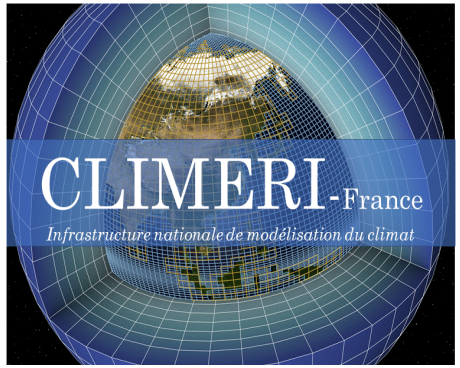
Changement climatique : des simulations numériques pour comprendre et anticiper les effets du réchauffement climatique

Pascale Braconnot
LSCE-IPSL
20 janvier 2020

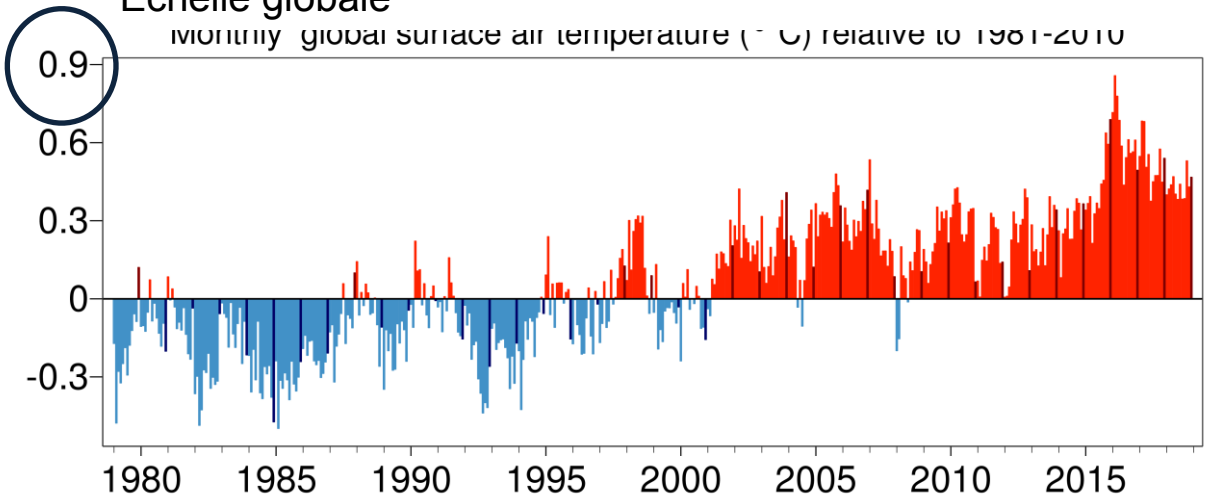


A partir du matériel préparé pour la conférence de presse du 17 septembre 2019

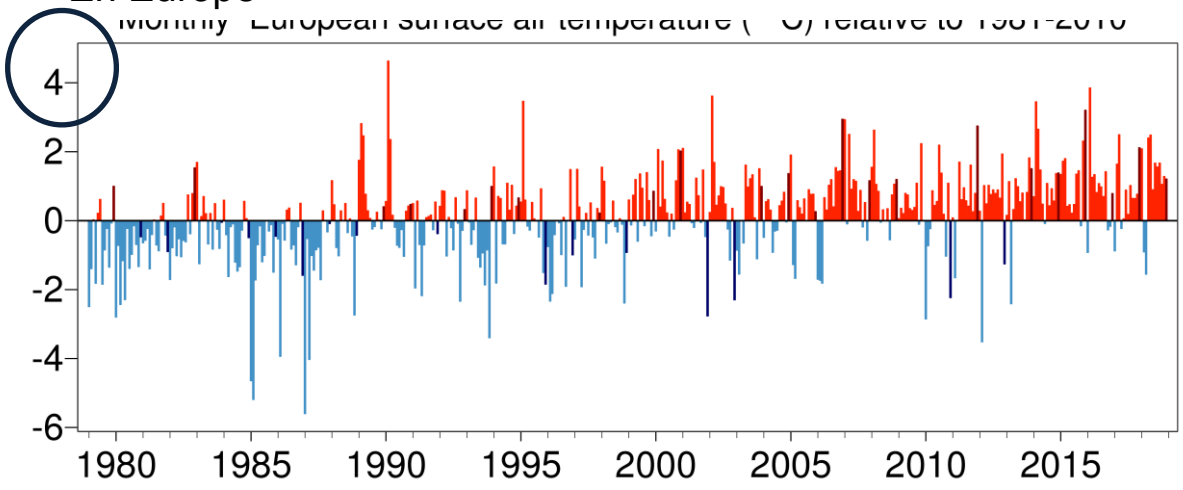
Températures mensuelles (°C) par rapport à 1981-2010

