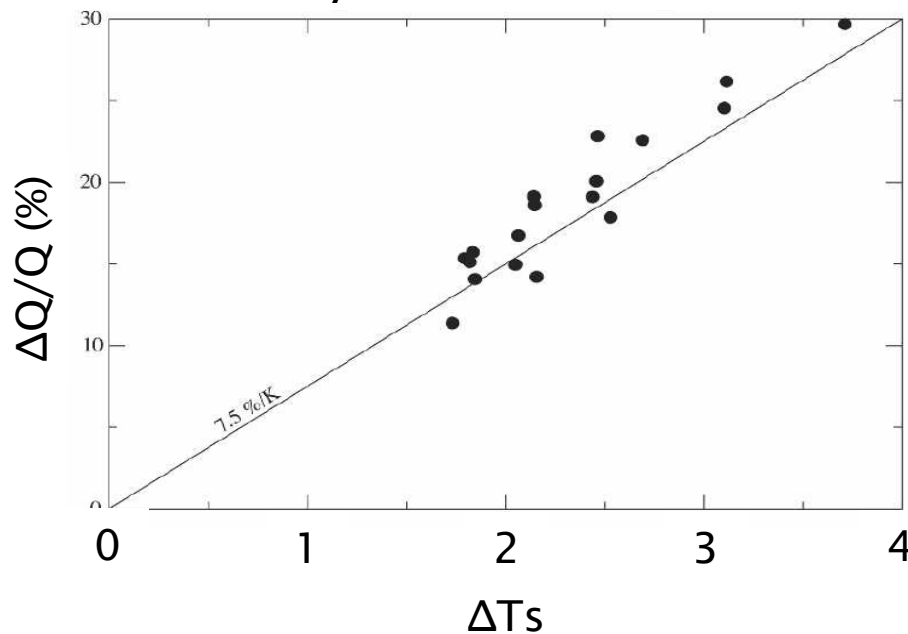
(Vial et al. smi))

Distribution géographique de la variation normalisée de la température de surface $\Delta T(x,y) / \langle \Delta T \rangle$ en 2100



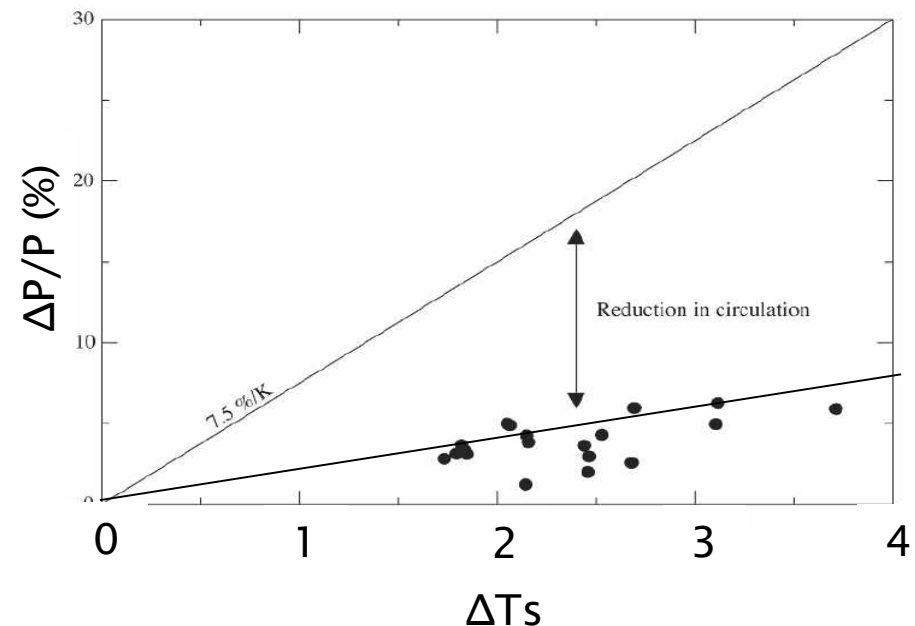
Les changements de précipitations dus à l'accroissement de température

Changement de la **quantité de H₂O** vs changement de la **température** moyenne de surface

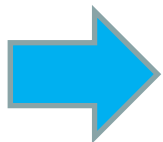


$$\Delta Q/Q (\%) \approx 7.5 \Delta T_s$$

Changement **précipitations** vs changement de la **température** moyenne de surface



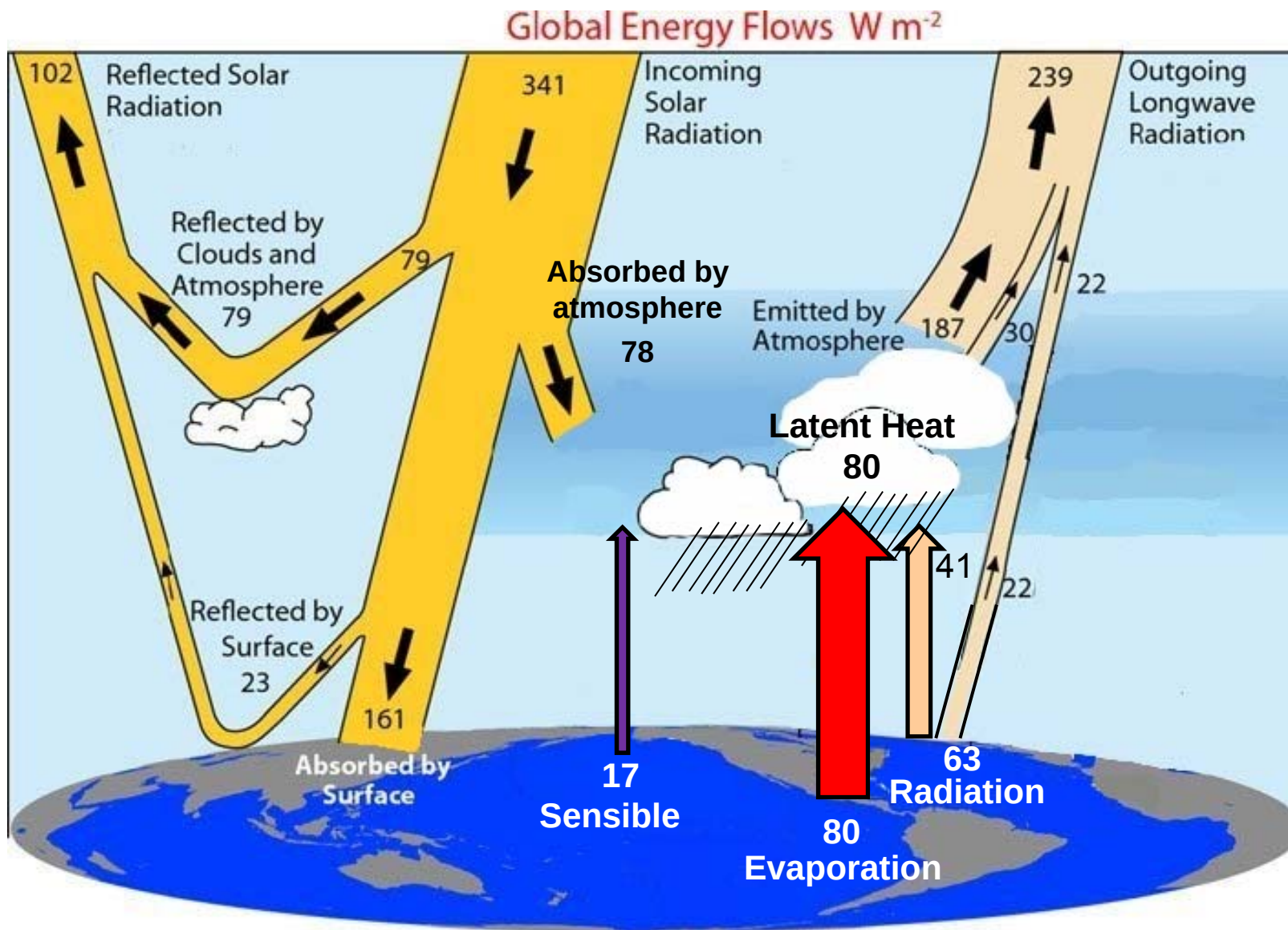
$$\Delta P/P (\%) \approx 1.5 \Delta T_s$$



Changement moyen de précipitation n'est pas directement relié au changement moyen de vapeur d'eau

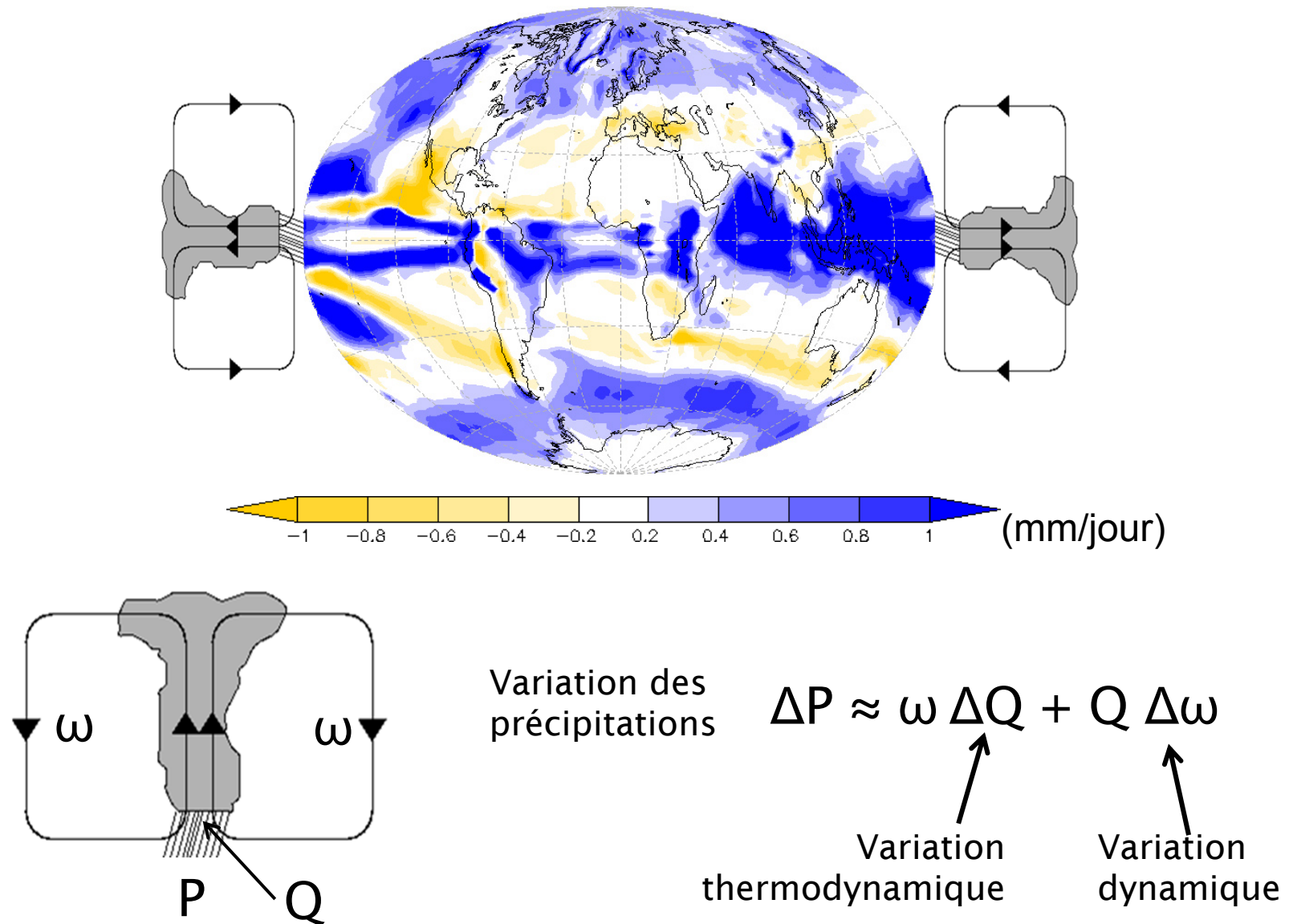
(Vecchi & Soden, 2007)

Changements de précipitations



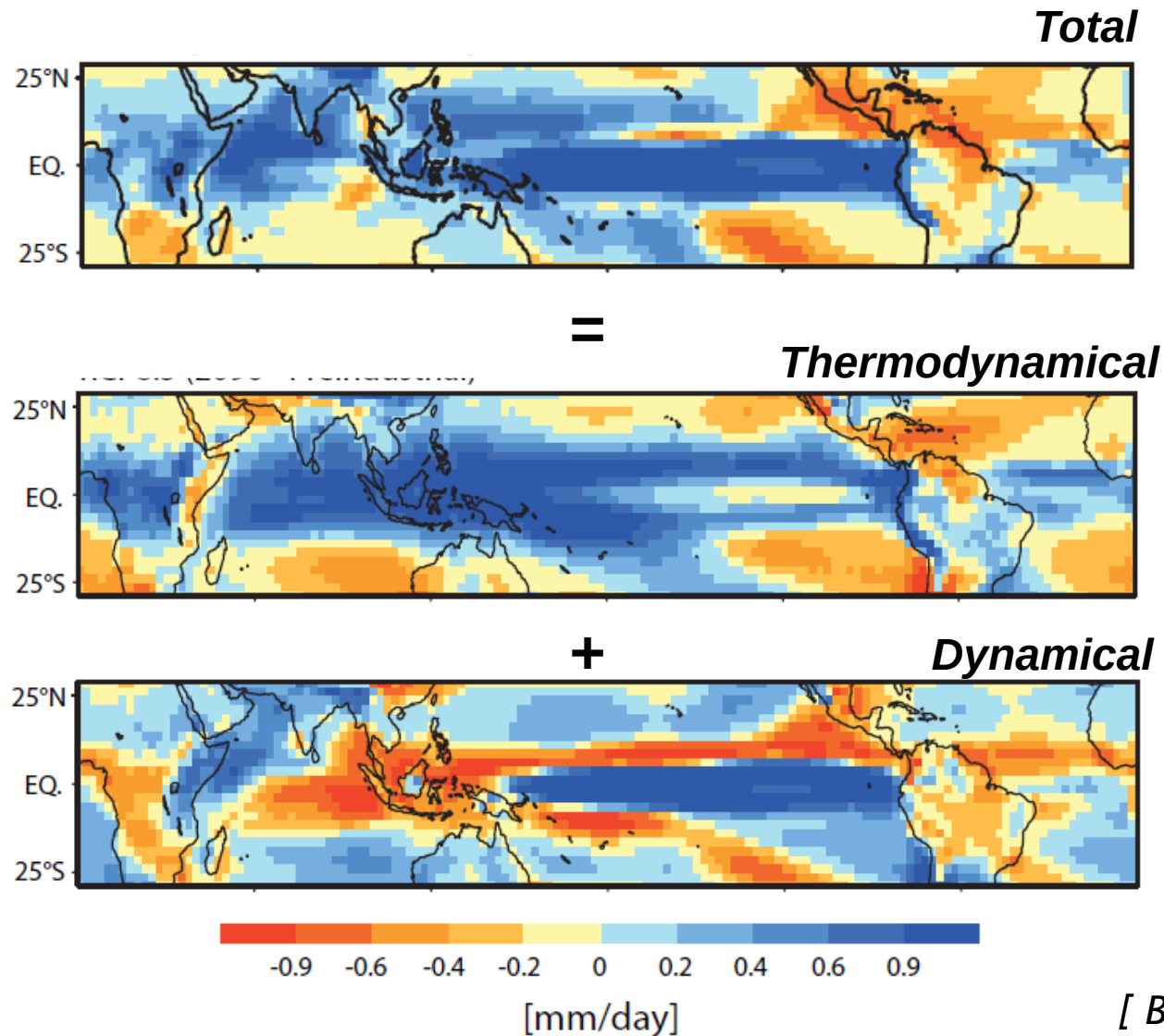
Adapté de [Trenberth & Fasullo, 2012]

Changements de précipitations



Tropical Precipitation Projections

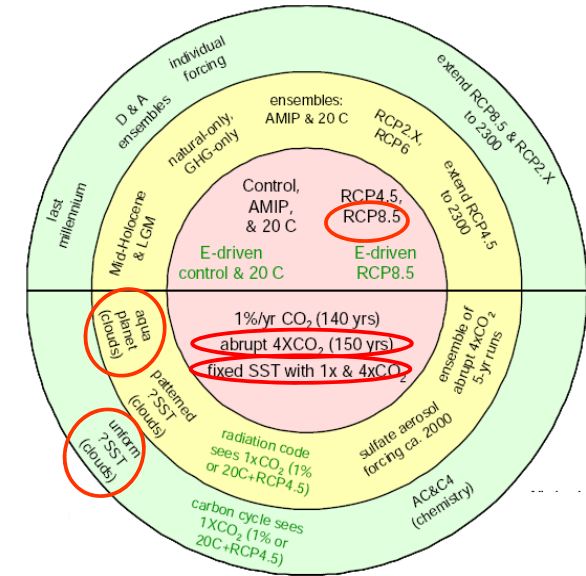
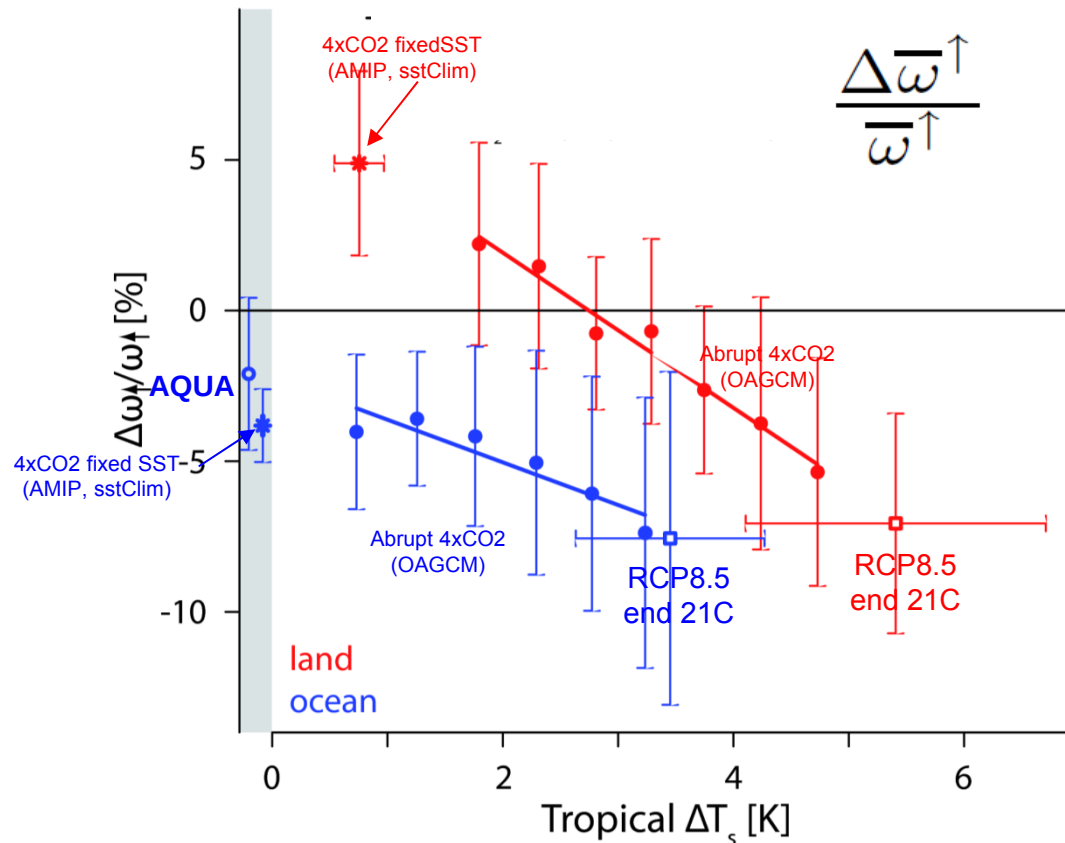
RCP8.5 scenario at the end 21C
(or idealized abrupt4xCO₂, $\Delta T = 4K$)



[Bony et al., 2013]

Change in circulation (%) predicted by CMIP5 models ... in multiple models, experiments and configurations

Change in large-scale rising motion



- Abrupt 4xCO₂ in coupled ocean-atmosphere GCMs
- RCP 8.5 scenario at 4xCO₂
- * 4xCO₂ in atmosphere-only GCMs
- 4xCO₂ in aqua-planet atmosphere-only GCMs