Des faits : nombreuses observations

Echelle globale



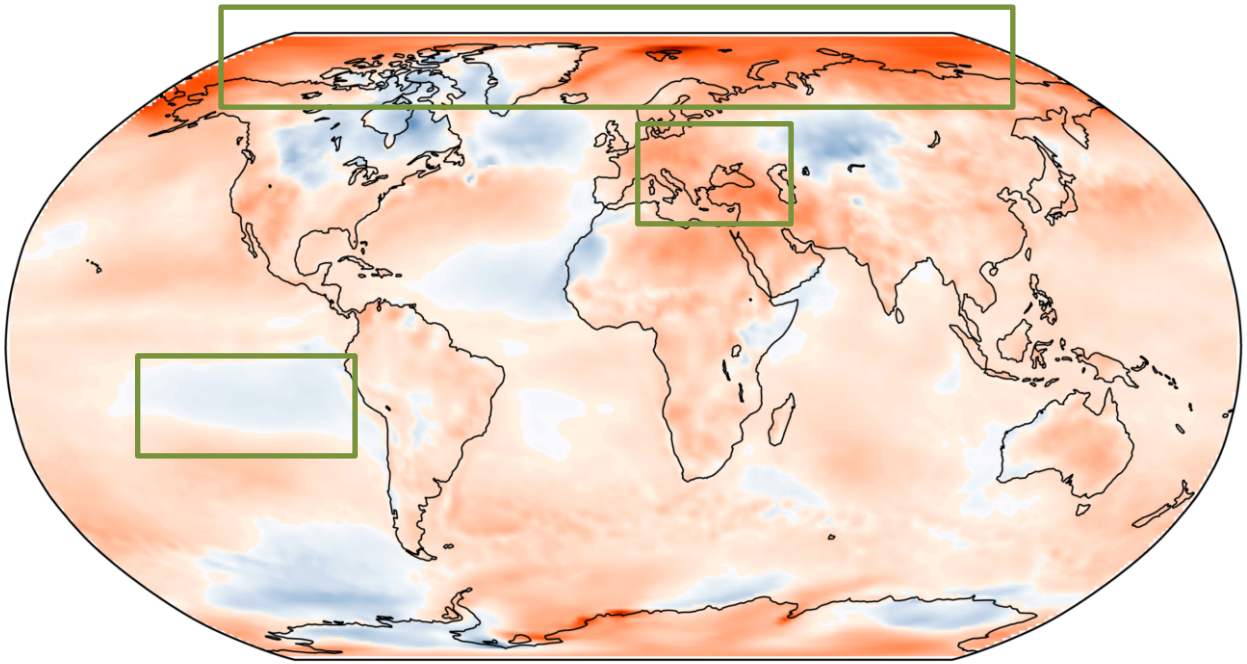
En Europe

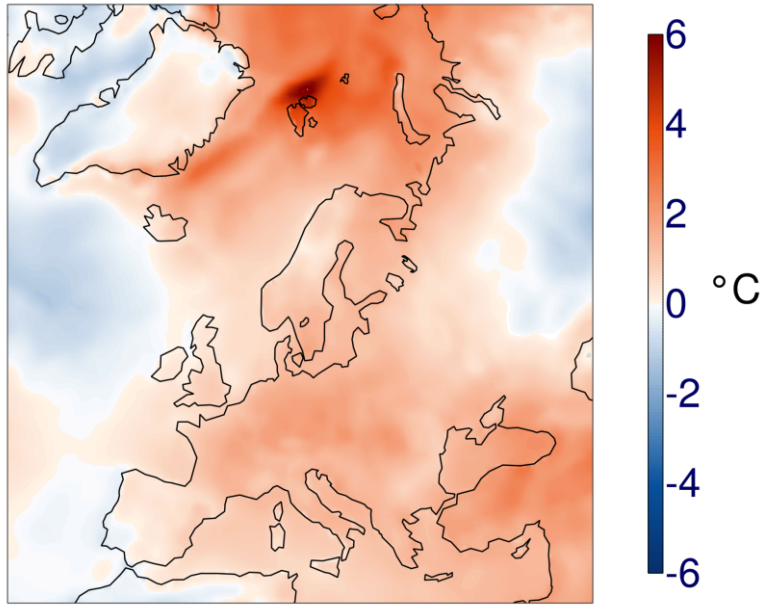


- 2018 : parmi les années les plus chaudes depuis 1980
- Le réchauffement en Europe est supérieur à la moyenne globale
- Des modifications importantes aussi pour d'autres variables : précipitation, neige, banquise, contenu thermique de l'océan ….

Des variations régionales

Anomalie de température de l'air pour 2018 par rapport à la moyenne 1981-2010





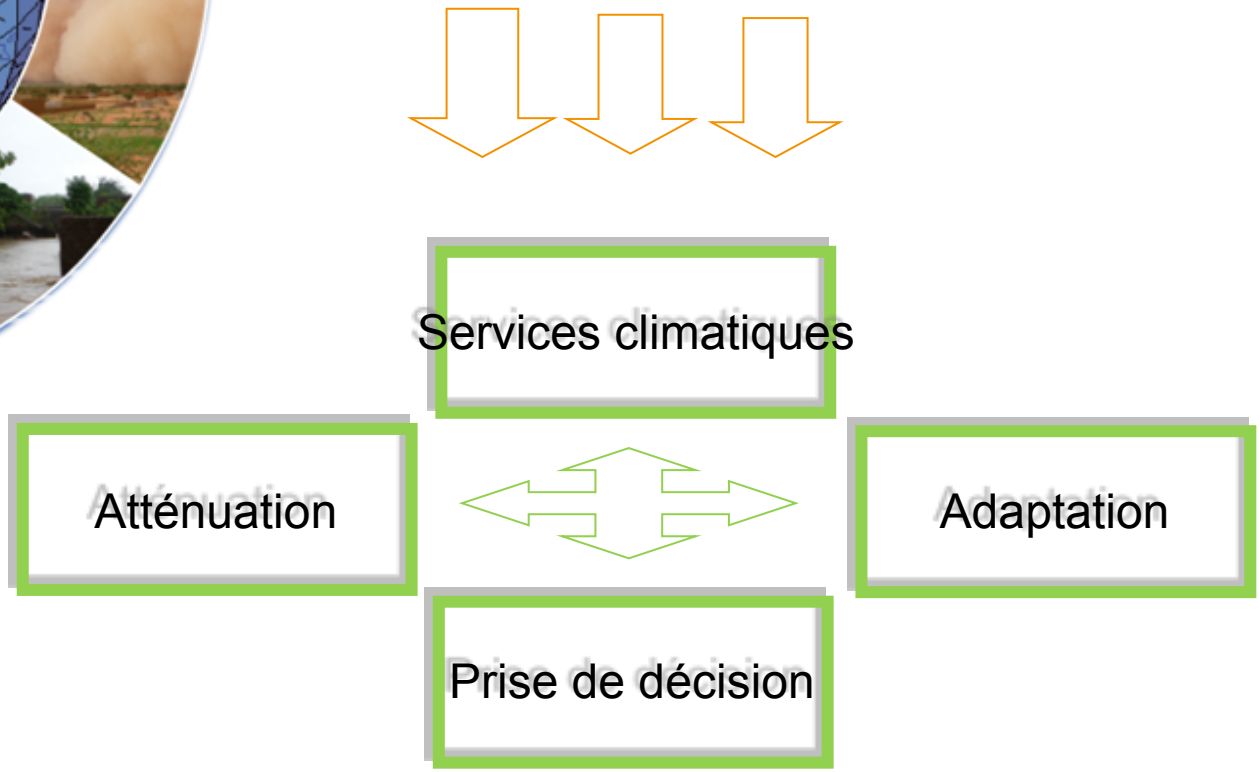
European Commission
Copernicus Europe's eyes on Earth
Climate Change Service climate.copernicus.eu
IMPLEMENTED BY ECMWF

Le climat et la société

@GIS climat environnement société

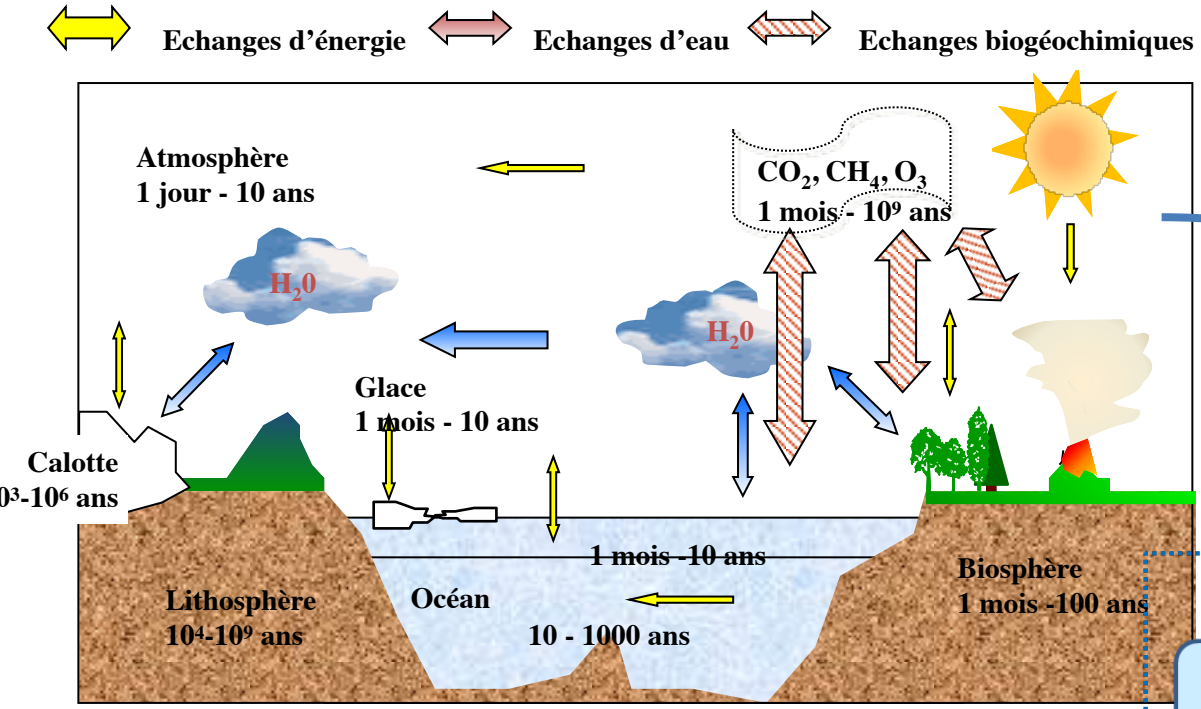
Les sciences du climat pour:

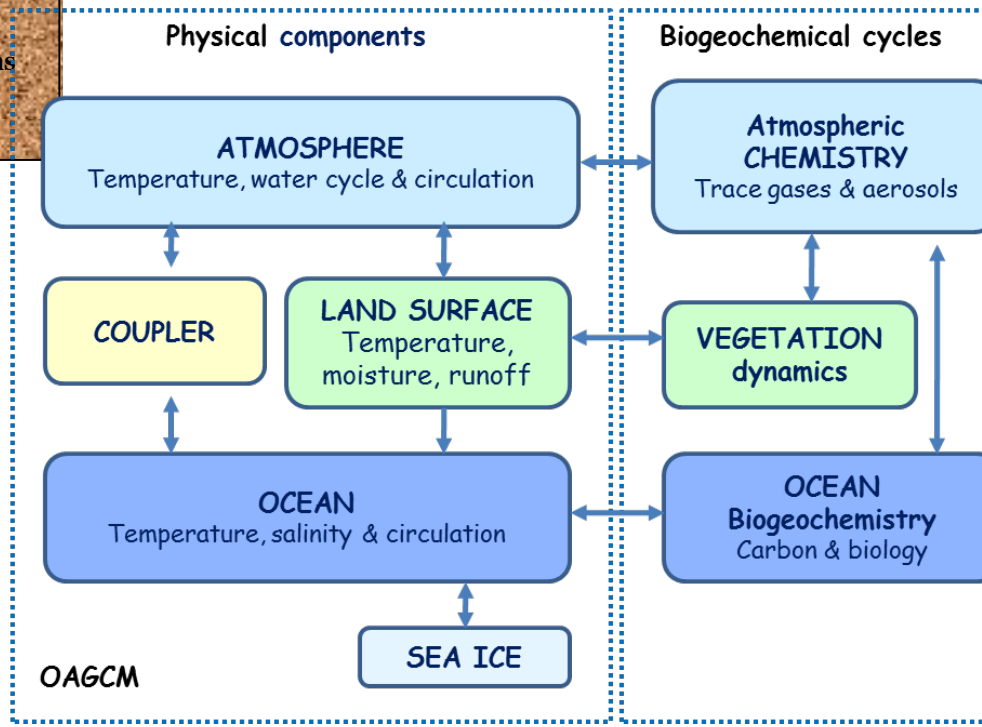
- Comprendre
- Tester comment des choix socio-économiques peuvent modifier le climat
- Caractériser les événements météorologiques (vagues de chaleur, sécheresses, inondations, tempêtes,…)
- Informer



Modèles du système Terre

Le système à représenter

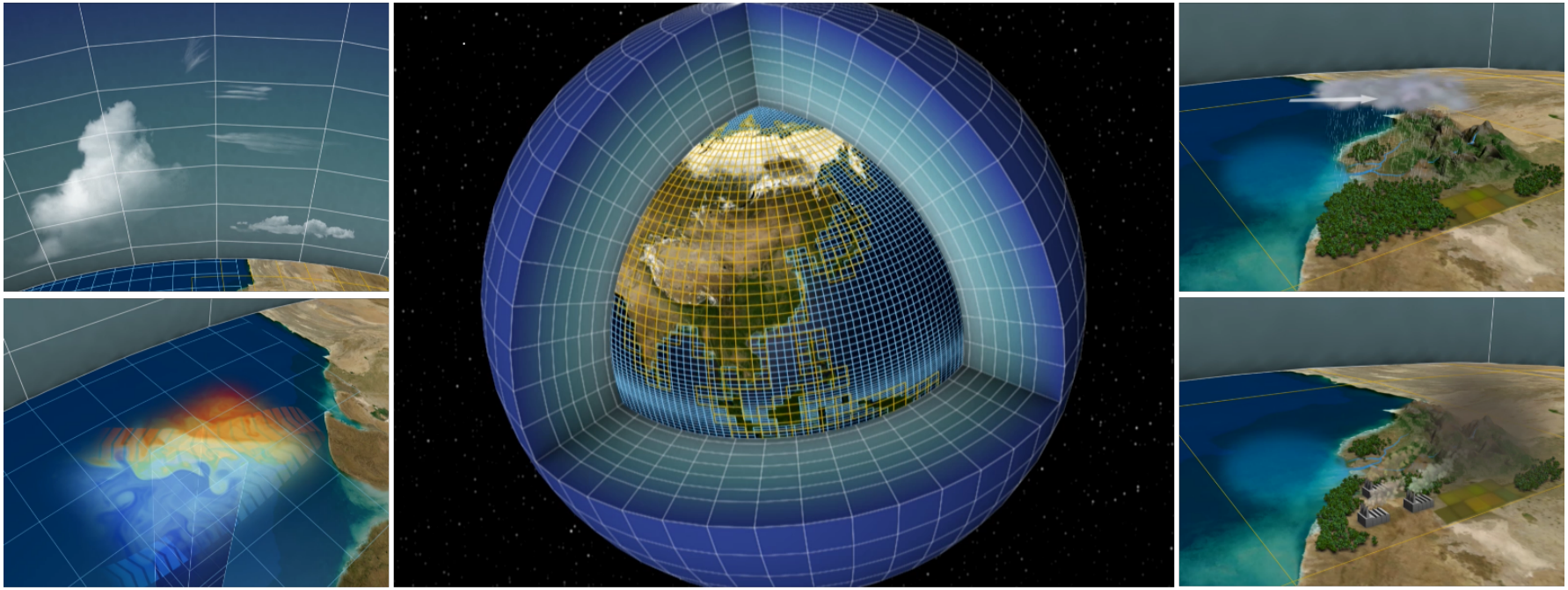




- Imbrication d'échelles spatio-temporelles : de la météorologie au millénaire (et au-delà)
- Fortes interactions entre le climat et les cycles biogeochimiques
- De nombreux facteurs externes d'origine na naturelle ou anthropique à considerer

Climate or Earth System models

(General circulation model GCM)



From a film presenting climate modeling Copyright CEA

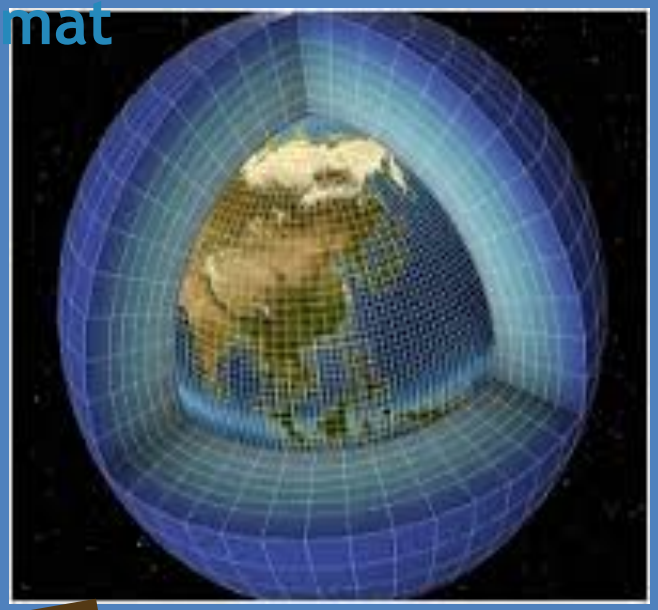
- ➢A 3D representation of the atmosphere, ocean, sea-ice, land surface and of their coupling through momentum, heat and water fluxes.
- ➢A representation of the coupling with the biochemical cycles in the atmosphere ocean and land. (ex carbon cycle)

Depuis 80 ans, nos connaissances bâtissent de nouveaux mondes

Expériences numériques: les simulations

Conditions initiales :
Température
Humidité
(salinité)
Courants

Modèle numérique du climat



Résultats:
Température, humidité (salinité), courants au cours du temps + diagnostics

Conditions aux limites :
Ex : rayonnement solaire incident
Gaz à effet de serre

- Simulations de référence
- Simulations perturbées
- Comparaison entre les deux pour comprendre ou étudier le climat et ses changements

IPCC AR5 Rapport du group 1.