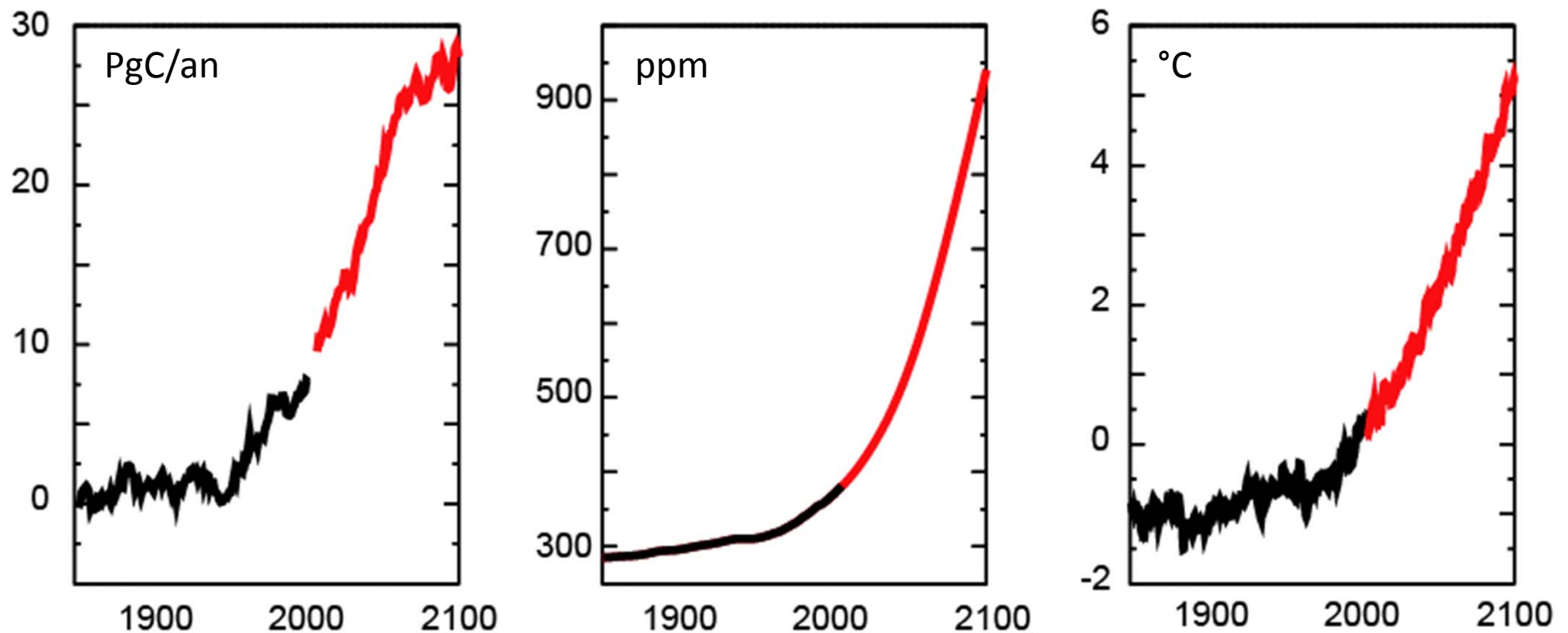
Changement de circulation:

- Réponse directe au CO₂
- Réponse à la température

[Bony et al., 2013]

Emissions de Carbone, Concentrations atmosphérique de CO₂, Température moyenne

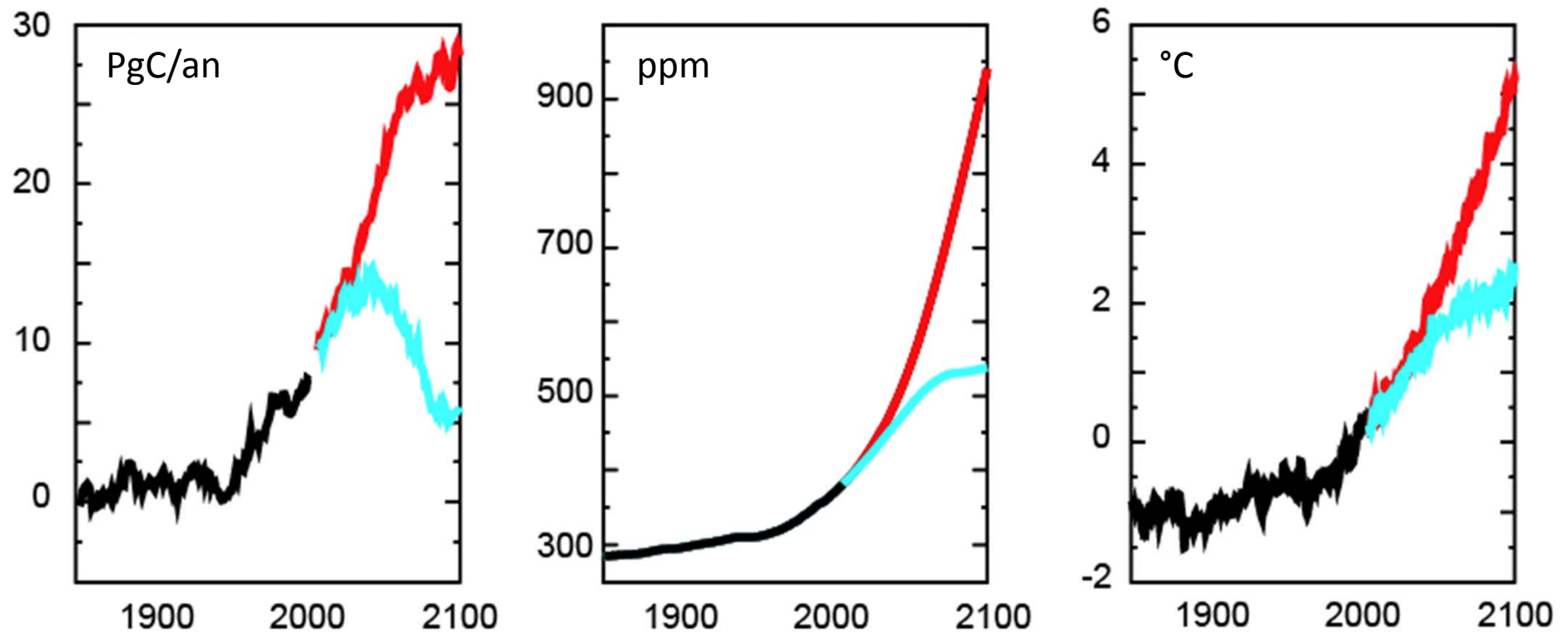
>> **Scénario Haut** : les émissions, les concentrations et les températures augmentent



Emissions de Carbone, Concentrations atmosphérique de CO₂, Température moyenne

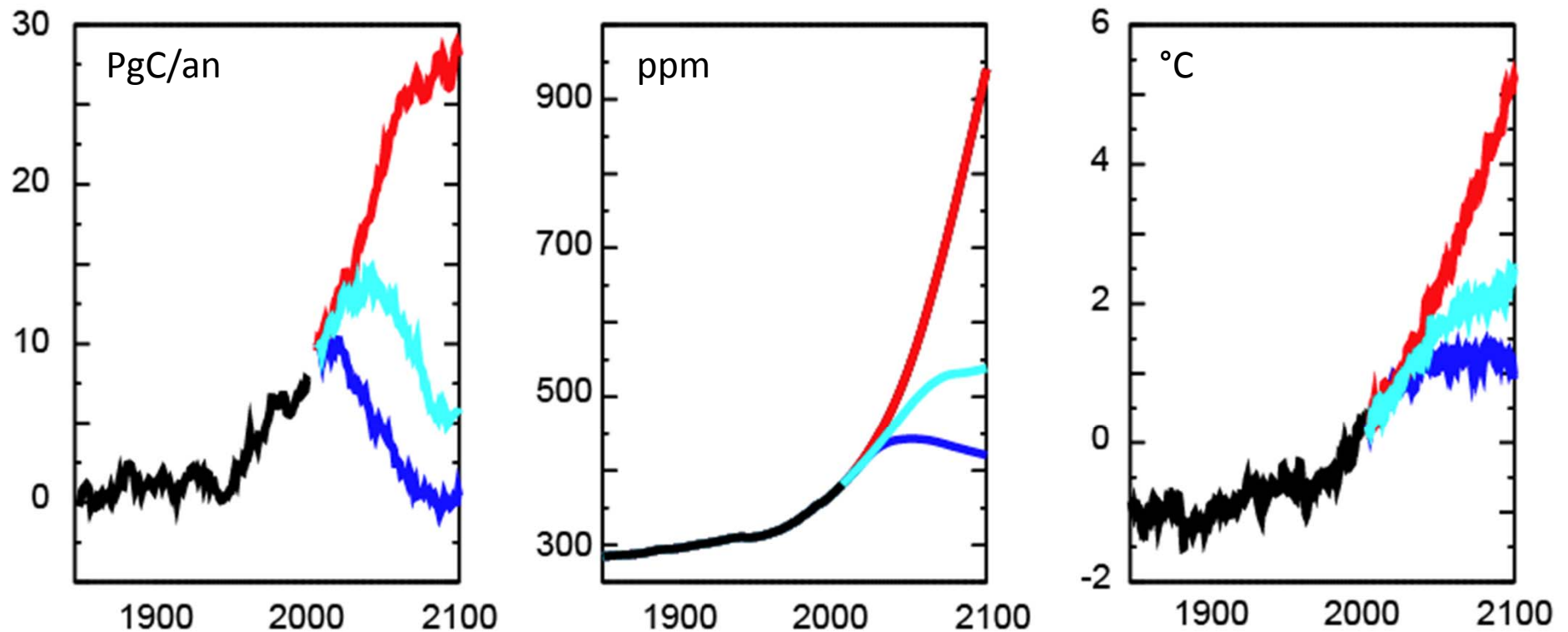
>> **Scénario Haut** : les émissions, les concentrations et les températures augmentent

>> **Scénario Médian** : pour stabiliser les concentrations à 550 ppm, il faut décroître fortement les émissions. Mais les températures continent à augmenter



Emissions de Carbone, Concentrations atmosphérique de CO₂, Température moyenne

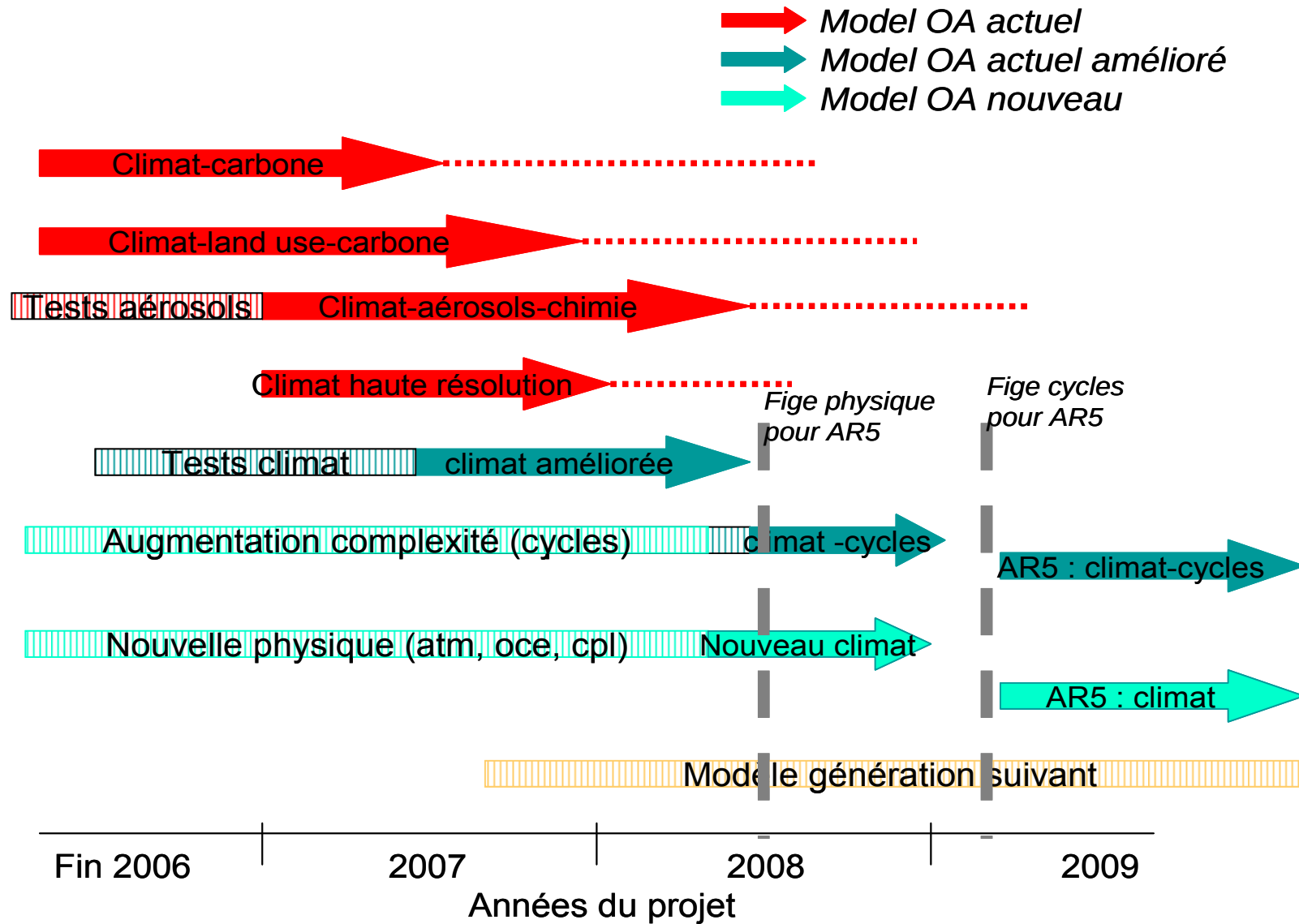
- >> **Scénario Haut** : les émissions, les concentrations et les températures augmentent
- >> **Scénario Médian** : pour stabiliser les concentrations à 550 ppm, il faut décroître fortement les émissions. Mais les températures continuent à augmenter
- >> **Scénario Bas** : pour limiter le réchauffement à 2°, il faut limiter la concentration à moins de 450 ppm et amener les émissions à 0 avant la fin du siècle.



Plan

- I. Réalisation des simulations CMIP5
- II. Robustesses et incertitudes de quelques aspect des changements climatiques
- III. Réalisation pratique et premiers bilans**

Préparation du modèle IPSL-CM5



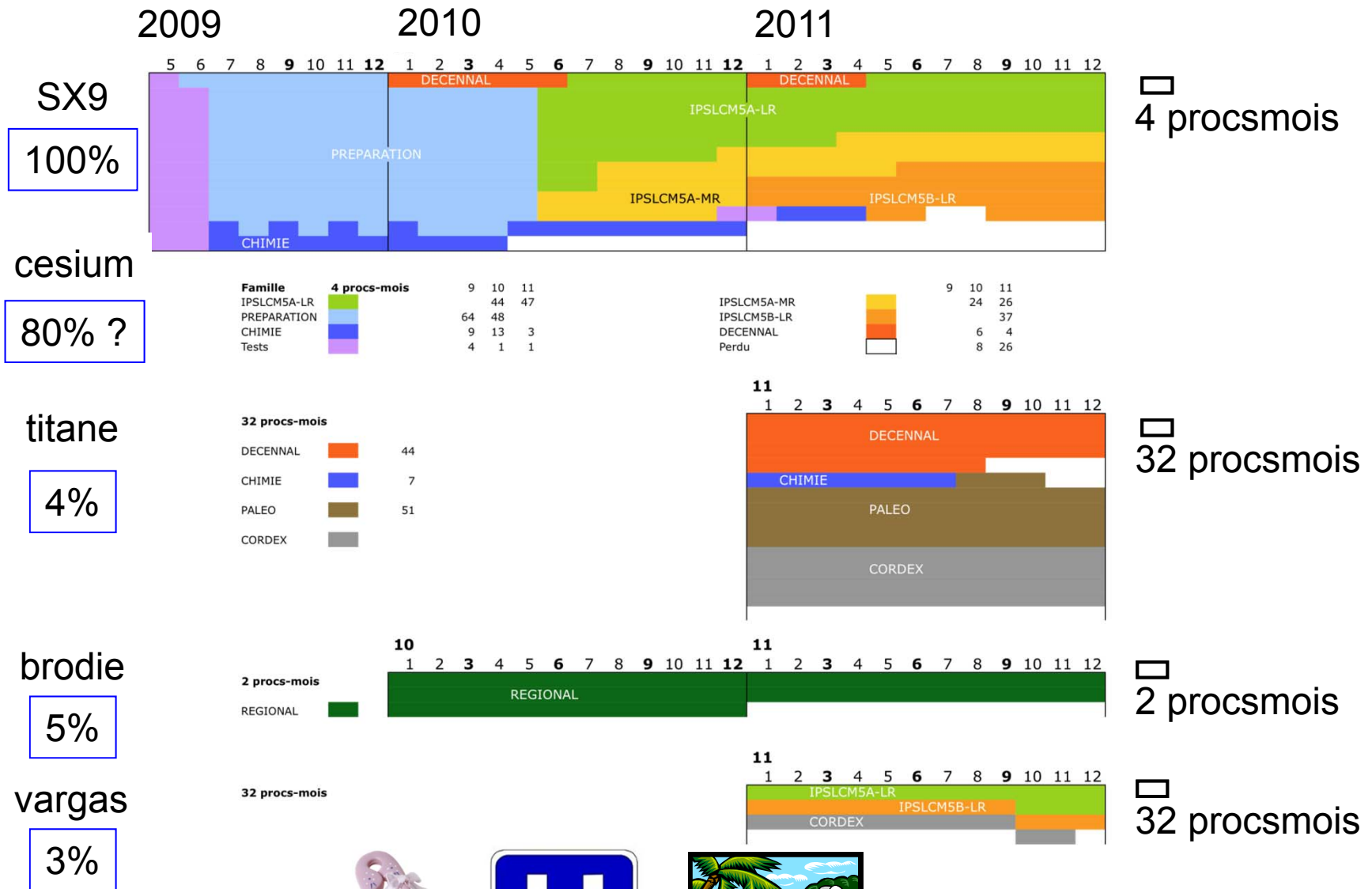
Très important travail de préparation des modèles

Simulations réalisées avec IPSL-CM5

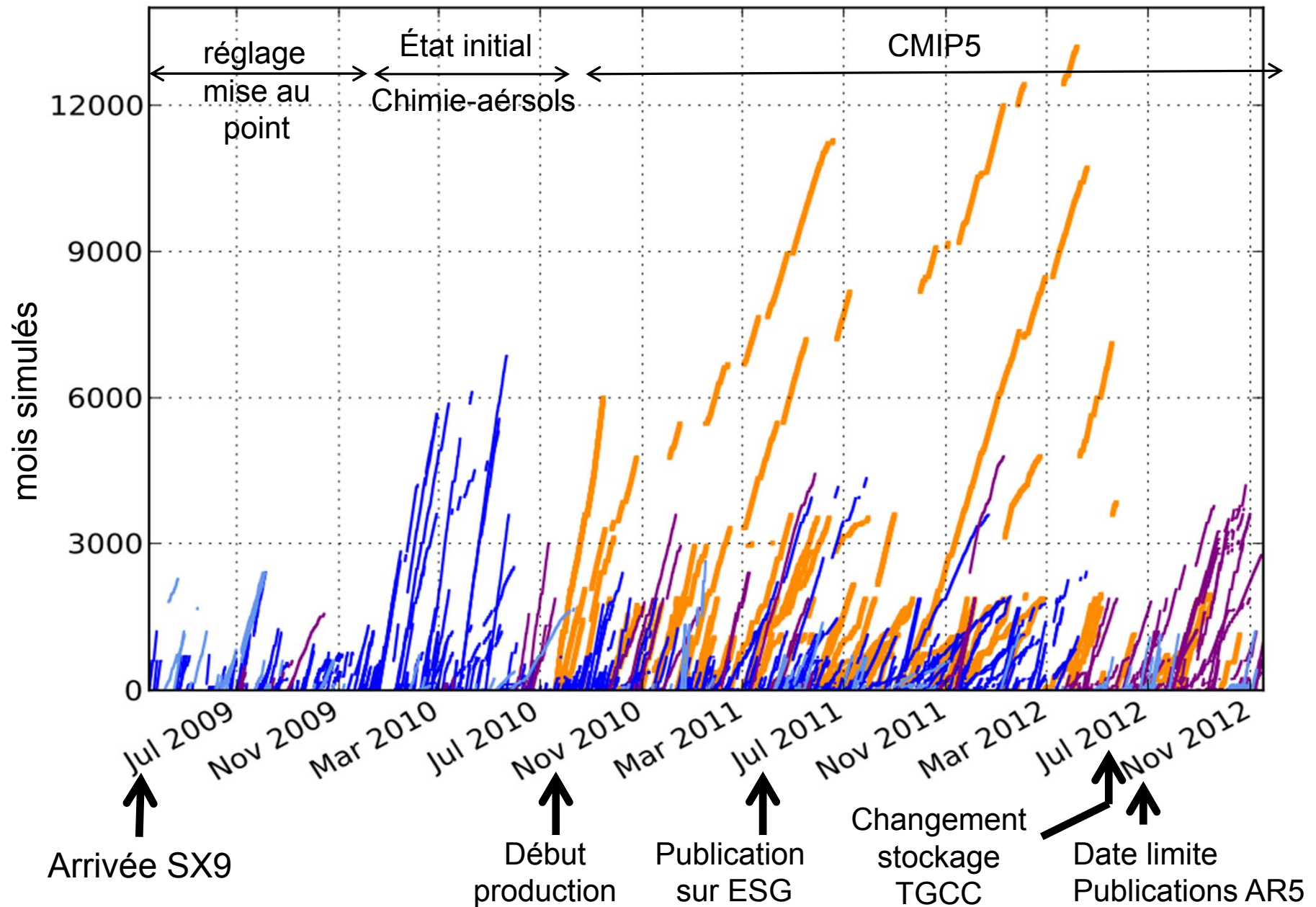
Simulations	CM5A-LR		CM5A-MR		CM5B-LR	
	# Yr	#Expe	# Yr	#Expe	# Yr	#Expe
piControl+historical+AMIP	2900	16	1260	8	490	4
Paleo	3000	3	-	-	500	1
Future climate projections	2200	16	800	4	200	2
Carbon emission	800	8	140	1	-	-
Diagnostic & understanding	1750	22	280	2	510	9
Detection and attribution	4800	30	960	6	-	-
Others	4400	35	-	-	-	-
Total	19850	130	3440	21	1700	16

- **Très important travail** de préparation de l'environnement d'exécution
- Un nombre de simulations, de variables, de fichiers, et un volume de données **sans précédent pour nous**.