- Largely based on Coupled Model Intercomparison Phase 5 (CMIP5) simulations -

Relative to the 1986-2005 average

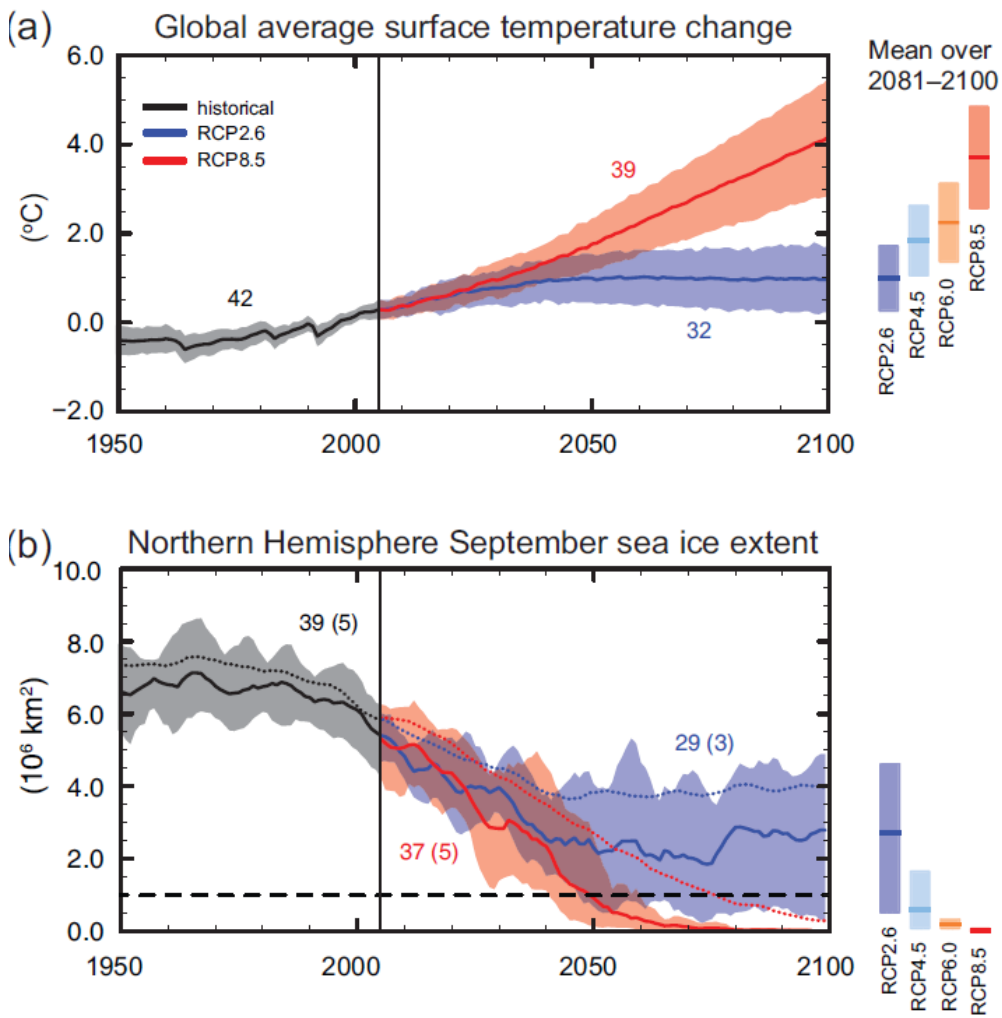


Figure SPM.7

Paleoclimate Archives (Chapter 5)

Process Understanding

- Chapter 6: Carbon and other Biogeochemical Cycles
- Chapter 7: Clouds and Aerosols

From Forcing to Attribution of Climate Change

- Chapter 8: Anthropogenic& Natural Radiative Forcing
- Chapter 9: Evaluation of Climate Models
- Chapter 10: Detection and Attribution of Climate Change: from Global to Regional

Future Climate Change and Predictability

- Chapter 11: Near-term Climate Change
- Chapter 12: Long-term Climate Change: Projections, Commitments and Reversibility

Integration

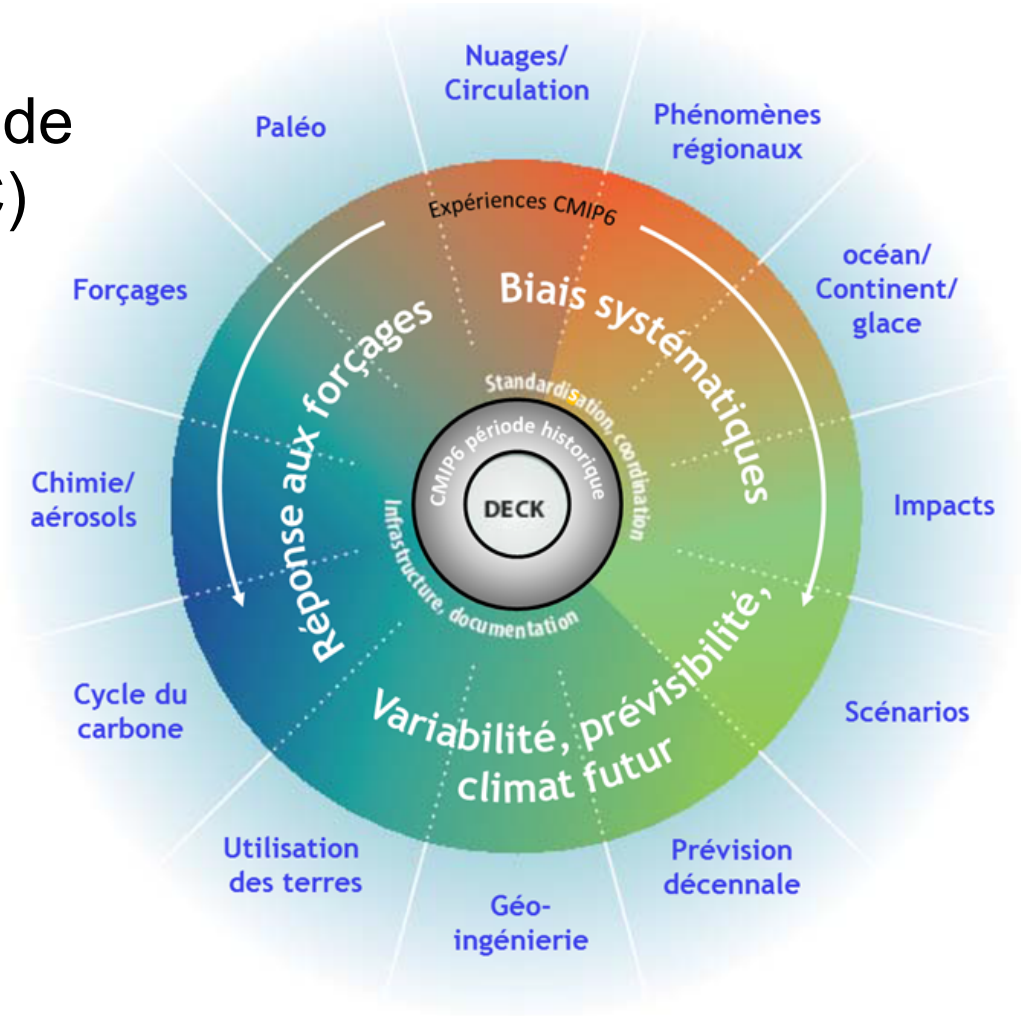
- Chapter 13: Sea Level Change
- Chapter 14: Climate Phenomena and their Relevance for Future Regional Climate Change

Atlas of Global and Regional Climate Projections

Process understanding and projections including uncertainty estimates relevant for WG II and III

L'organisation CMIP6

- Projet du Programme mondial de recherche sur le climat (PMRC)
- Mobilisation d'une expertise scientifique très complète : 21 projets thématiques
- Trois questions scientifiques majeures
- Participation de plus de 20 centres de modélisation du climat dans le monde



Adapté de Eyring et al. (2016)

Nouveautés CMIP6/CMIP5

- La mobilisation d'une expertise scientifique plus complète
- Une meilleure articulation entre les études aux échelles globales et régionales et passé/présent/futur.
- Un gamme de scénario similaire, mais affinant les trajectoires médianes ou permettant d'explorer les contraintes permettant de limiter le réchauffement à 2°C.
- Une nouvelle génération de modèles : très haute résolution, couplages climat-cycles biogéochimiques plus complets ….
- Une infrastructure assurant la traçabilité et l'interfaçage de contraintes de recherche et d'accès par des utilisateurs variés

Implication des équipes françaises dans CMIP6

Acronyme	Thématique	CNRM-CERFACS		IPSL	
AerChemMIP	Aerosols et Chimie atmosphérique				
C4MIP	Cycle du carbone				
CFMIP	Rétroactions nuageuses				
DAMIP	Detection et attribution				
DCPP	Précision climatique décennale				
FAFMIP	Flux radiatifs				
GeoMIP	Geoenginierie				
GMMIP	Mousson				
HighResMIP	Modèles haute résolution				
ISMIP6	Calottes	LGGE		LGGE	
LS3MIP	Surface continentale, neige et humidité		LGGE		LGGE
LUMIP	Utilisation des terres				
OMIP	Modèles d'océan				
PMIP	Palaeoclimat				
RFMIP	Forçage radiatif				
ScenarioMIP	Scenario				
VolMIP	Forçage d'origine volcanique				
CORDEX	Modélisation régionale et descente d'échelle		MedCordex		
DynVar	Dynamique et variabilité				
SISMIP	Glace de mer				
VIAXSAB	VIA Advisory Board for CMIP6				

Rôle dans le projet
- contribution aux protocoles
- membre bureau
- coordination

Participation
- minimale
- forte

Depuis 80 ans, nos connaissances bâtissent de nouveaux mondes

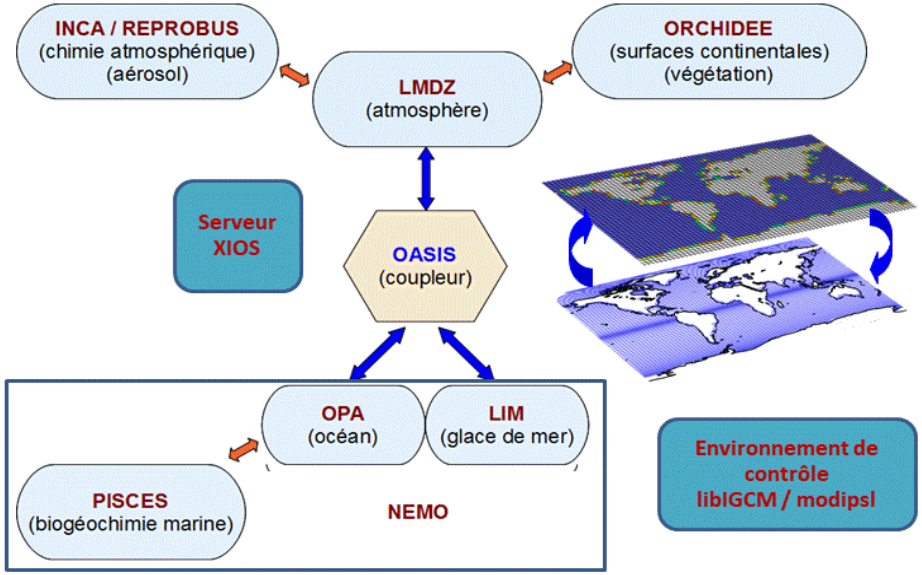
Le modèle de climat de l'IPSL

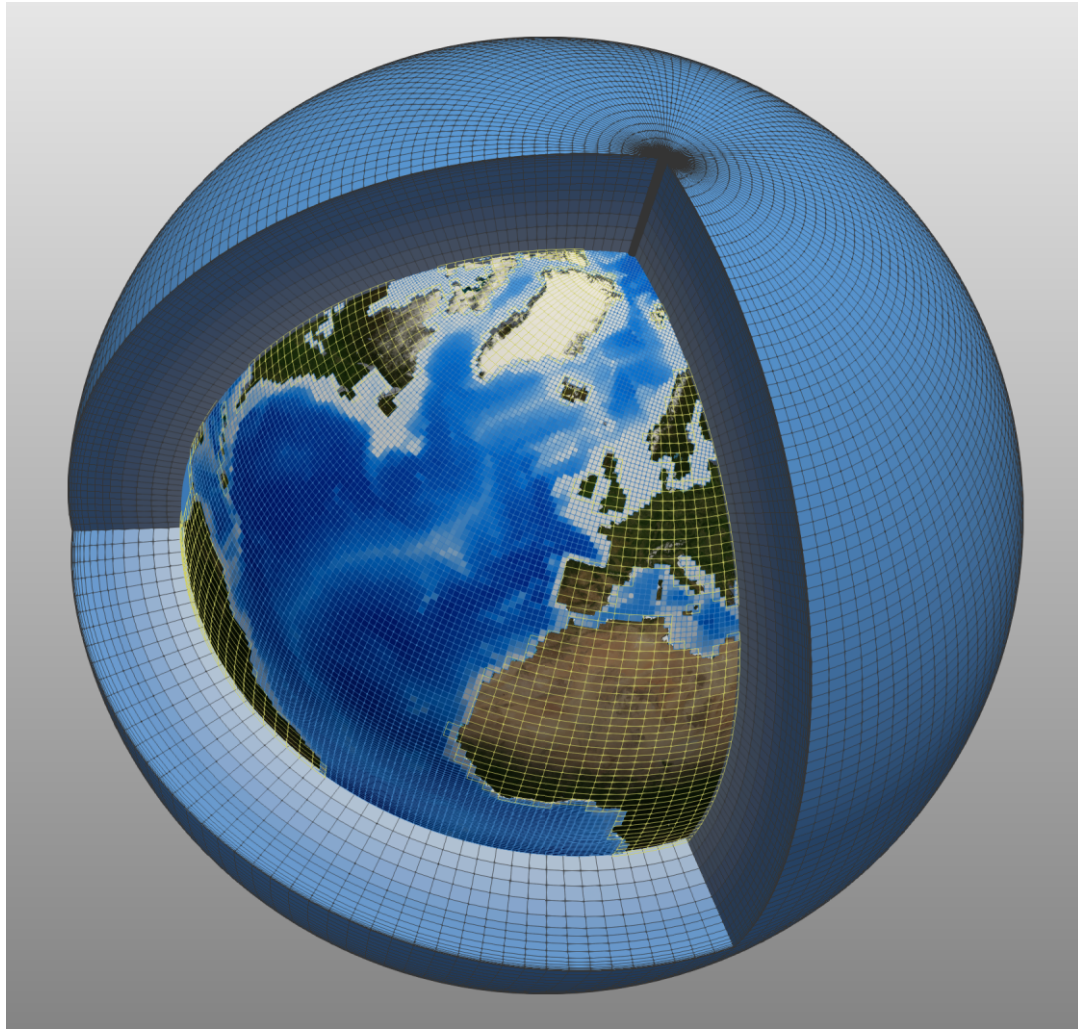
Une meilleure prise en compte des processus de petite échelle