Production SX9 et autres machines 2009-2011



Déroulement des simulations CMIP5 (2009-2012)

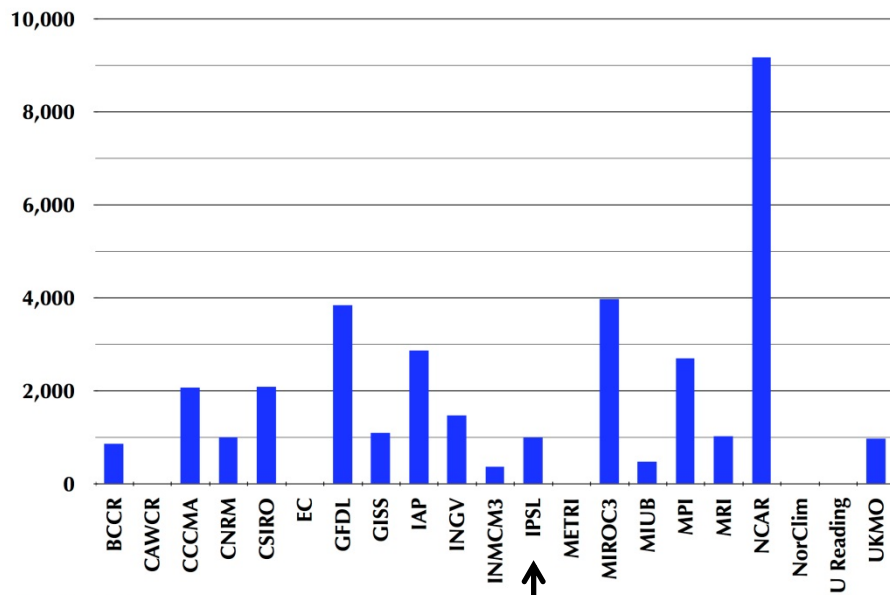


Analyse et distribution des données

- Plus de variables, fréquence plus élevée
- Plus de type d'expériences
- Simulations d'ensemble
- IPSL- Trois versions de modèle

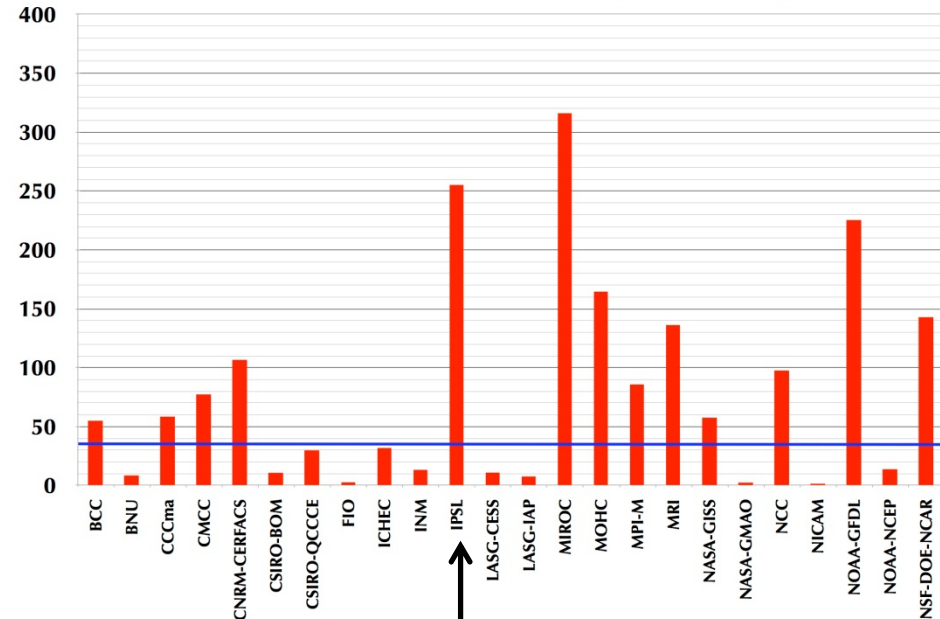
en moyenne: x30 de CMIP3 à CMIP5

CMIP3 data volumes by group (GB)



Friday, October 26, 2012

CMIP5 data volumes by group (TB)



Friday, October 26, 2012

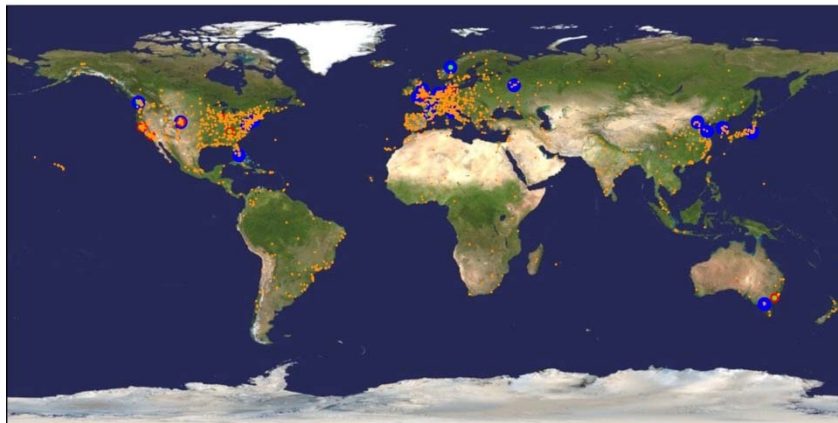
IPSL
x250

Distribution des données: Earth System Grid Federation (ESGF)

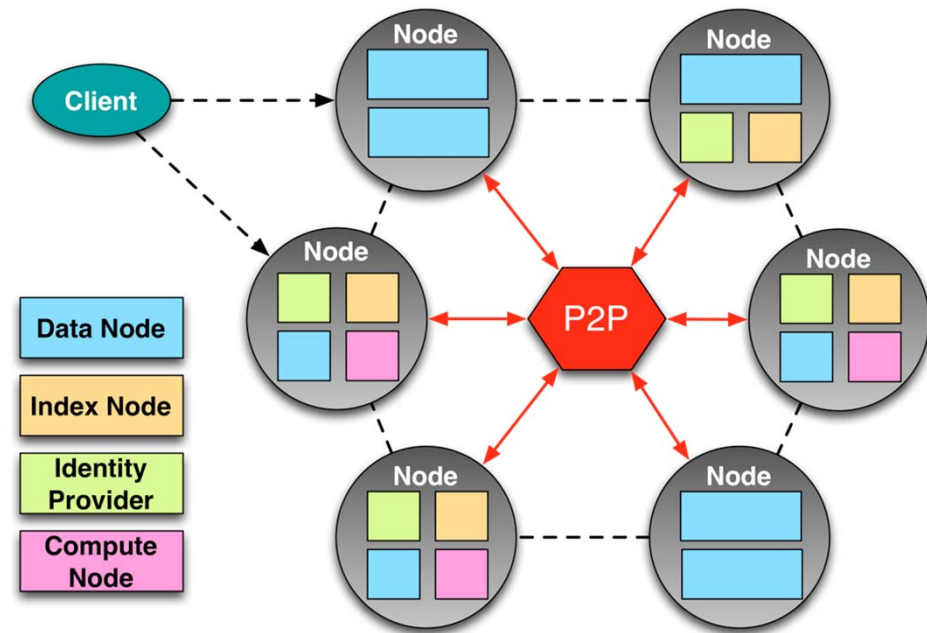
CMIP3: distribution des données via 1 serveur (PCMDI)

CMIP5: distribution répartie des données

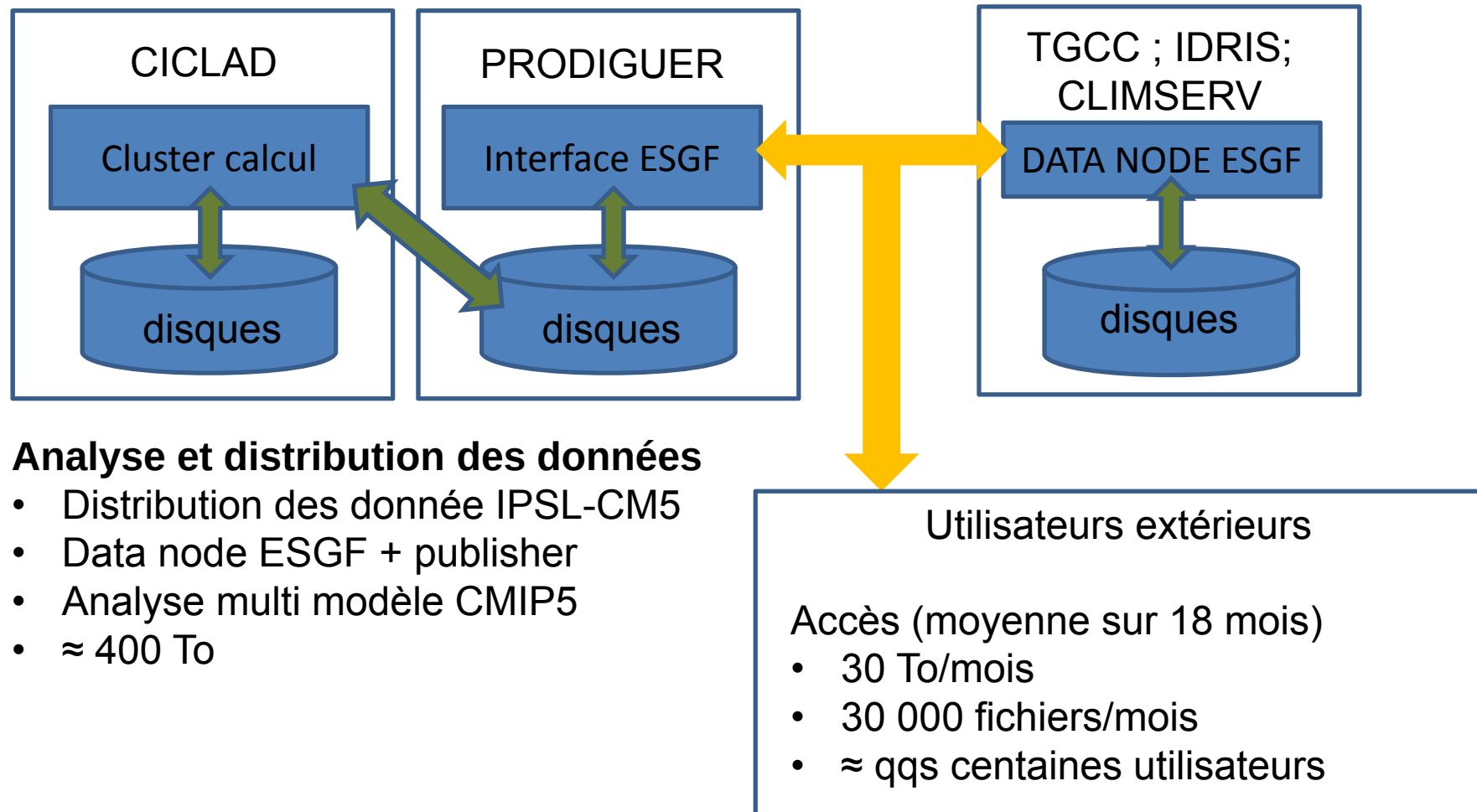
début 2013: 1.5 Po, 3 millions de fichiers, 19(32) data node,
9(14) gateway



Friday, October 26, 2012



Analyse et distribution des données

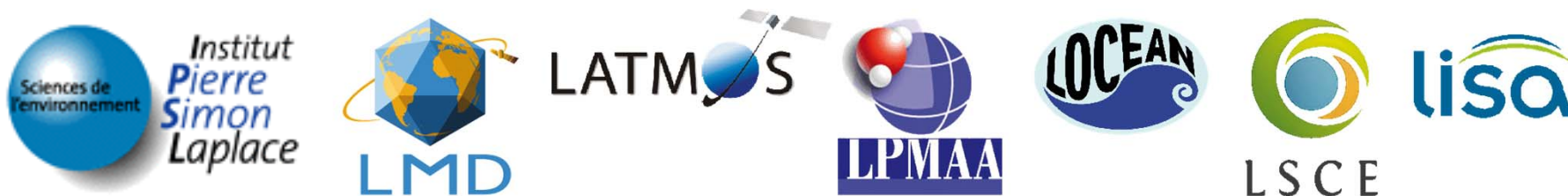


Pourquoi avons-nous réussi CMIP5 ?

- **CMIP5: très forte dynamique de travail** autour de la mise au point des modèles, de la réalisation des simulations, mises à disposition des données et analyses des simulations
- **Très forts engagements de l'ensemble des personnes impliquées**
- Importance de la **bonne articulation entre objectifs scientifiques et développement des modèles et outils**
- **Expertises variées et partagées**. Évolution cohérente, en phase, échanges entre les différentes composantes.
- Articulation entre intérêt des recherches individuelles et contributions aux constructions communes (notamment timing)
- **Moyens de calcul et ressources informatiques ; calculateur dédié, d'architecture connue**
- **Anticipation**, projet construit sur le **long terme, acquisition d'expérience**
- **Les soutiens reçus**

Les soutiens qui nous ont permis de réaliser CMIP5

Laboratoires



Tutelles



Moyens de calcul



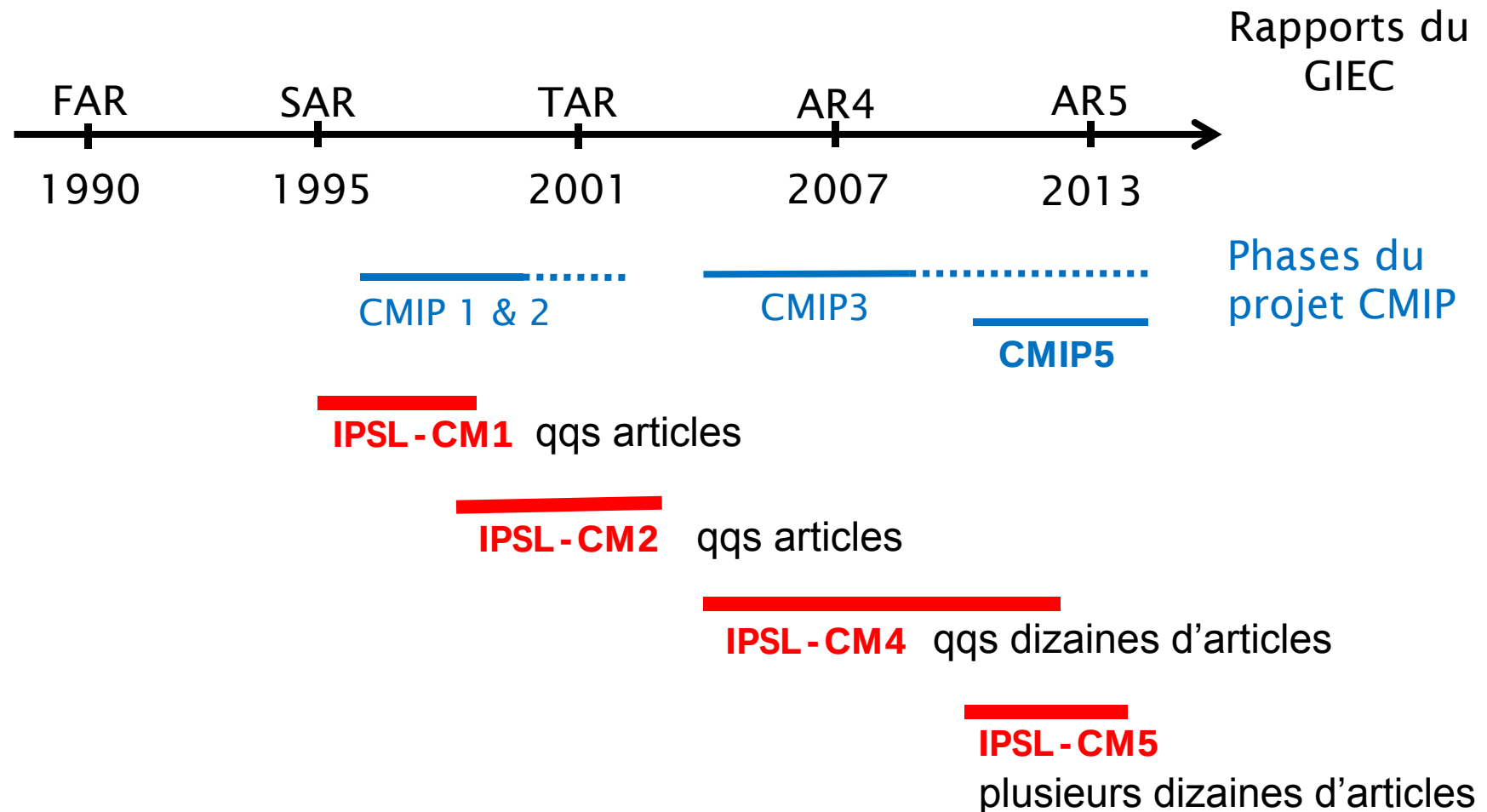
Projets



Que nous apporte le projet CMIP?

- **point de rencontre**, convergence des développements
- **renforcement de la dynamique scientifique**, en interne, sur la modélisation intégrée du système climatique et sur l'étude des changements climatiques
- **positionnement** dans la communauté internationale
- **exploitation scientifique**: analyses multi-modèle ↔ études de sensibilité
 - identifier les résultats robustes et ceux incertains
 - utiliser la cohérence et les différences de résultats pour comprendre le système climatique
- Liens avec d'autres communautés scientifiques
- Retour sur les caractéristiques et l'aide au développement de nos modèles (à organiser) ?