Une nouvelle physique atmosphérique

Une augmentation de la résolution dans l'atmosphère et dans l'océan

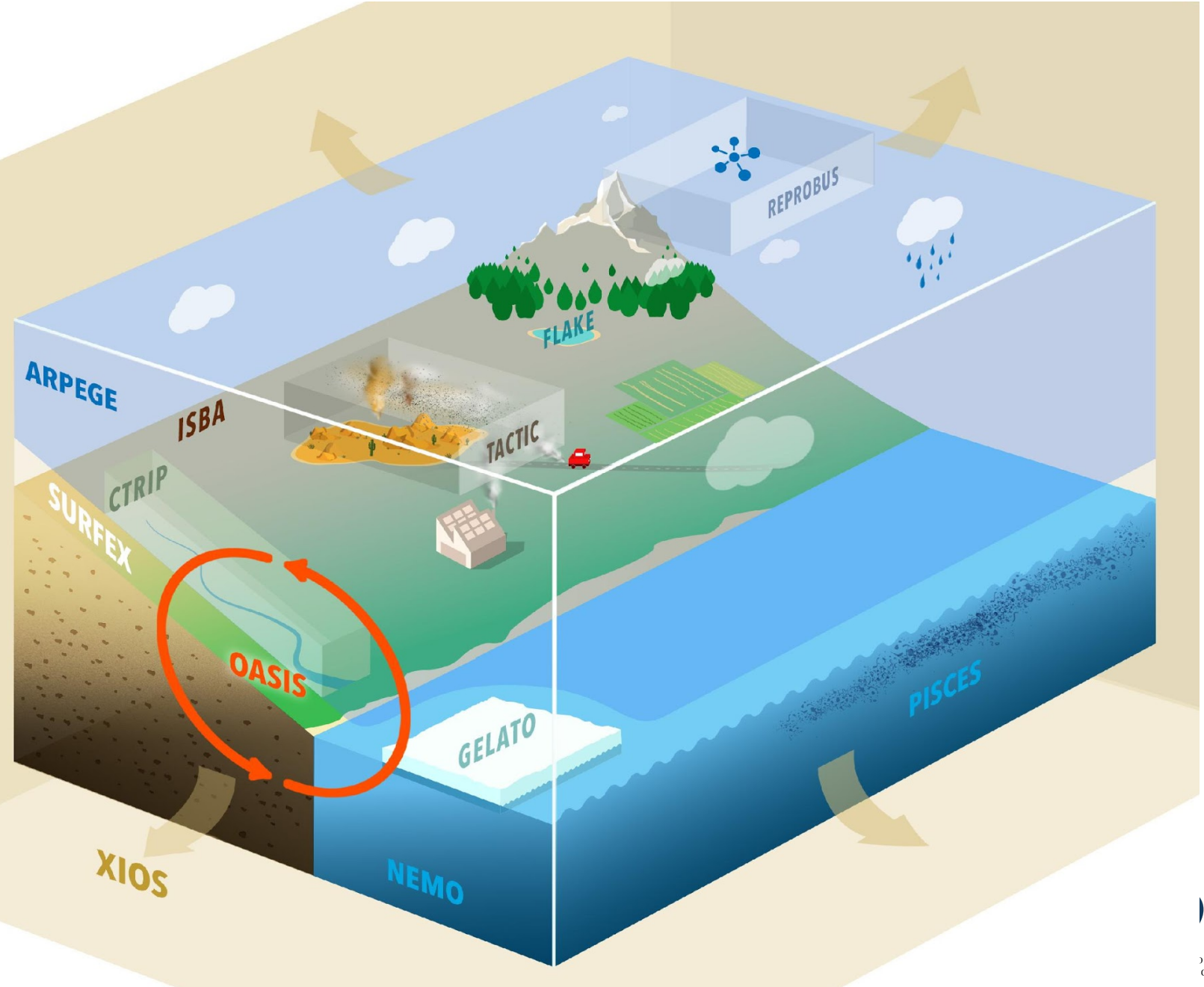
Un meilleur « ajustement » du modèle





Depuis 80 ans, nos connaissances bâtissent de nouveaux mondes

Le modèle de climat du CNRM-Cerfacs



Un modèle de système Terre, CNRM-ESM2, dont le cœur physique est CNRM-CM6

Nouvelle physique atmosphérique

Deux résolutions : 100 km et 40 km

CMIP6 en France : moyens humains et financiers

- ~ 100 chercheurs et ingénieurs à l'échelle de la France

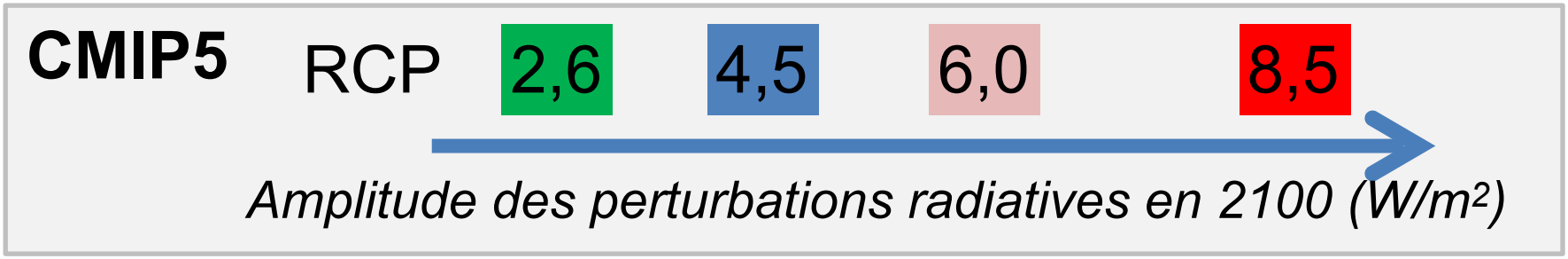
- Calcul et stockage

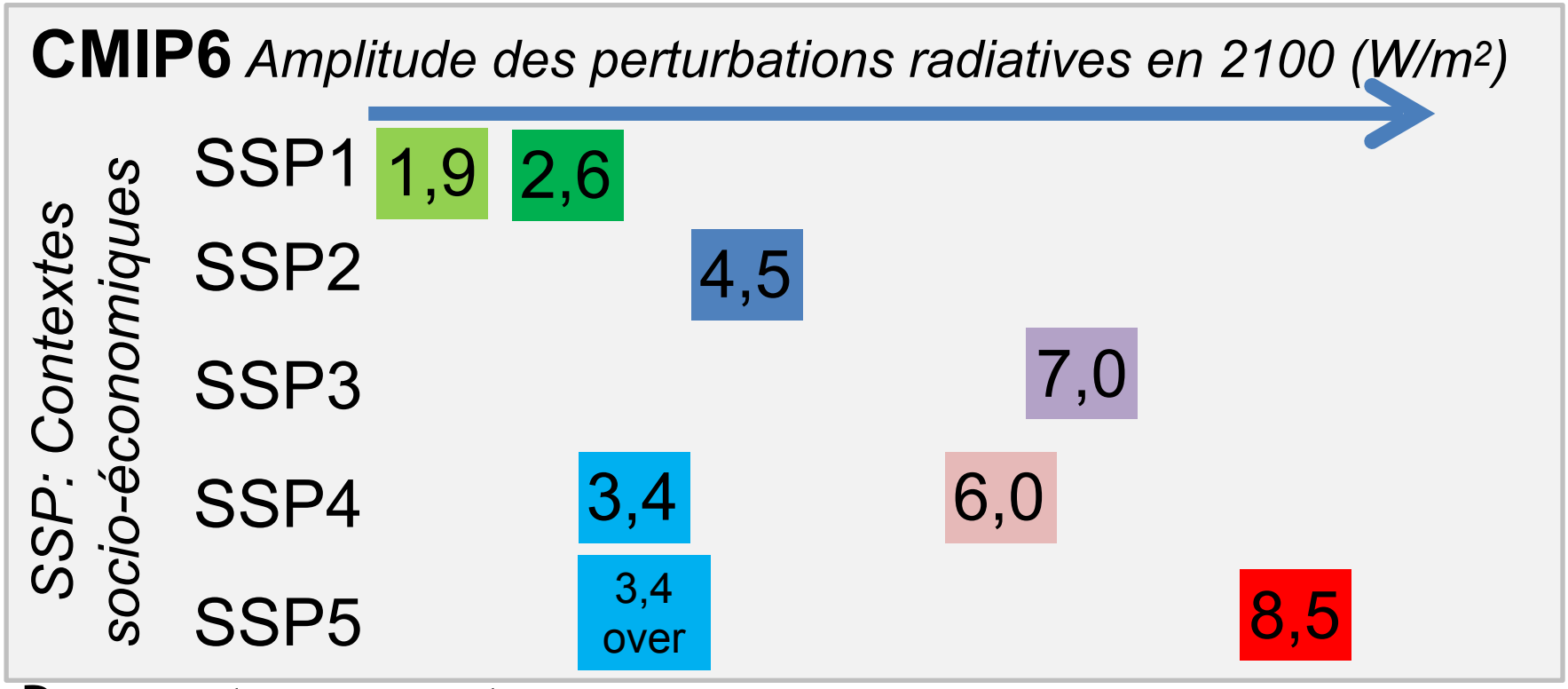
  Météo-France : 260 millions d'heures, 2 Po de stockage
  GENCI : 300 millions d'heures, 14 Po d'archivage, 5 Po de stockage

- Une grille mondiale de distribution des résultats : ESGF

- Une infrastructure nationale pour stocker et analyser les expériences à cheval sur le TGCC, l'IDRIS et l'IPSL

Hypothèses pour le futur : les scénarios CMIP6





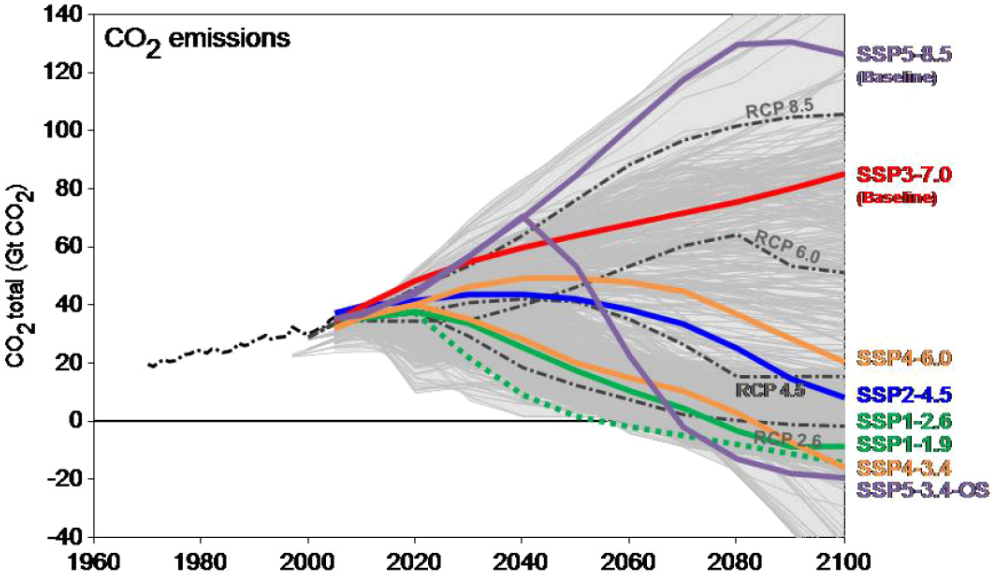
Prennent en compte :

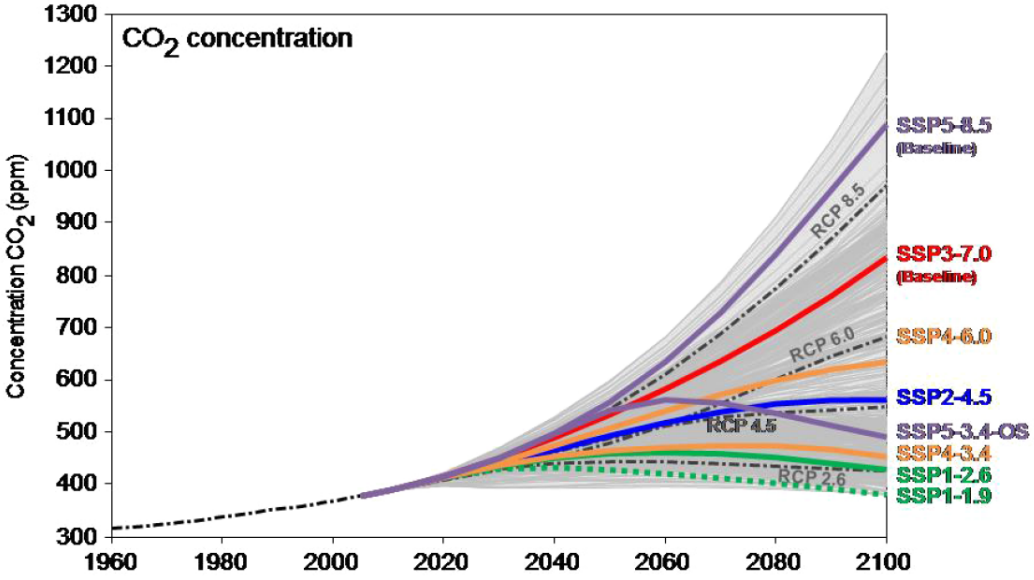
- L'évolution de la population
- Le type de développement
- Le type d'interactions entre pays