Nos contributions aux projets CMIP



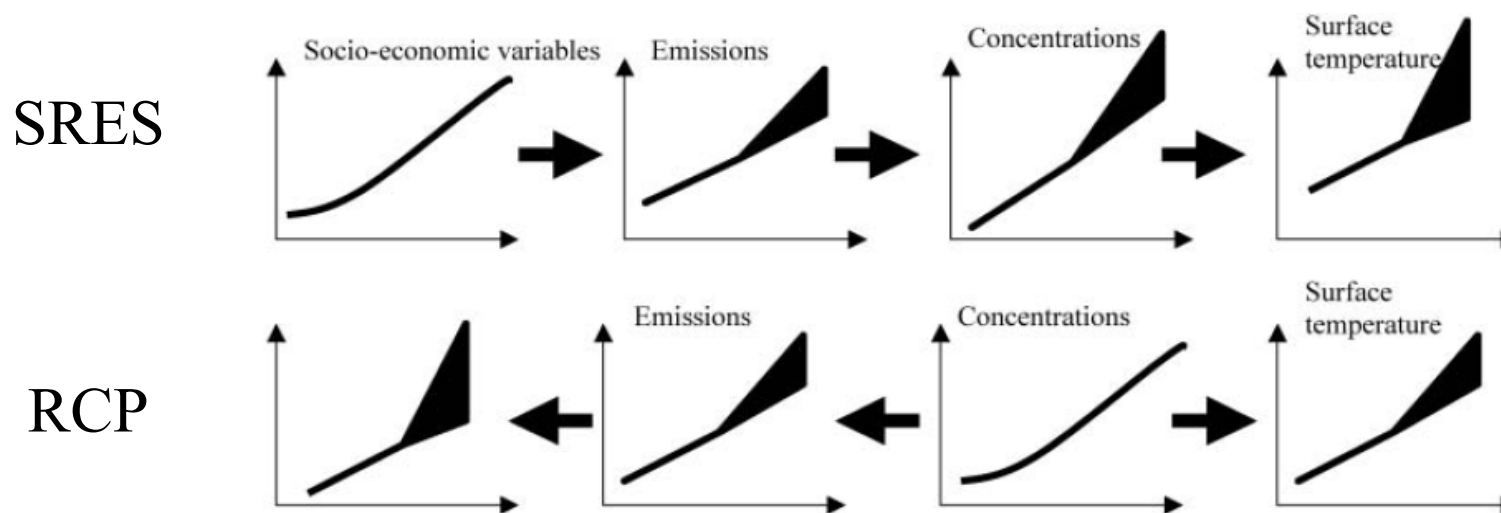
Et le futur ?

Séminaire de prospective prévue ce printemps (23-24 mai)

A dramatic sky with dark blue clouds and a rainbow. The sky is a deep, dark blue, and the clouds are white and billowing, creating a sense of movement and drama. A faint rainbow is visible in the lower left corner. The text "Merci de votre attention" is centered in the middle of the image.

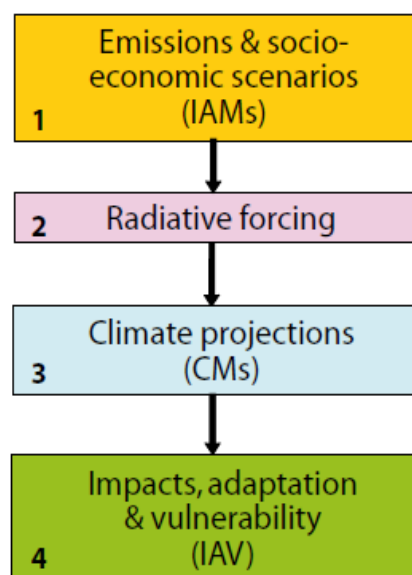
Merci de votre attention

Projections pour le future: utilisation de scénarios

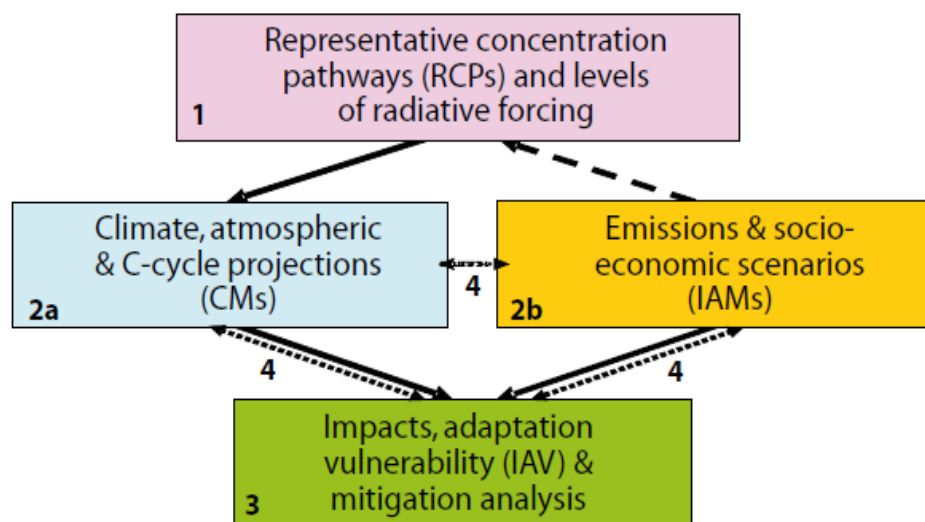


[Hibbard et al., EOS, 2007]

SRES a) Sequential approach

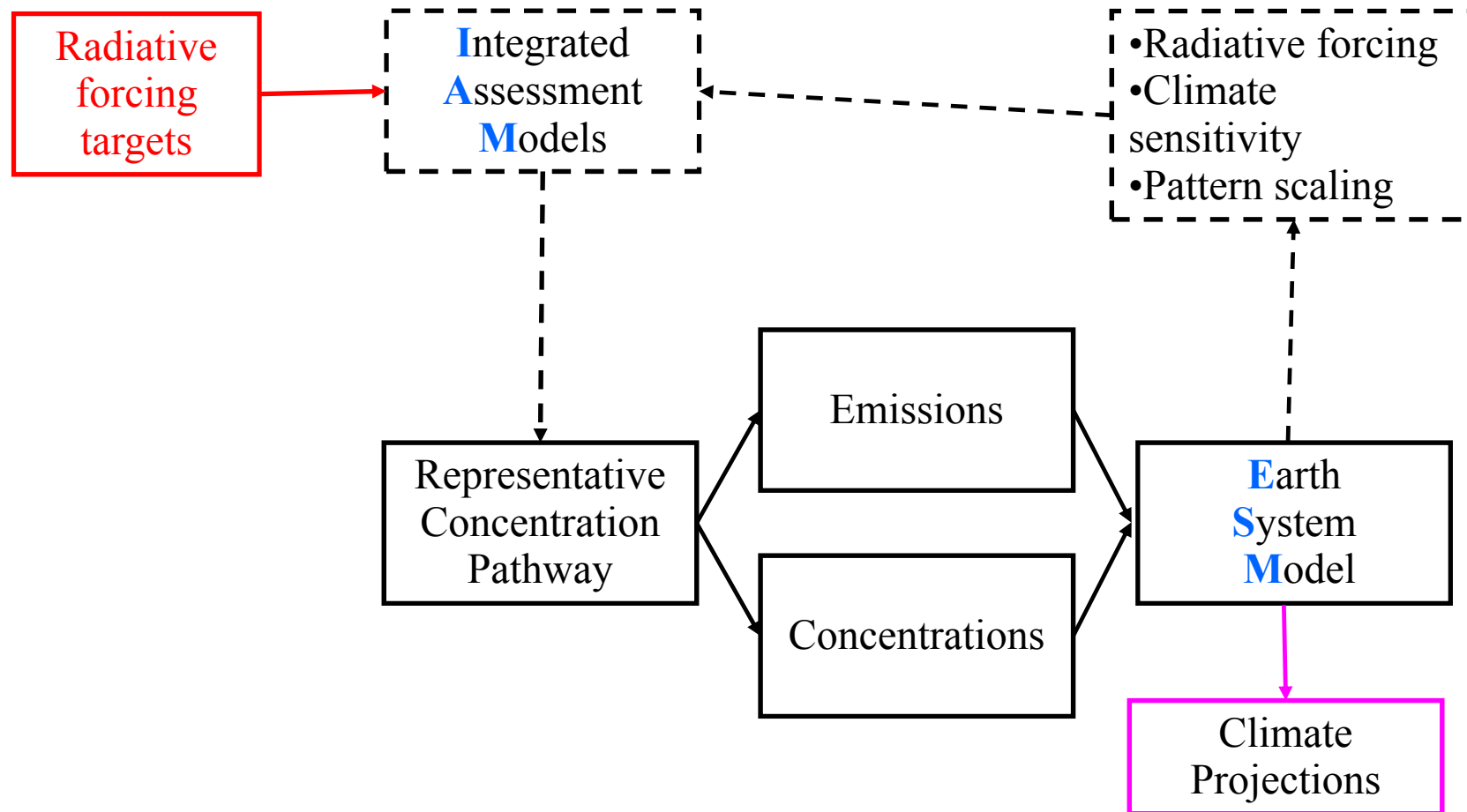


RCP b) Parallel approach

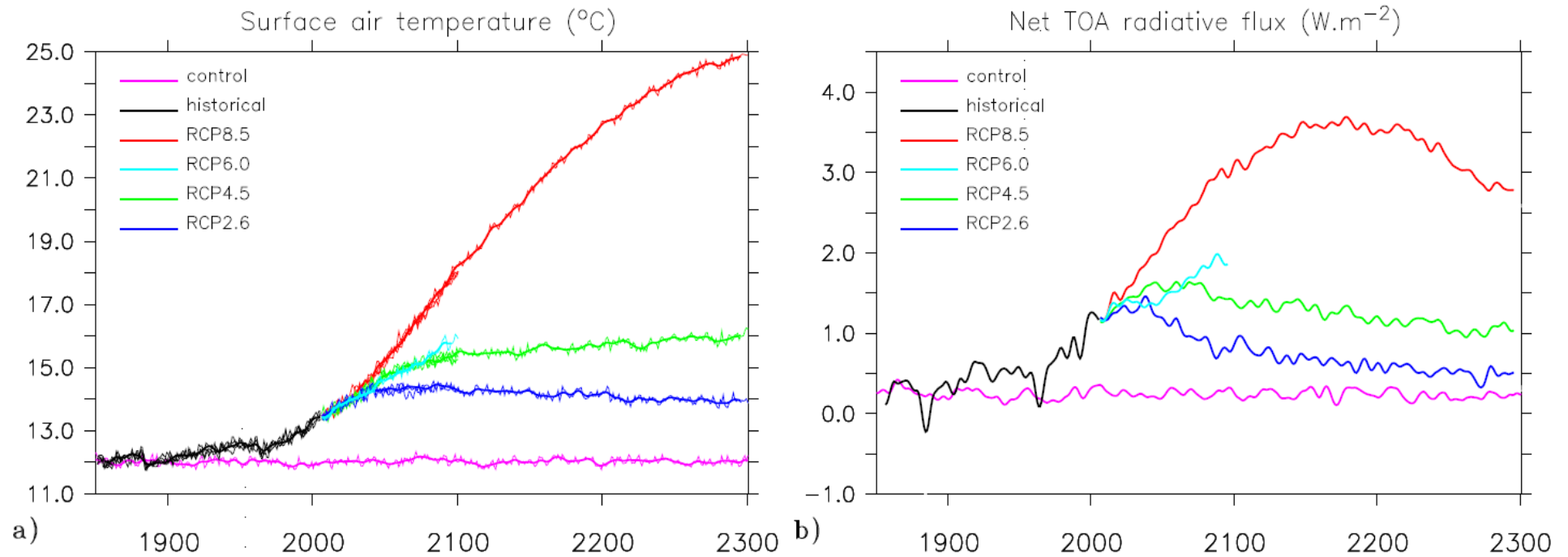


[Moss et al., IPCC, 2008]

Développement et utilisation des scénarios

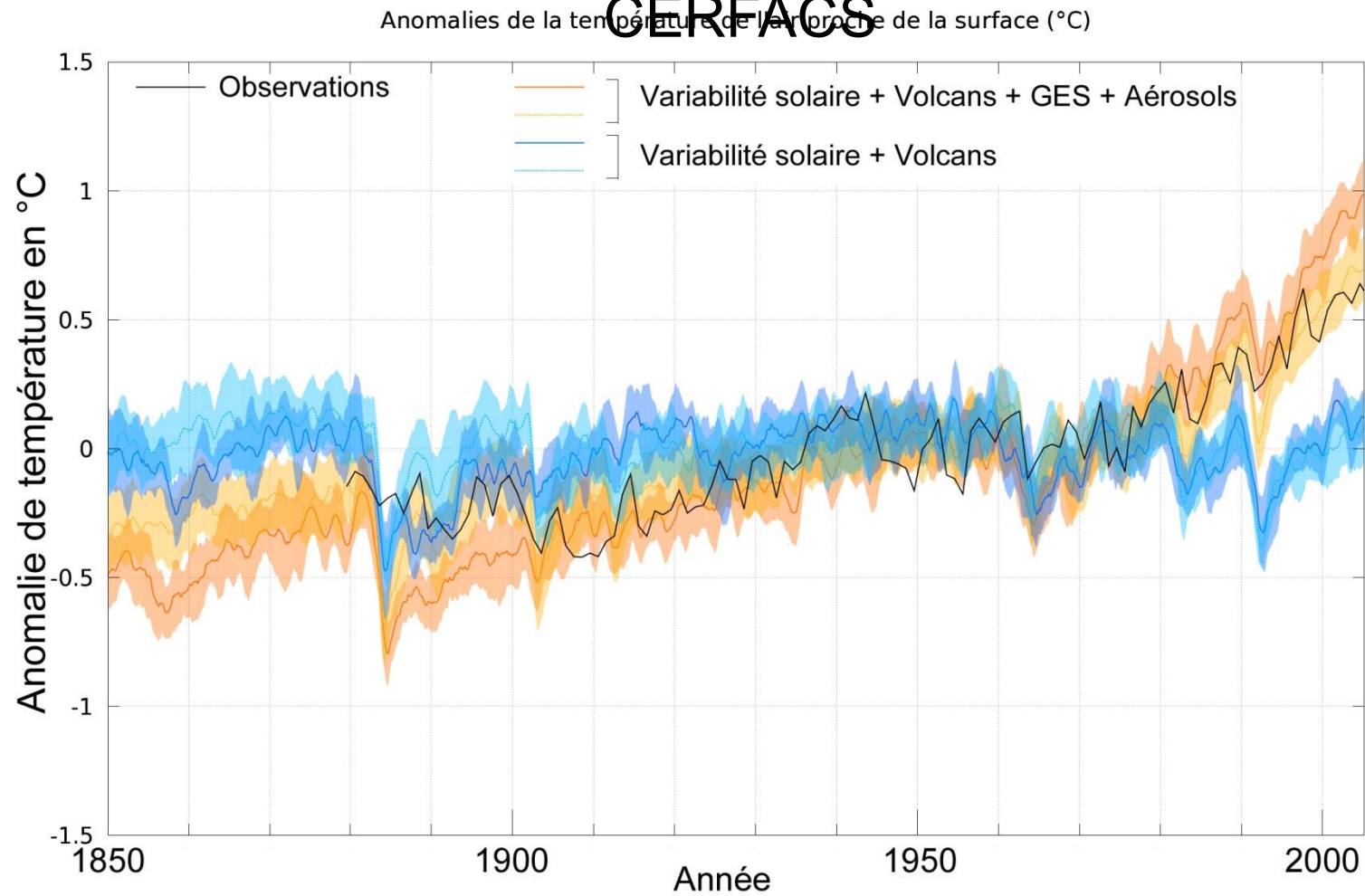


Time evolution of the global mean air surface and heat budget in the IPSL-CM5A-LR historical and RCPs simulations

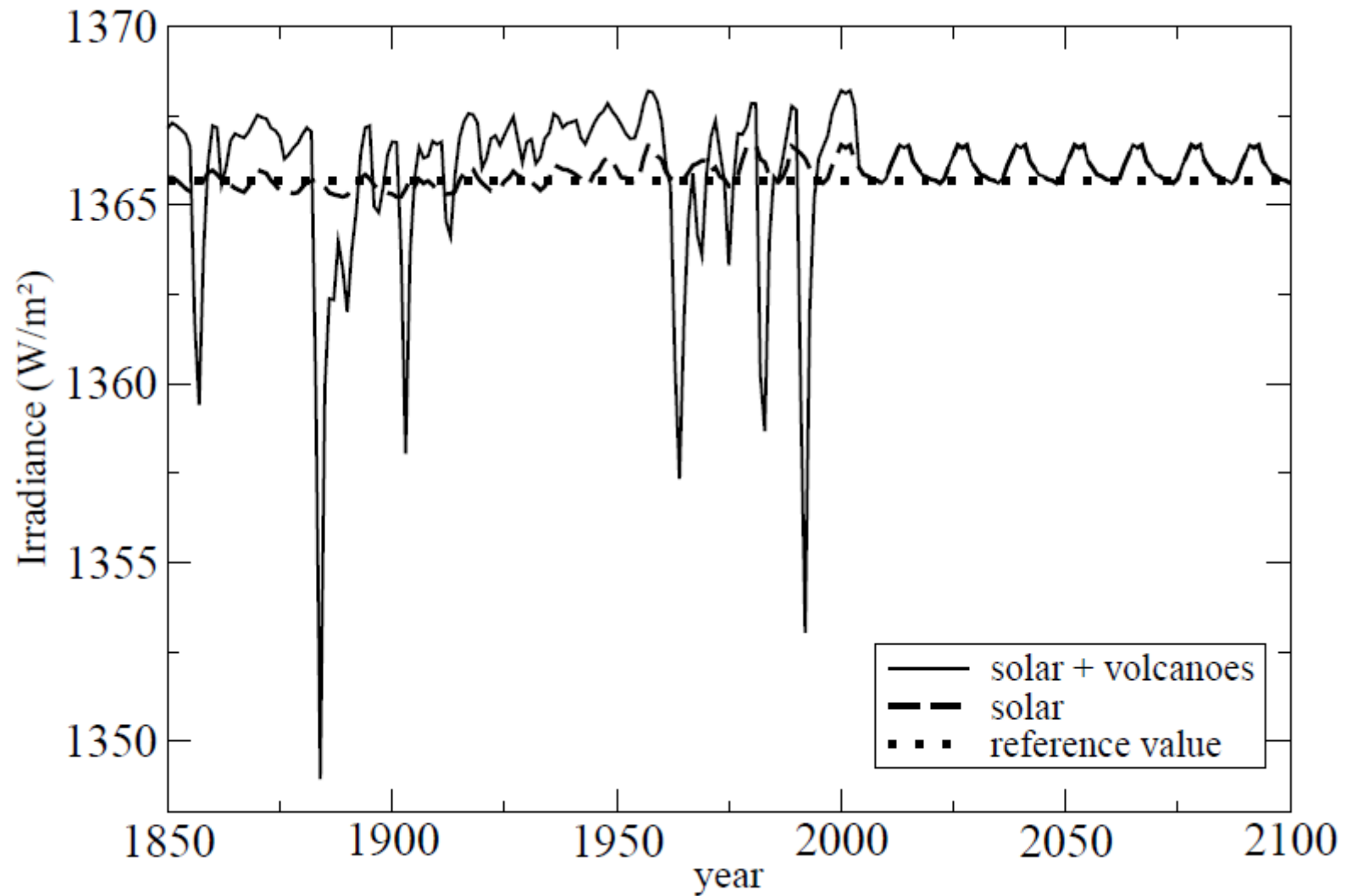


Température de surface: 1850-2005

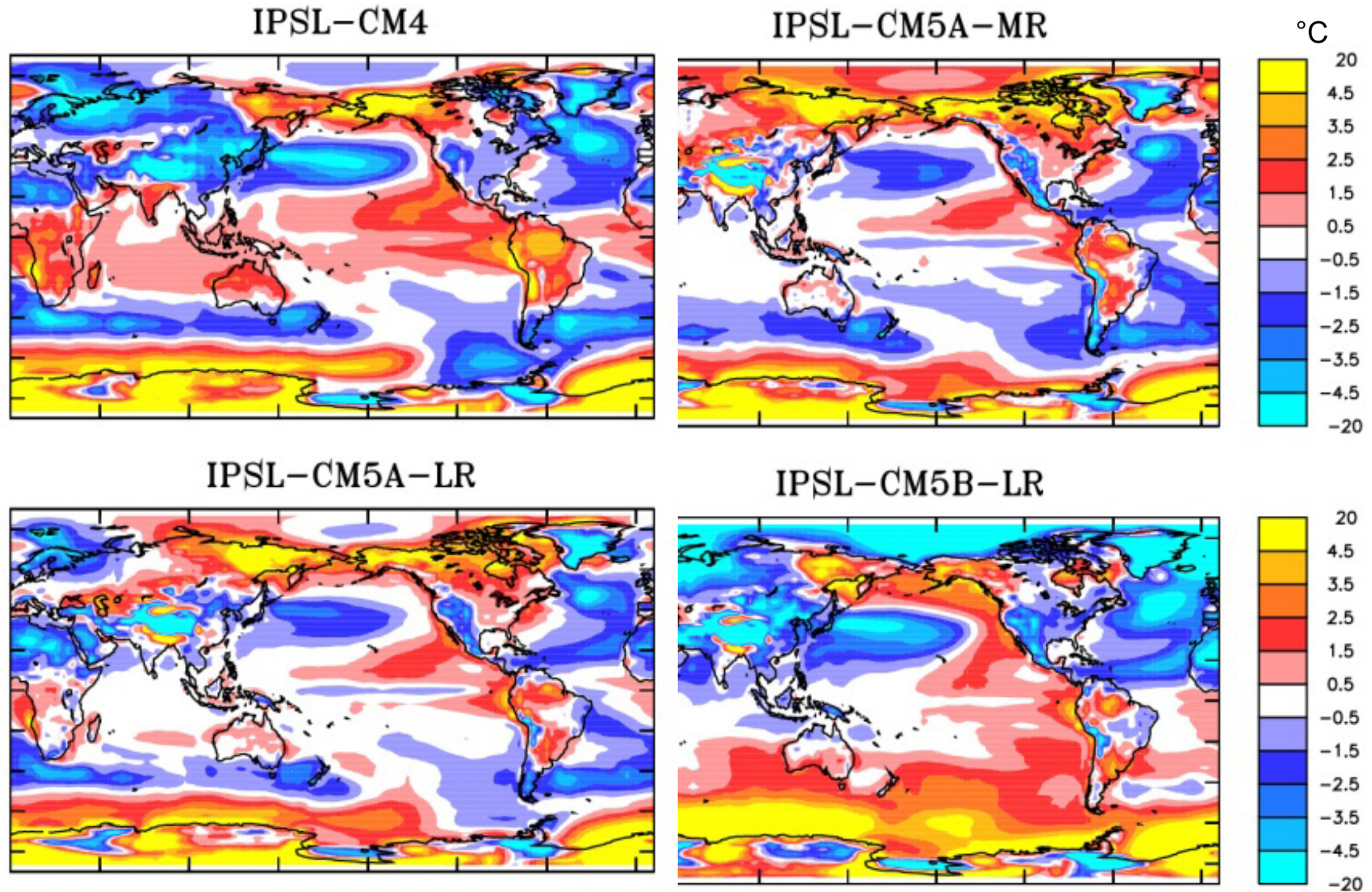
Modèles de l'IPSL et du CNRM- GERFACS



Time evolution of the natural radiative forcings in the IPSL-CM5 historical and RCPs simulations



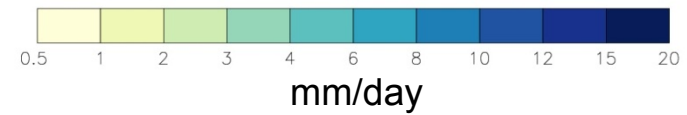
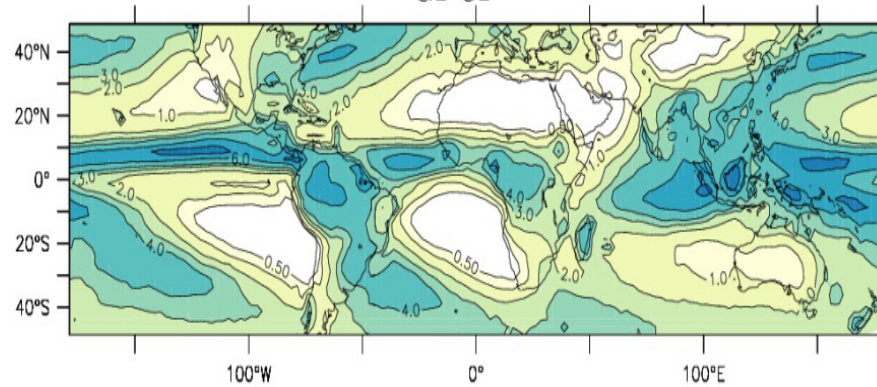
Bias in air surface temperature (1961-1990)



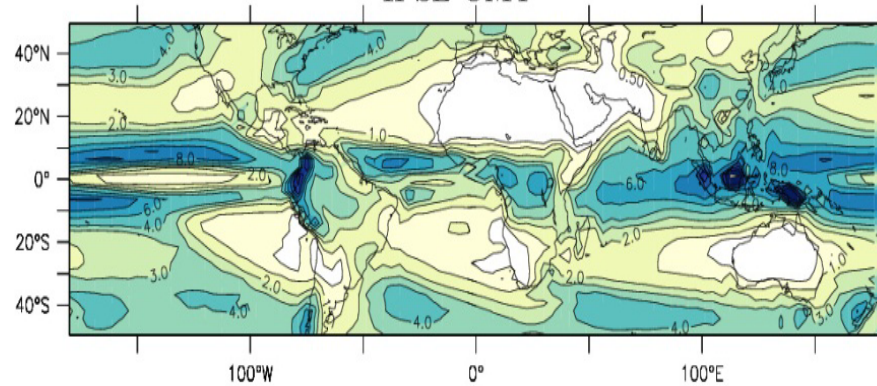
Precipitation

(1961-1990)

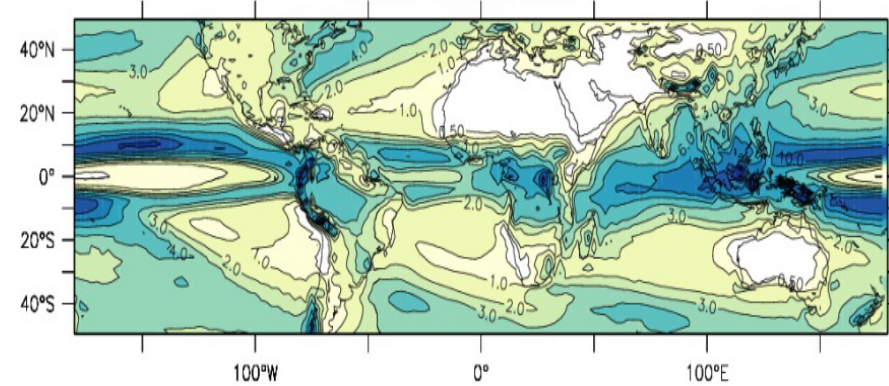
GPCP



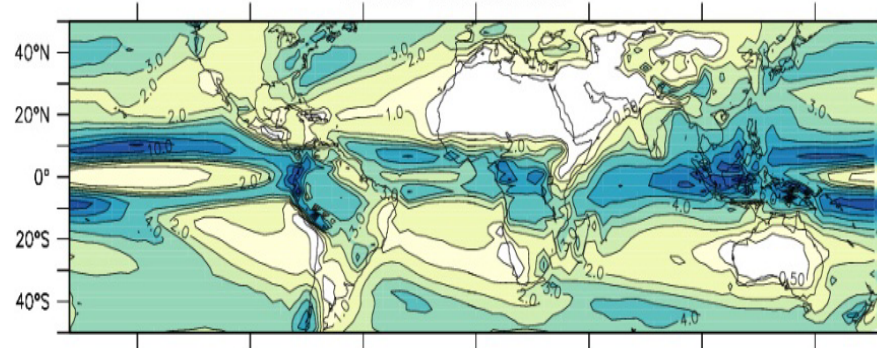
IPSL-CM4



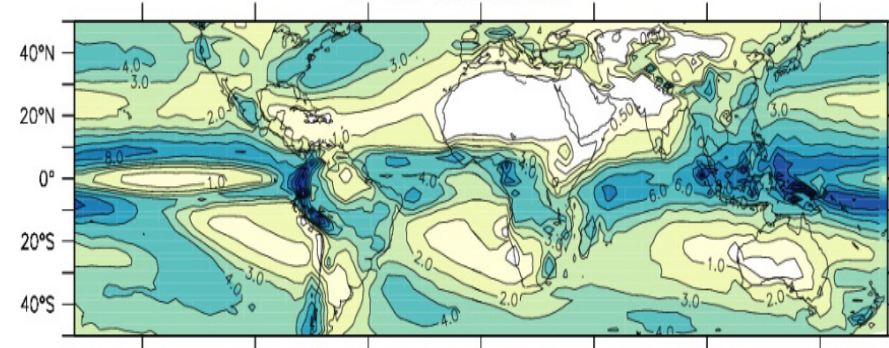
IPSL-CM5A-MR



IPSL-CM5A-LR

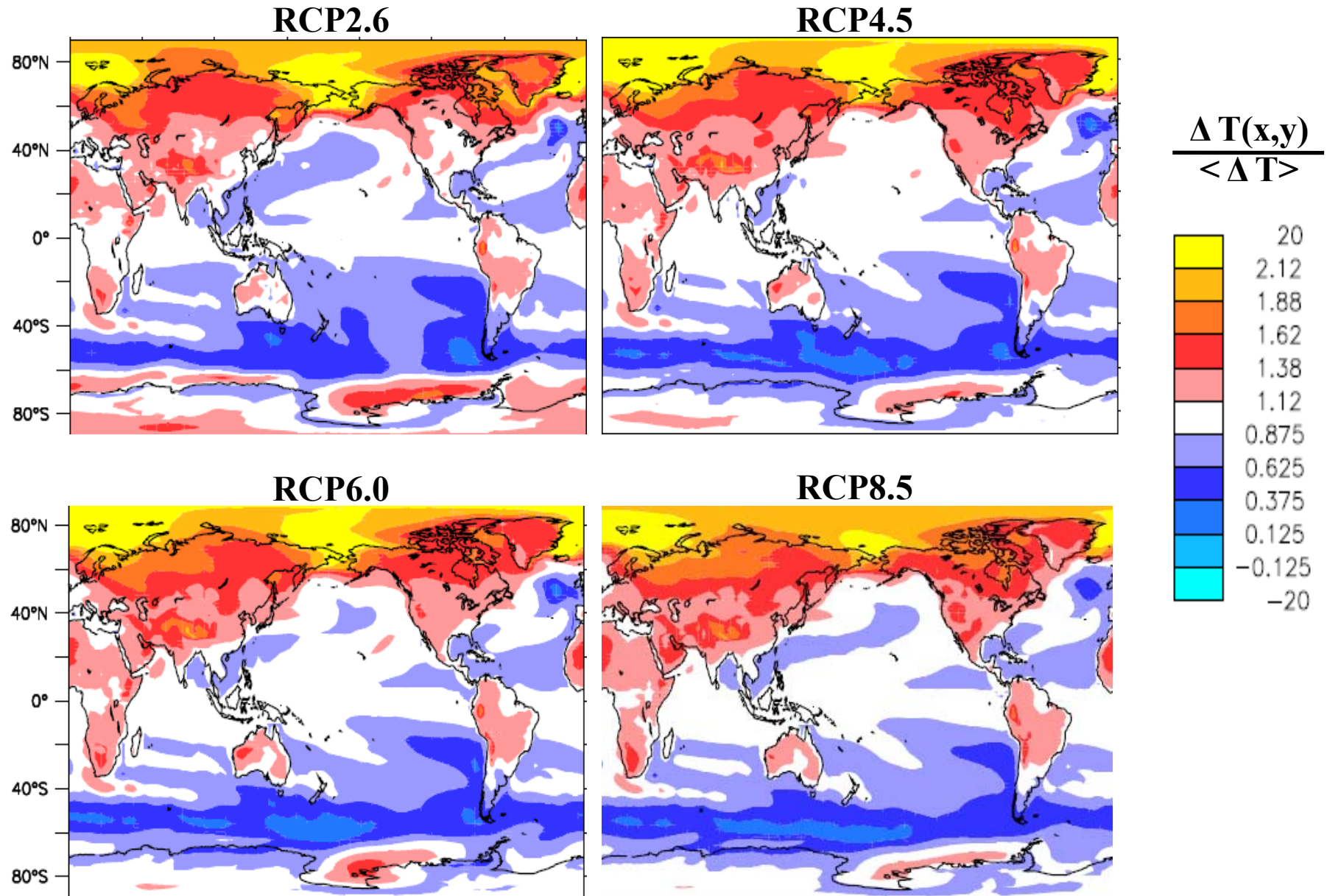


IPSL-CM5B-LR



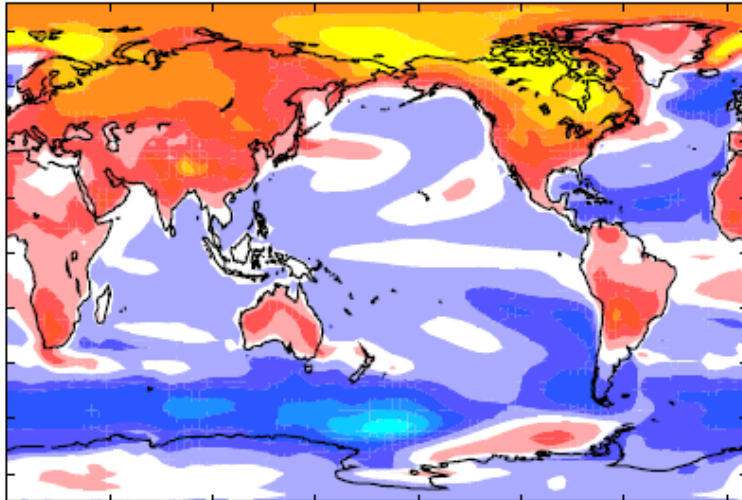
Pattern of normalized air surface temperature in 2100

IPSM-CM5A-LR, different scenarios

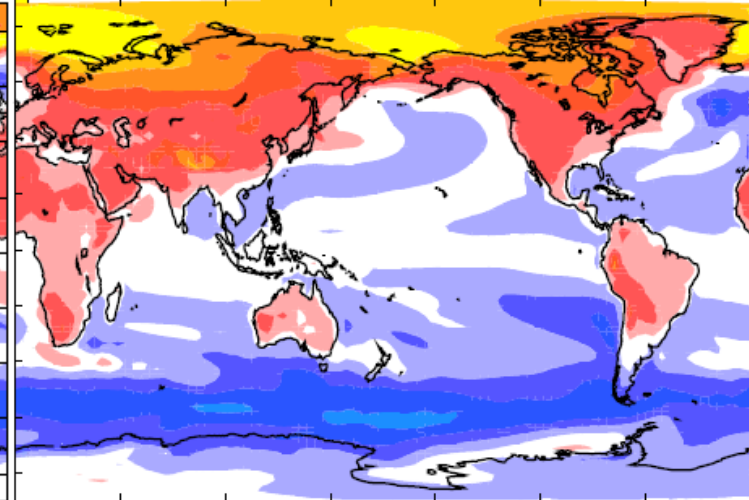


Pattern of normalized air surface temperature in 2100 different IPSL-CM models

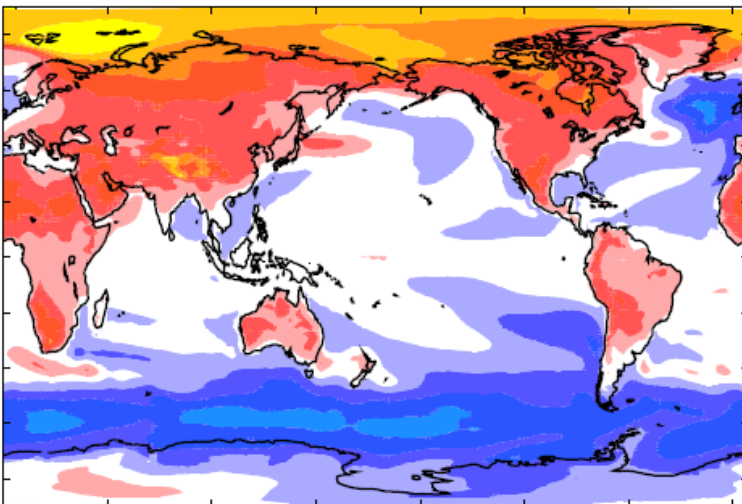
a) Temp, IPSL-CM4



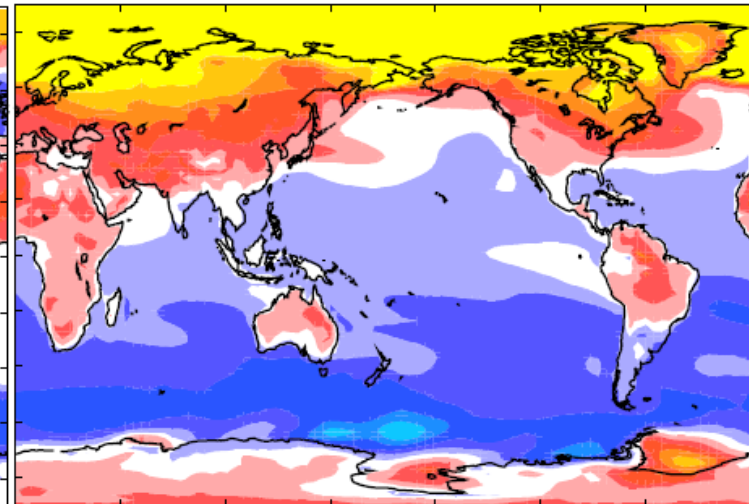
b) IPSL-CM5A-LR, RCP85, 2100



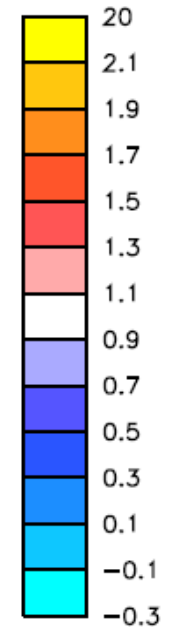
d) IPSL-CM5A-MR, RCP85, 2100



f) IPSL-CM5B-LR, RCP85, 2100



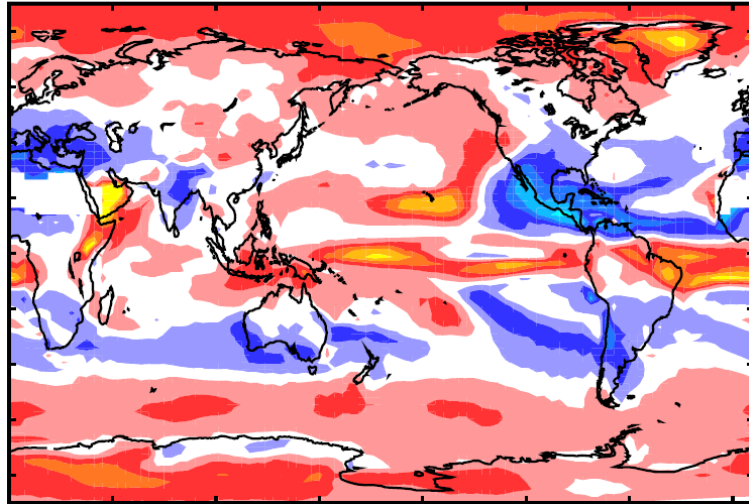
$$\frac{\Delta T(x,y)}{\langle \Delta T \rangle}$$



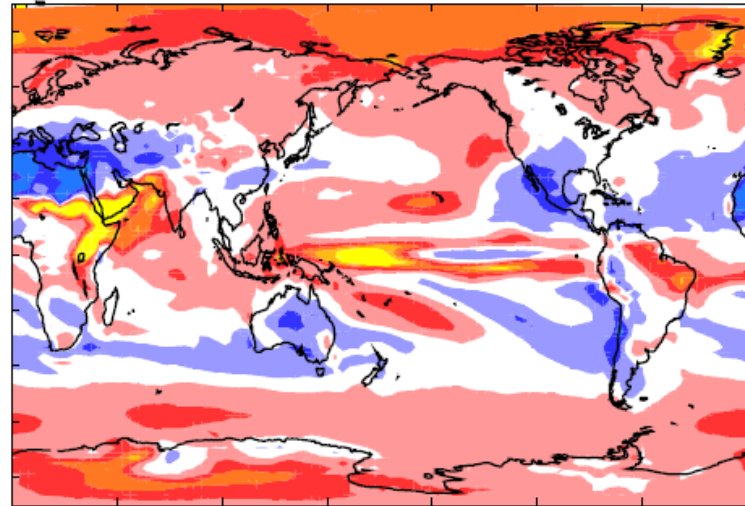
Pattern of normalized relative precipitation changes in 2100

different IPSL-CM models

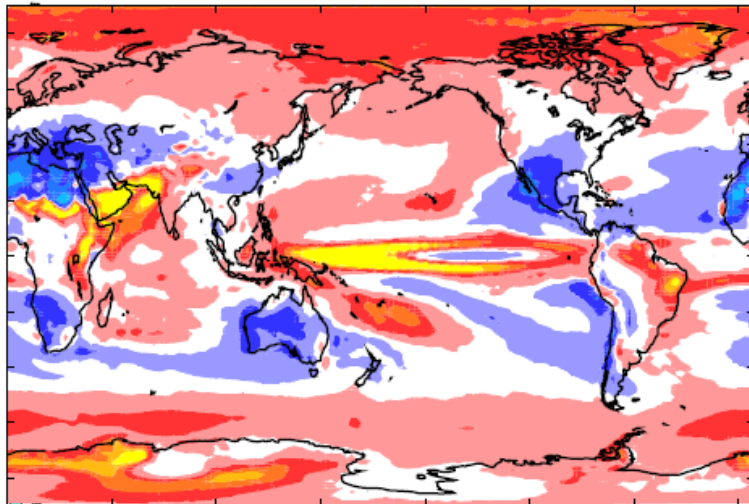
c) Precip, IPSL-CM4



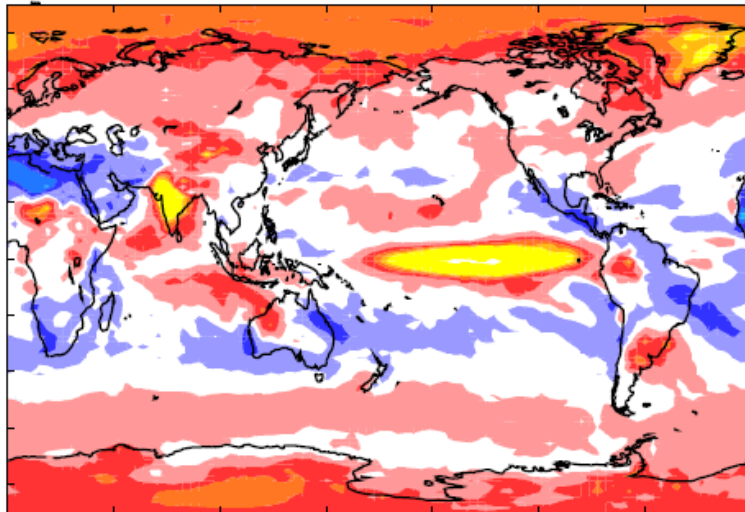
b) IPSL-CM5A-LR, RCP85, 2100



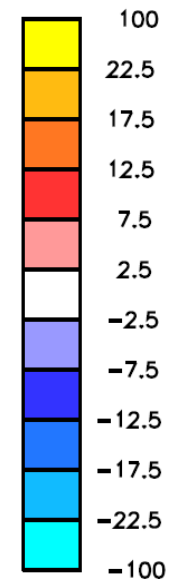
d) IPSL-CM5A-MR, RCP85, 2100



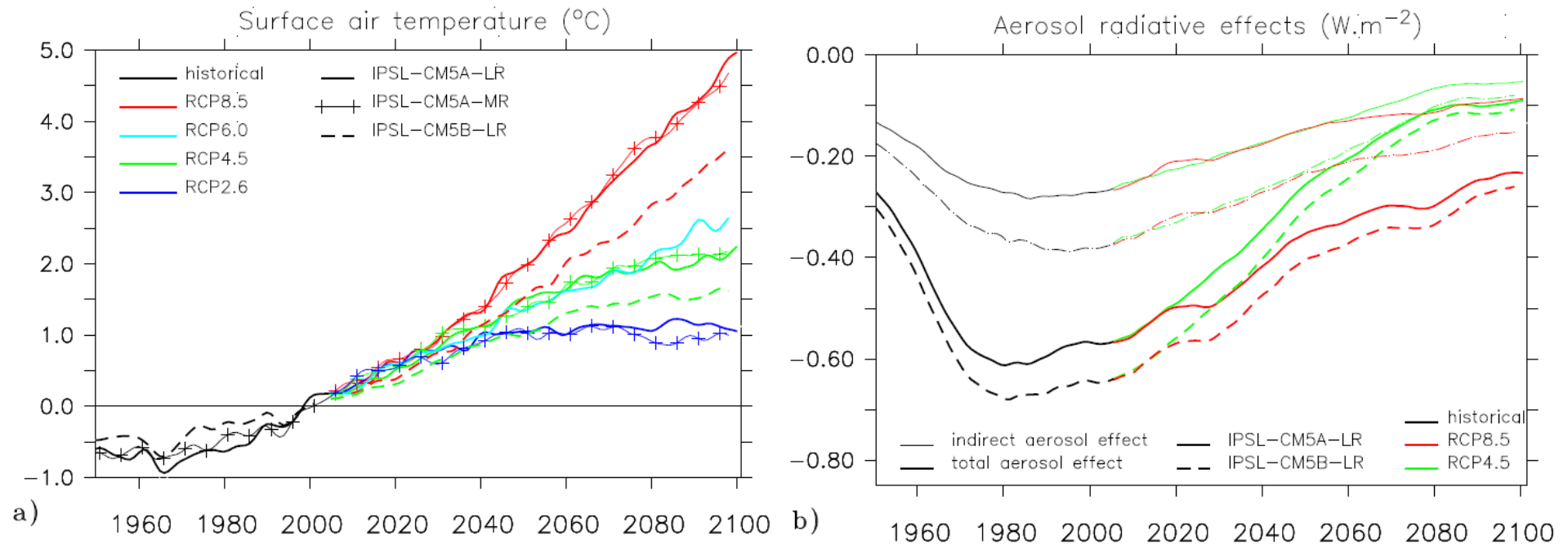
f) IPSL-CM5B-LR, RCP85, 2100



$$\frac{\frac{\Delta P(x,y)}{P(x,y)}}{\langle \Delta T \rangle} \times 100$$

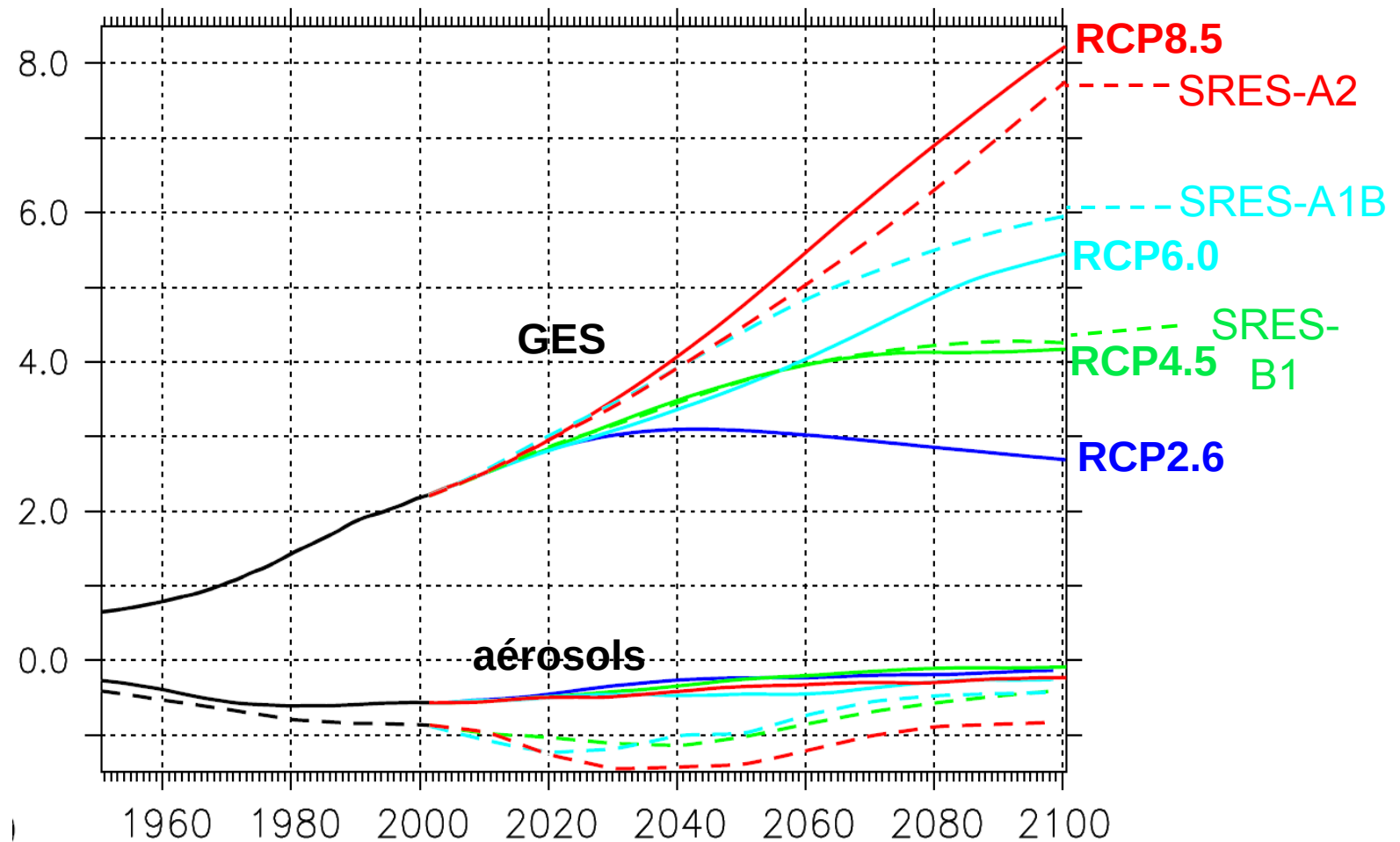


Time evolution of the global mean air surface and aerosols forcings in the historical and RCPs simulations for IPSL-CM5A-LR, CM5A-MR and CM5B-LR



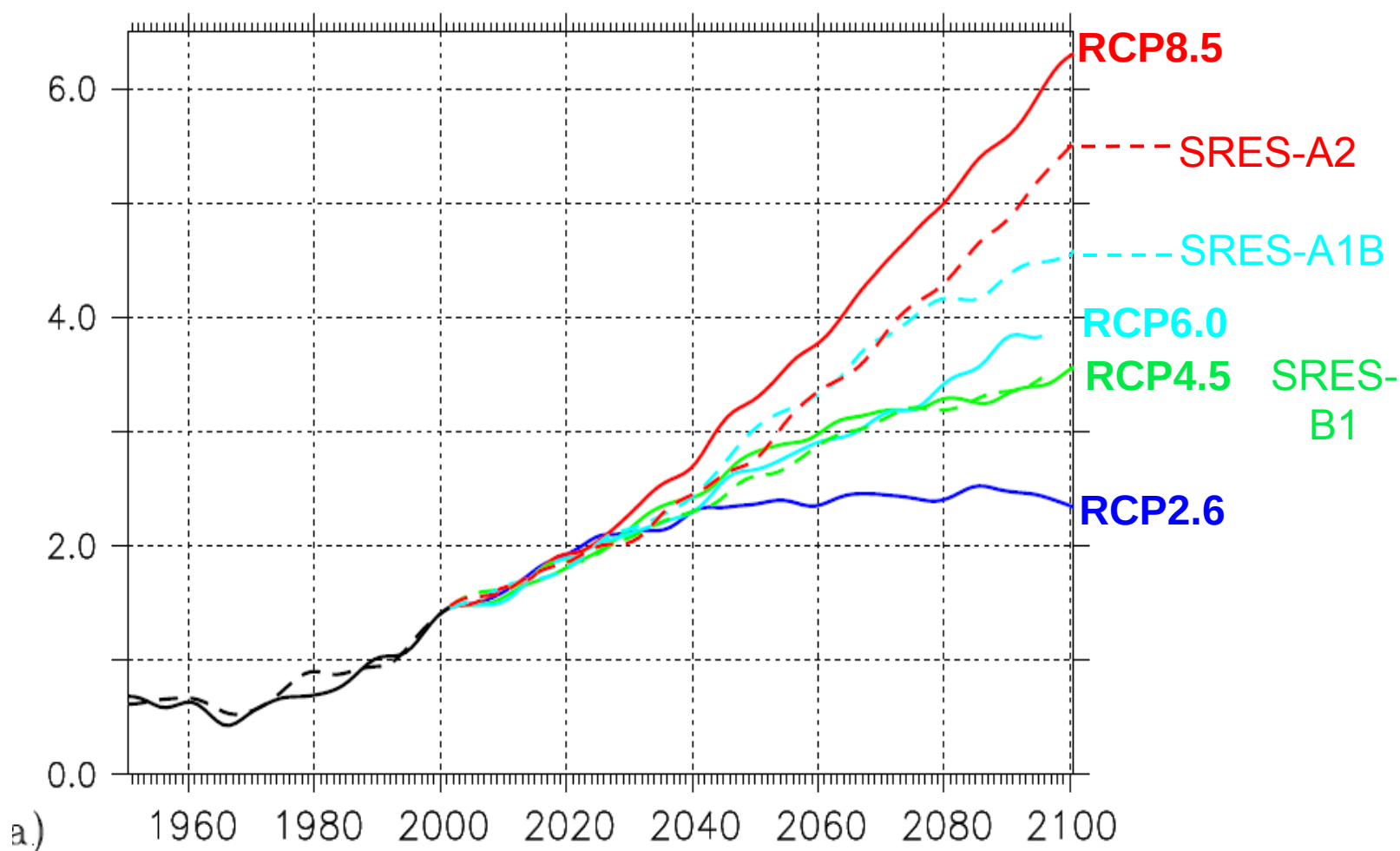
Representative Concentration Pathways (RCP)

Évolution du forçage radiatif des **GES** et des **aérosols** pour les scénarios RCP et SRES



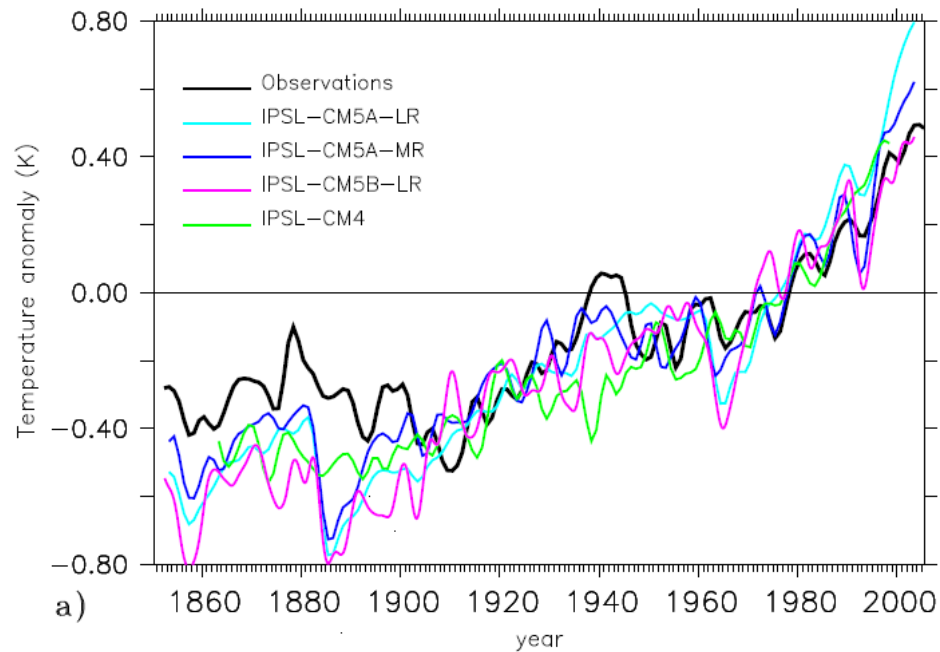
Representative Concentration Pathways (RCP)

Évolution de la moyenne de la température de l'air en surface pour les scénarios RCP et

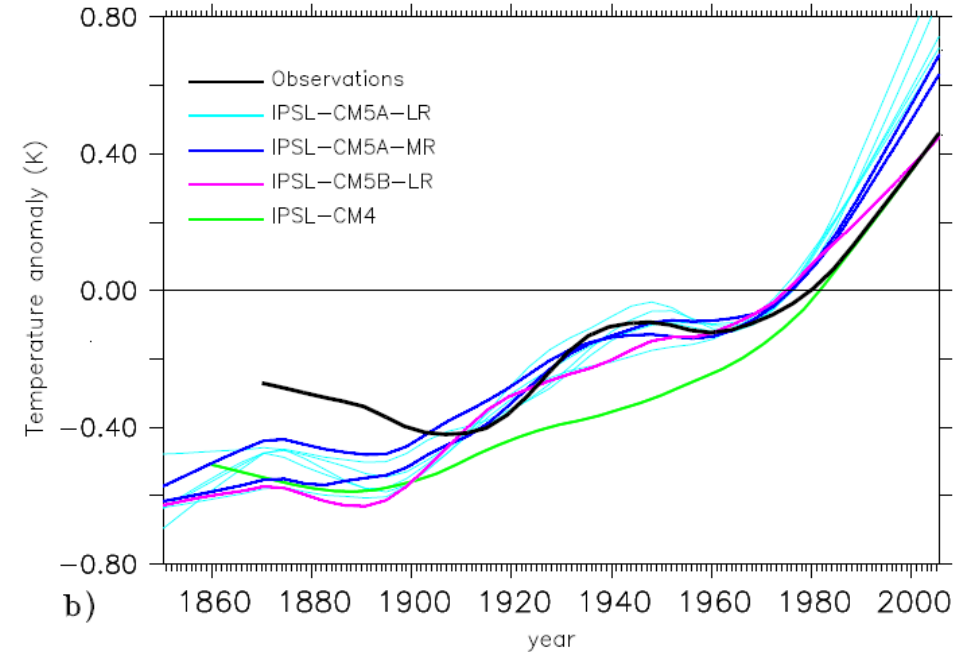


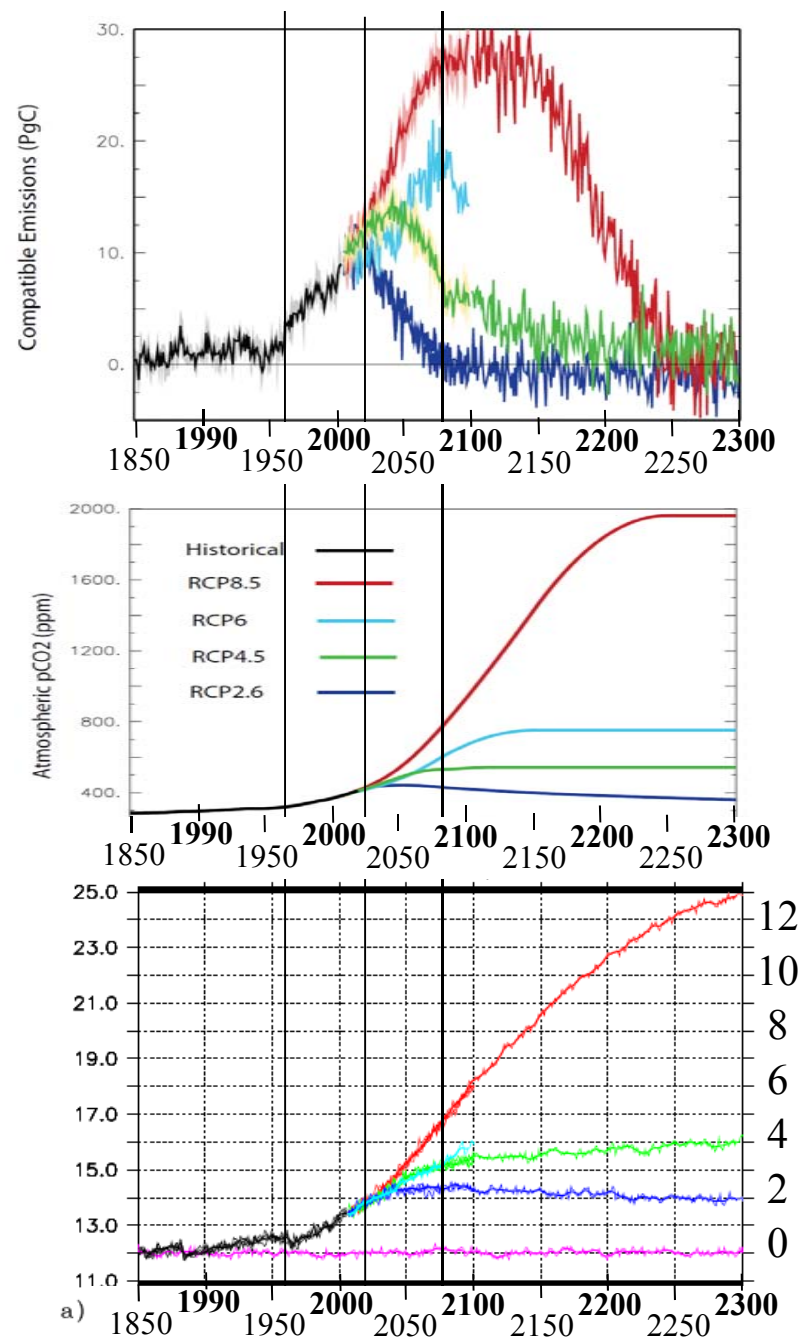
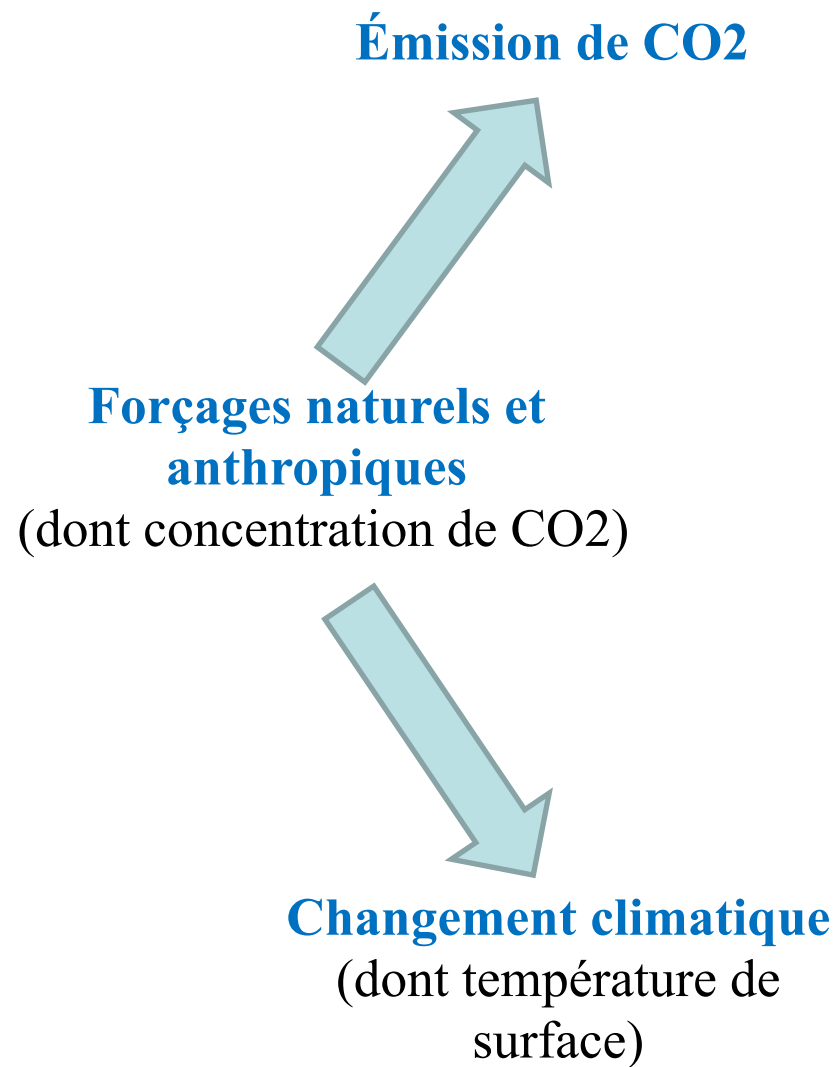
Time evolution of the global mean air surface in the IPSL-CM historical simulations

5 years running mean

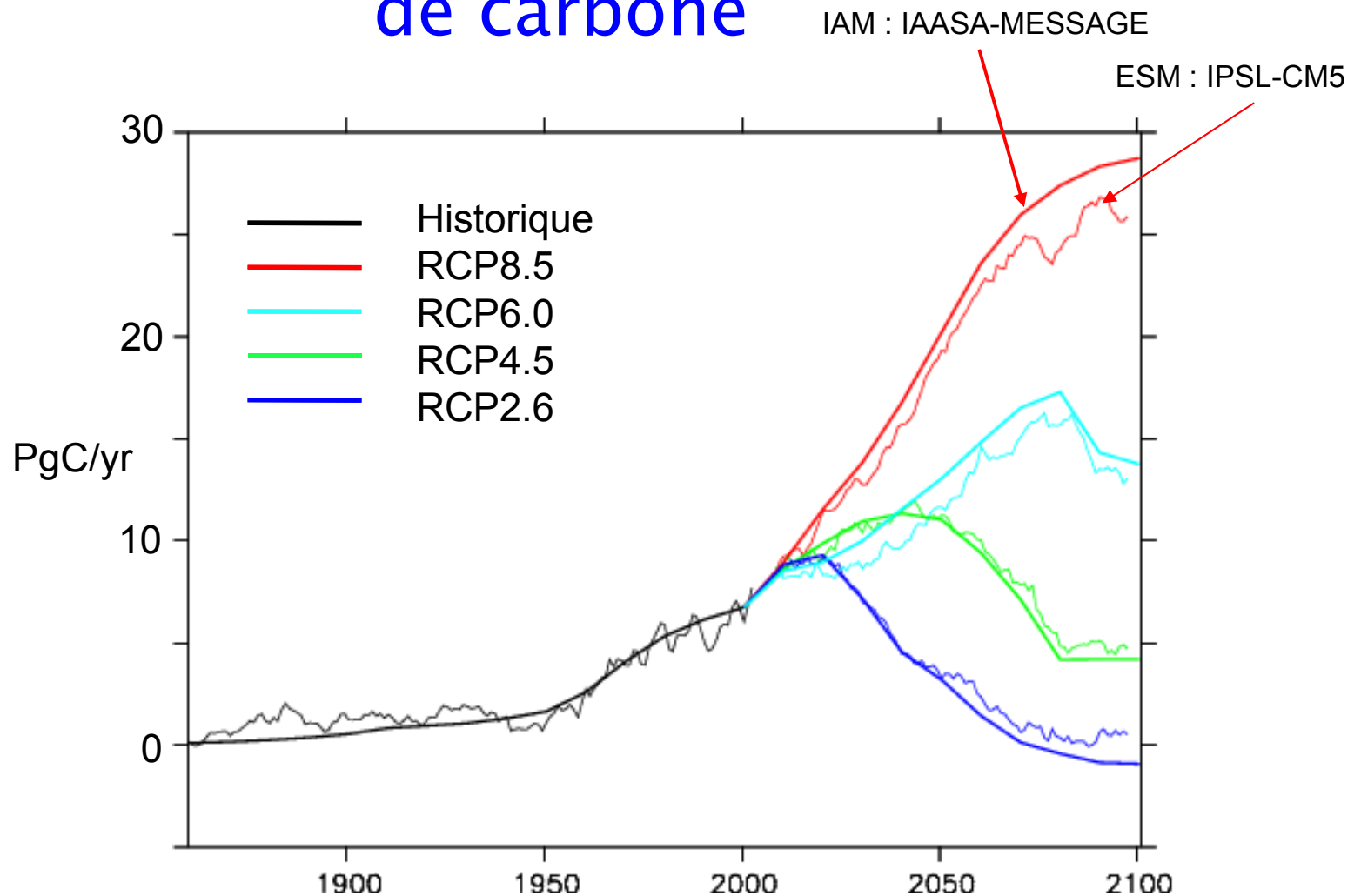


Trends (STL decomposition)





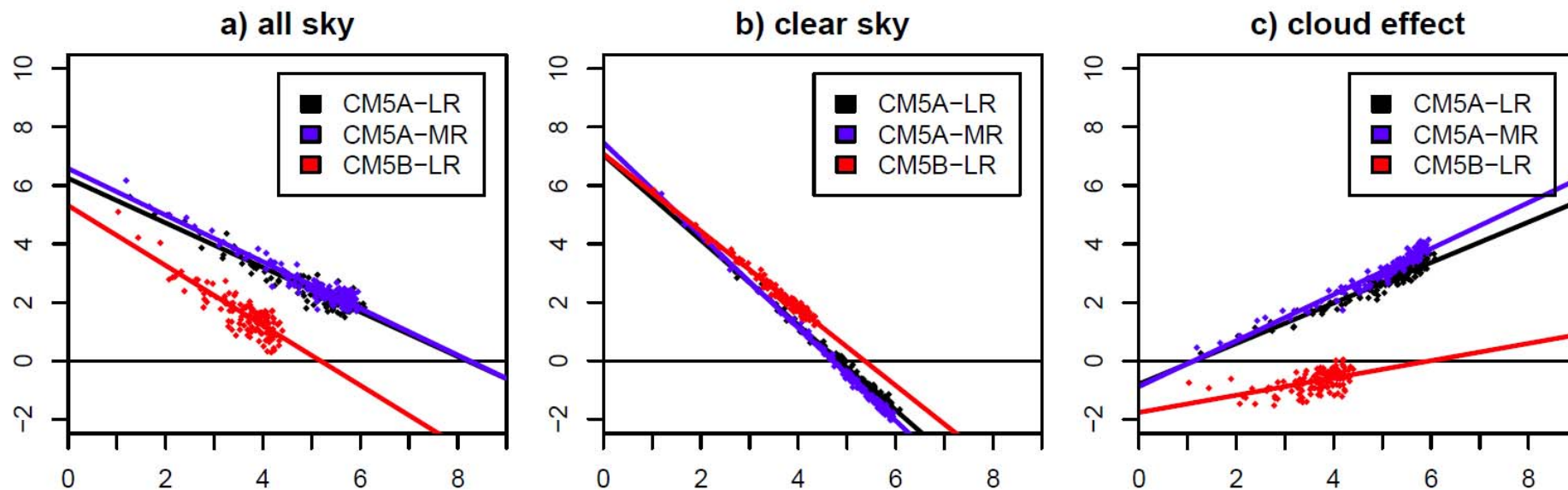
Évolution des « émissions compatibles » de carbone



Emissions calculées par IPSL-CM significativement inférieures
aux émissions des IAMs pour RCP8.5 et RCP6.0

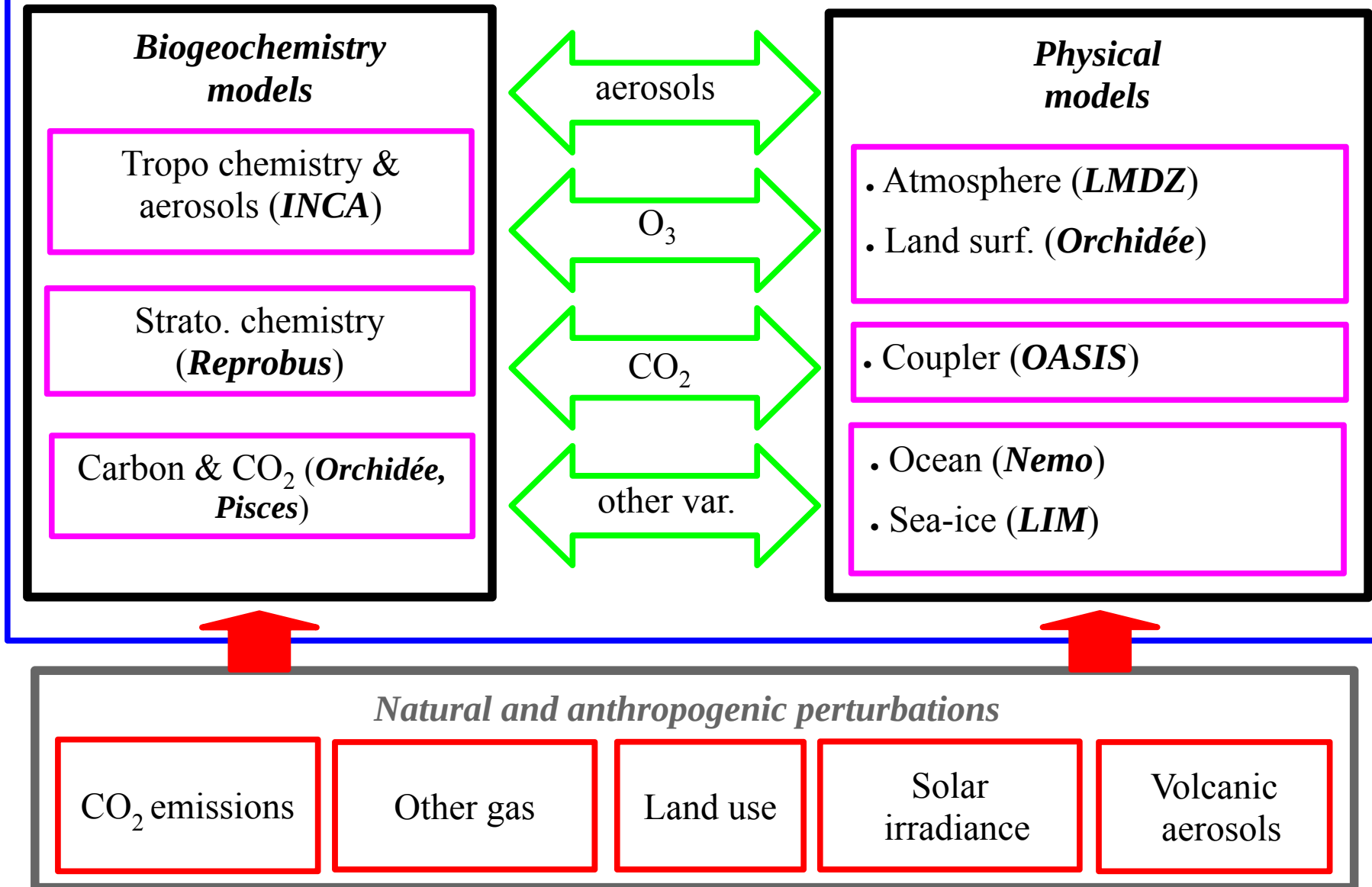
Climate sensitivity for different IPSL-CM models

Flux TOA vs surface temperature for the abrupt 4xCO₂ simulations



model	1%/year CO ₂ increase				abrupt 4xCO ₂		
	$\Delta Q_t(2\text{CO}_2)$	λ	TCR(2CO ₂)	$\Delta T_s^e(2\text{CO}_2)$	$\Delta Q_t(2\text{CO}_2)$	λ	$\Delta T_s^e(2\text{CO}_2)$
	(Wm ⁻²)	(Wm ⁻² K ⁻¹)	(K)	(K)	(Wm ⁻²)	(Wm ⁻² K ⁻¹)	(K)
IPSL-CM4	3.5	-0.92	2.13	3.79			
IPSL-CM5A-LR	3.5	-0.98	2.09	3.59	3.12	-0.76	4.10
IPSL-CM5A-MR	3.5	-1.01	2.05	3.47	3.29	-0.80	4.12
IPSL-CM5B-LR	3.5	-1.68	1.52	2.09	2.66	-1.03	2.59

IPSL-CM5 Earth System Model platform



CMIP5 variables counts

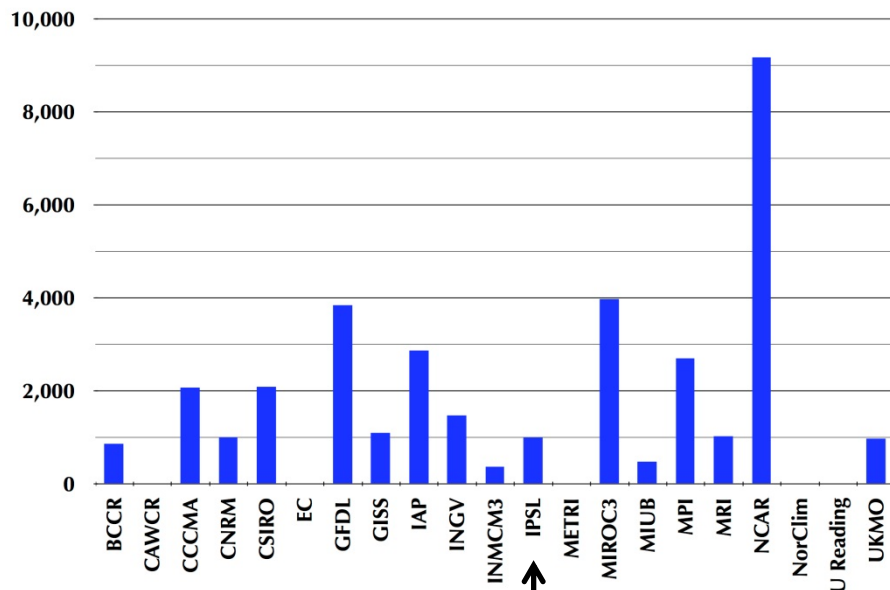
	1 hour	3 hour	6 hour	daily	month	annual	totals
aerosol	0	0	0	0	81	0	81
atmosphere	75	101	9	86	184	0	455
land	0	3	0	2	59	0	64
land ice	0	0	0	2	13	0	15
ocean	0	1	0	3	116	0	120
biogeochemistry	0	0	0	0	88	71	159
sea ice	0	0	0	4	47	0	51
totals	75	105	9	97	588	71	945

Analyse et distribution des données

- Plus de variables, fréquence plus élevée
- Plus de type d'expériences
- Simulations d'ensemble
- IPSL- Trois versions de modèle

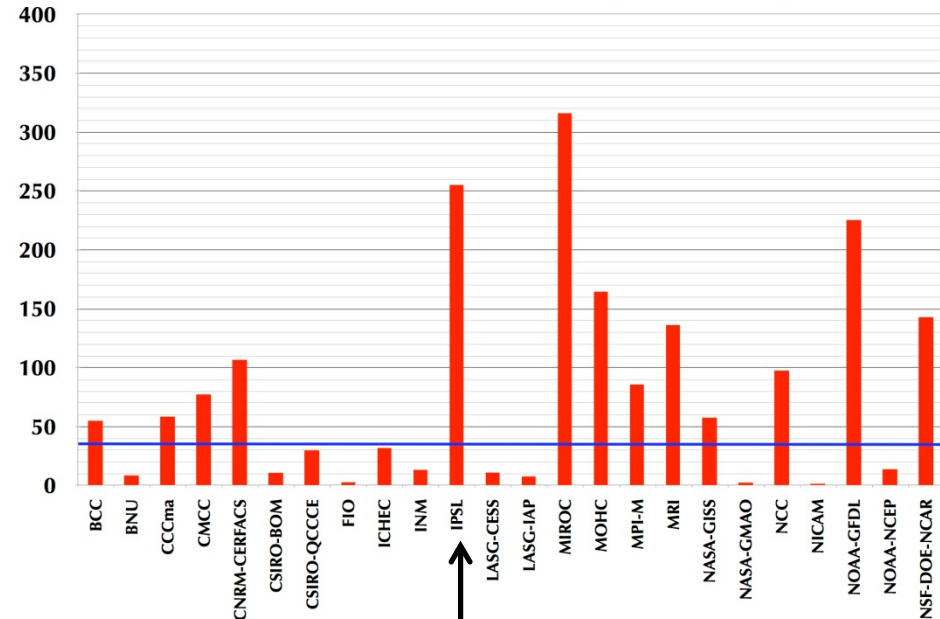
en moyenne: x30 de CMIP3 à CMIP5

CMIP3 data volumes by group (GB)



Friday, October 26, 2012

CMIP5 data volumes by group (TB)



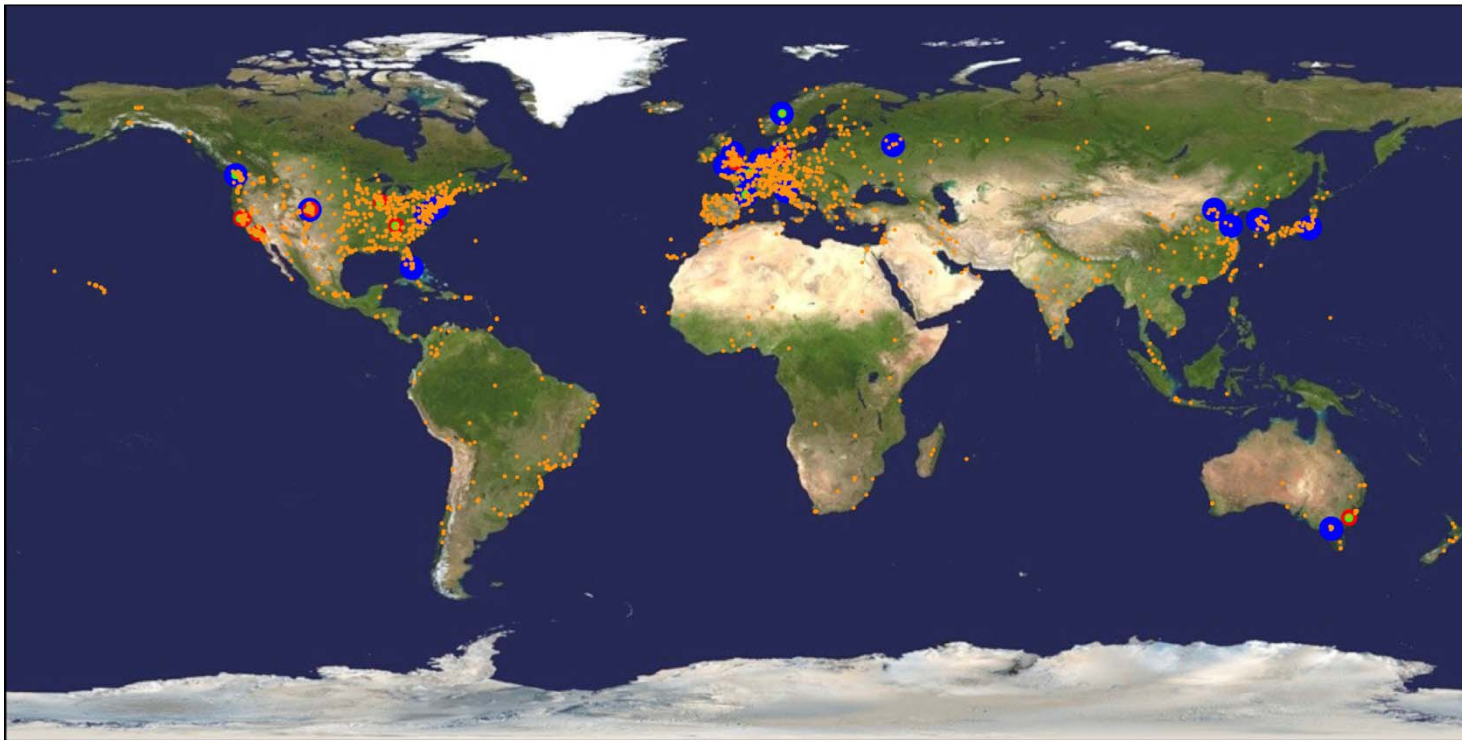
Friday, October 26, 2012

IPSL
x250

CMIP5 distribution: Earth System Grid (ESG)

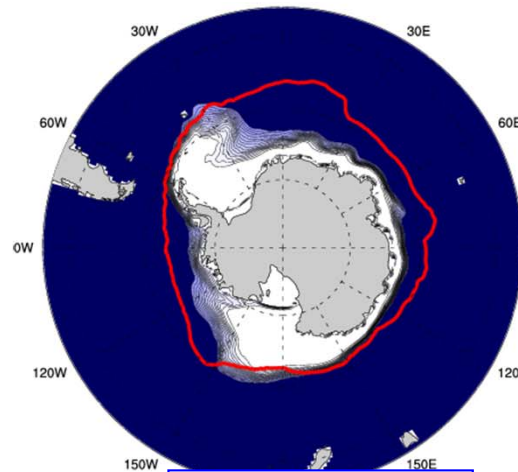
CMIP3: distribution des données via 1 serveur (PCMDI)

CMIP5: distribution répartie des données

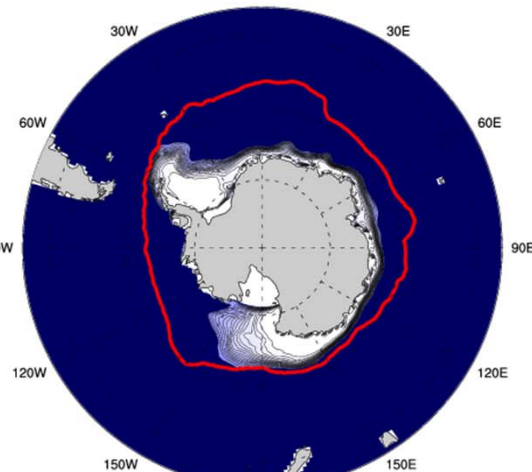


Couverture de glace de mer Antarctique 2080-2099

CNRM -
CERFACS

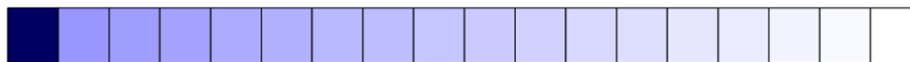
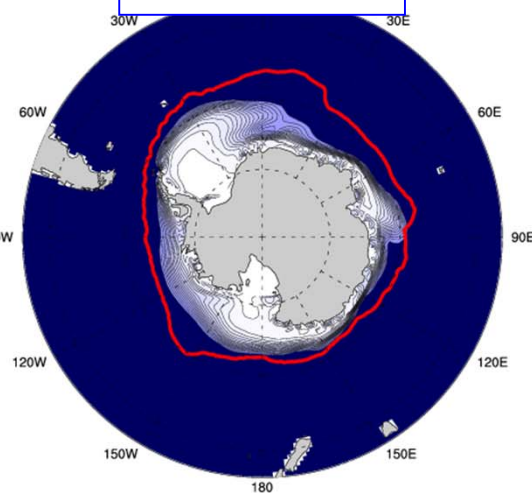
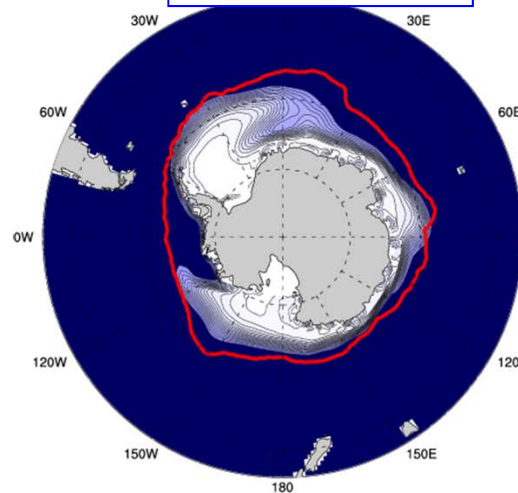


RCP2.6



RCP8.5

IPSL



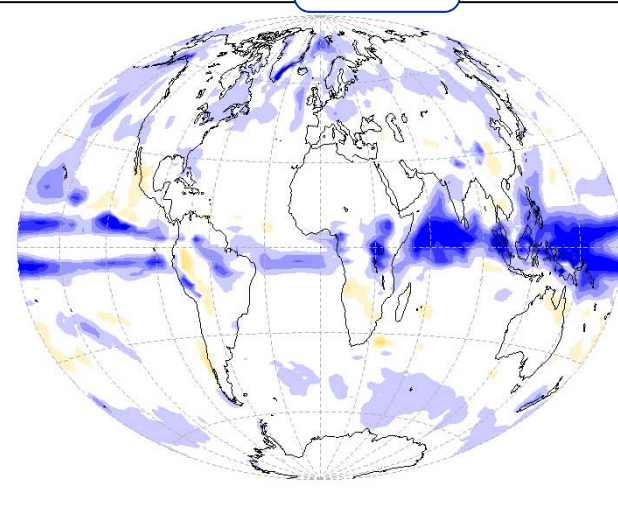
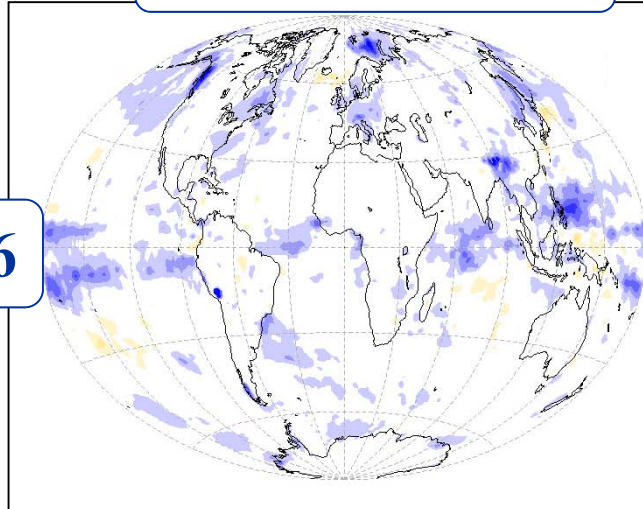
15 30 50 70 90 %

Changement de précipitations dans 100 ans: 2 scénarios extrêmes

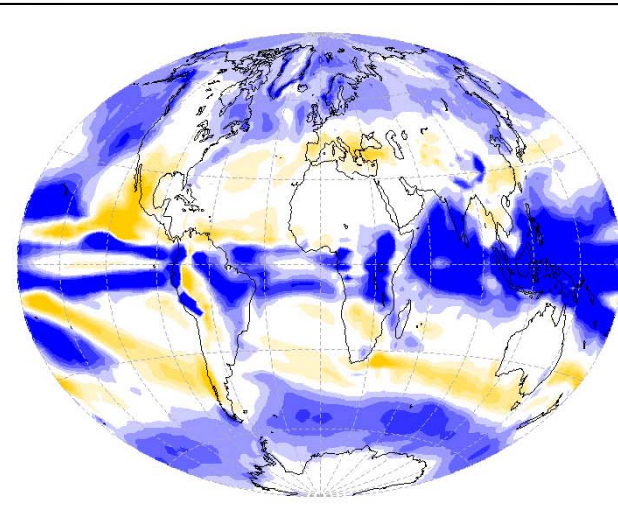
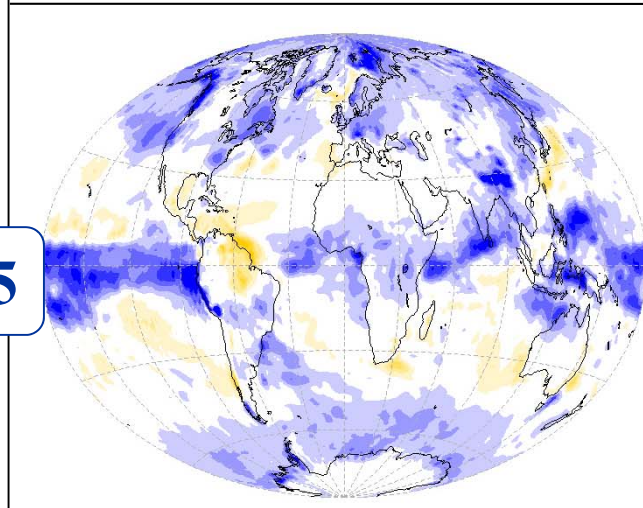
CNRM-CERFACS

IPSL

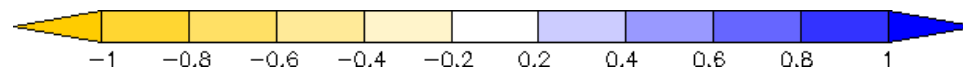
RCP2.6



RCP8.5



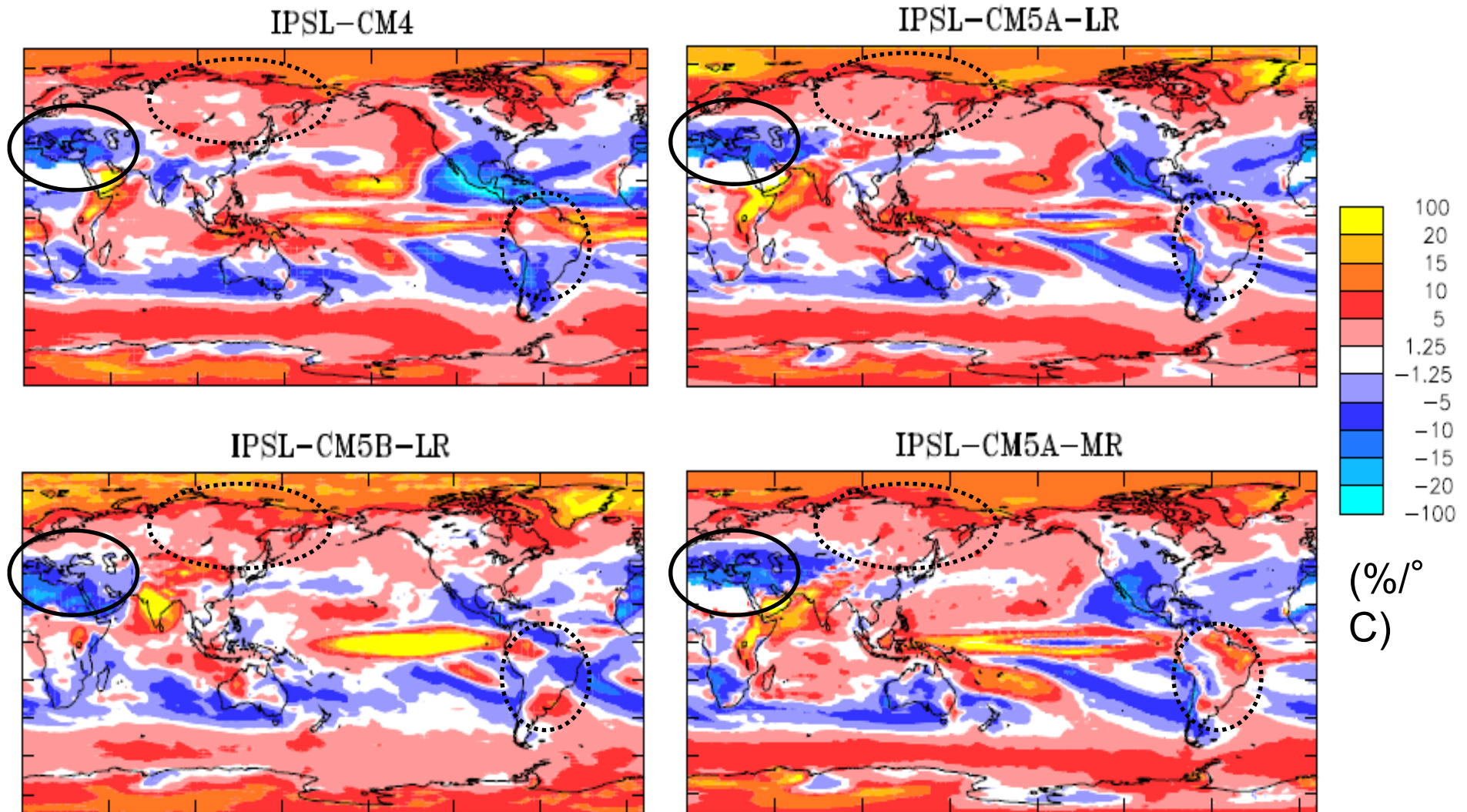
Entre
1961-1990
et 2071-2100



(mm/jour)

Changement normalisé de précipitations

$DP(x,y)/P(x,y)/\langle DT \rangle$, IPSL-CM5A-LR



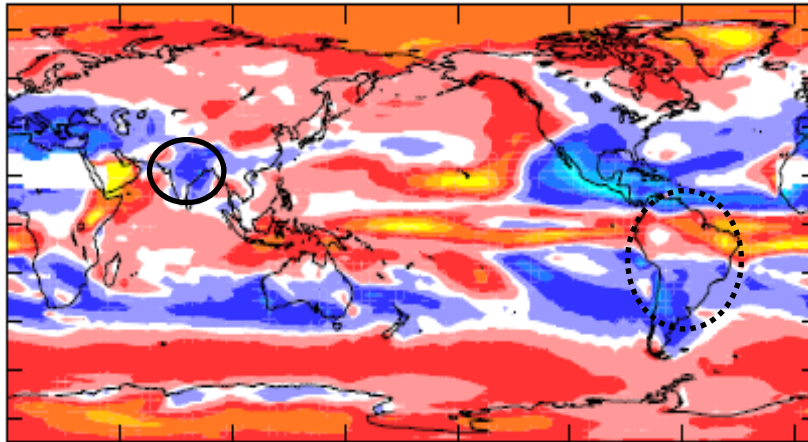
19/04/12

Forte dépendance à la représentation des phénomènes

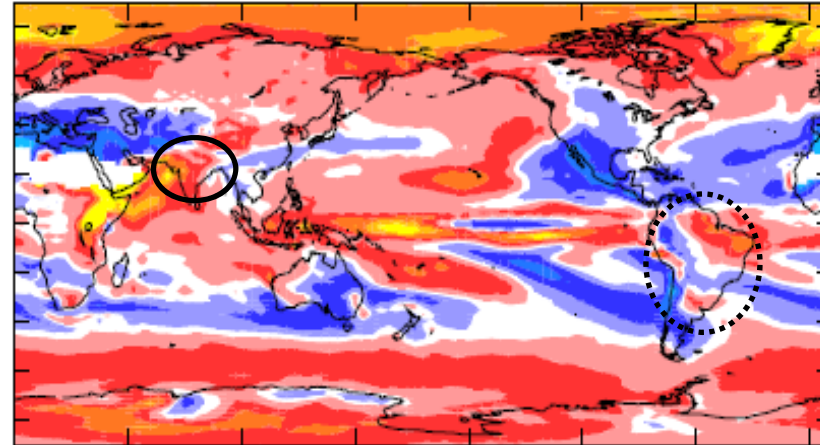
Changement normalisé de précipitations

$$\frac{DP(x,y)}{P(x,y)} / \langle DT \rangle, \text{ IPSL-CM5A-LR}$$

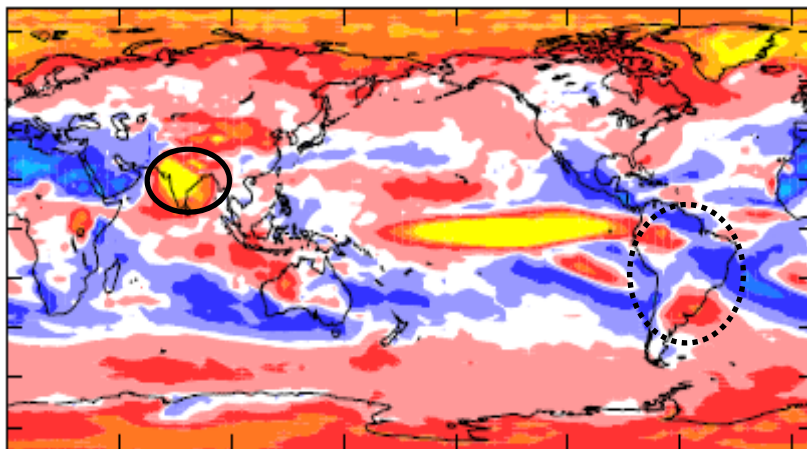
IPSL-CM4



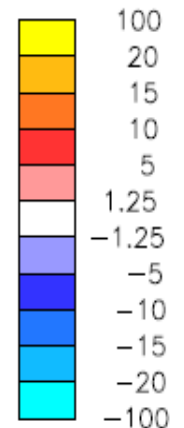
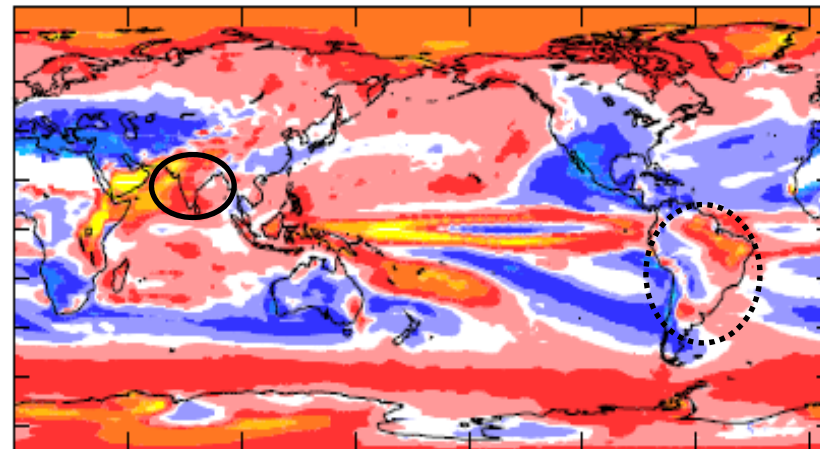
IPSL-CM5A-LR



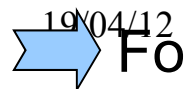
IPSL-CM5B-LR



IPSL-CM5A-MR



(%/°C)



Forte dépendance à la représentation des phénomènes physiques