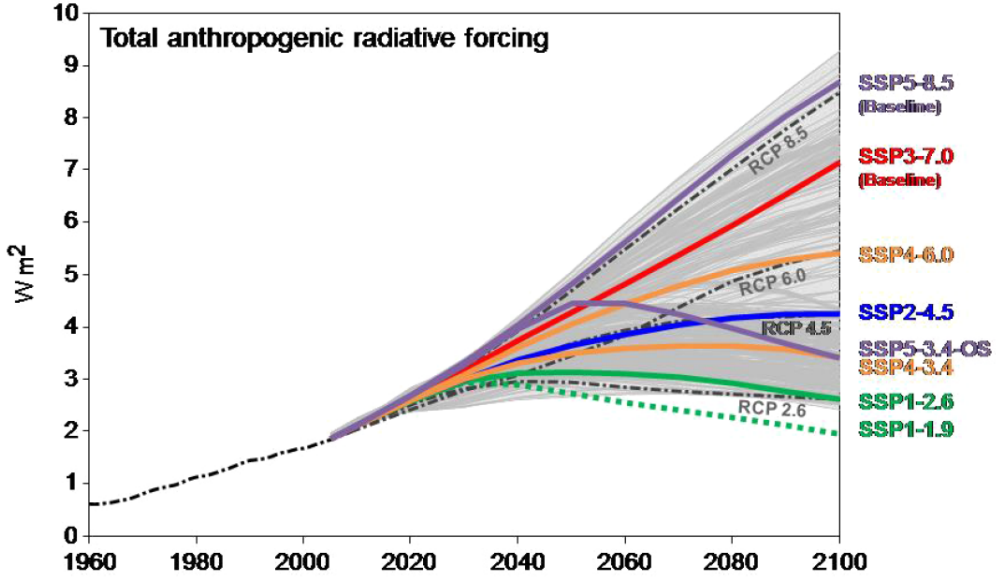
=> Chaque scénario = évolution cohérente des gaz à effet de serre, aérosols et utilisation des terre à imposer au modèle pour réaliser les simulations

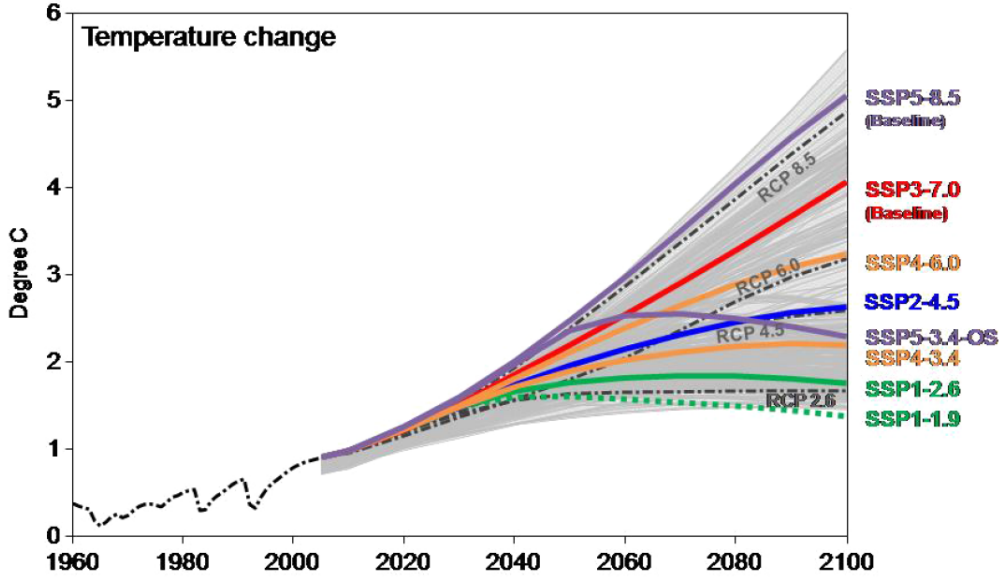
Depuis 80 ans, nos connaissances bâtissent de nouveaux mondes

Ex pour le dioxyde de carbone





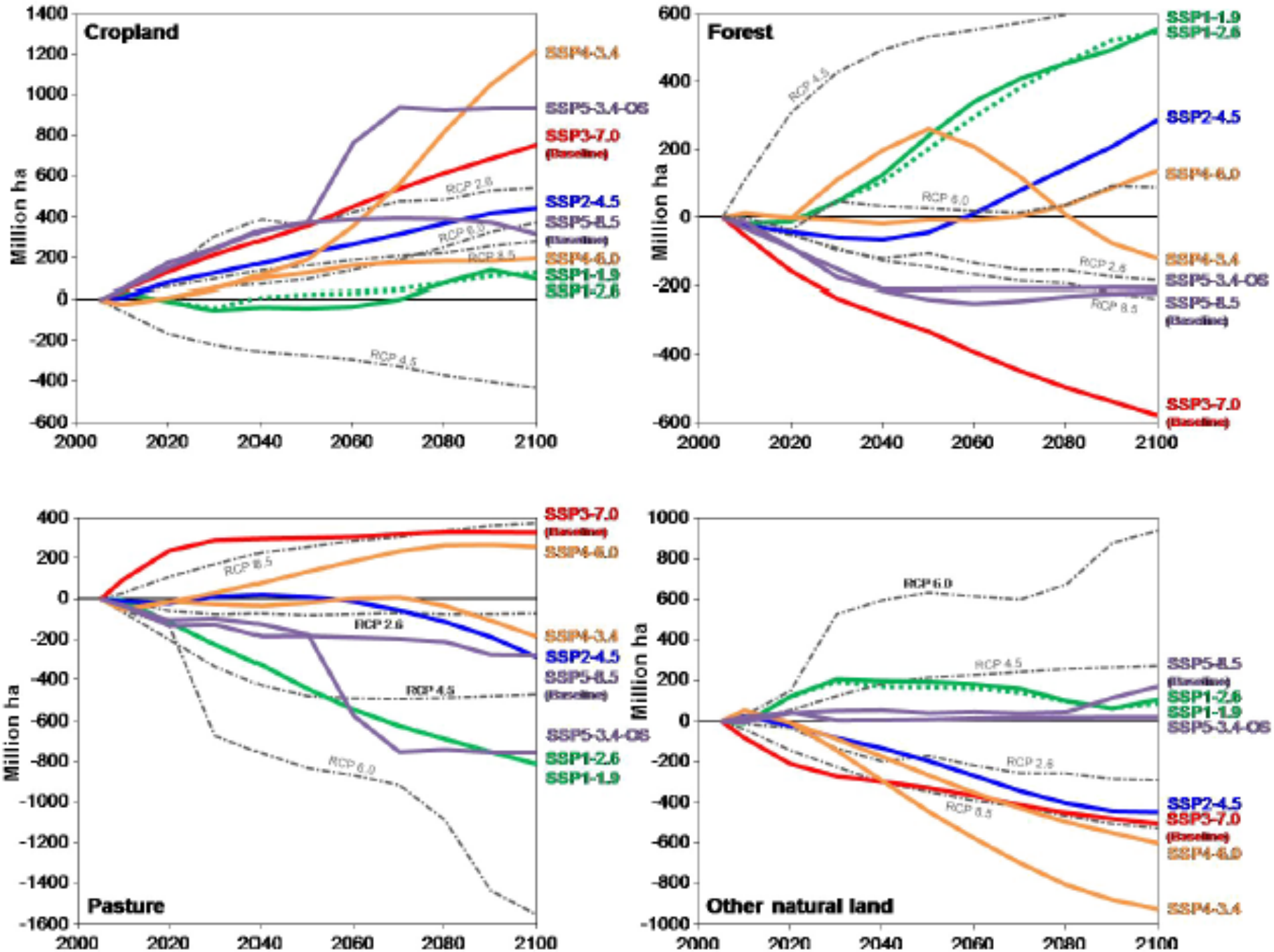




Source: Riahi et al, 2016

Depuis 80 ans, nos connaissances bâtissent de nouveaux mondes

Utilisation des Terres



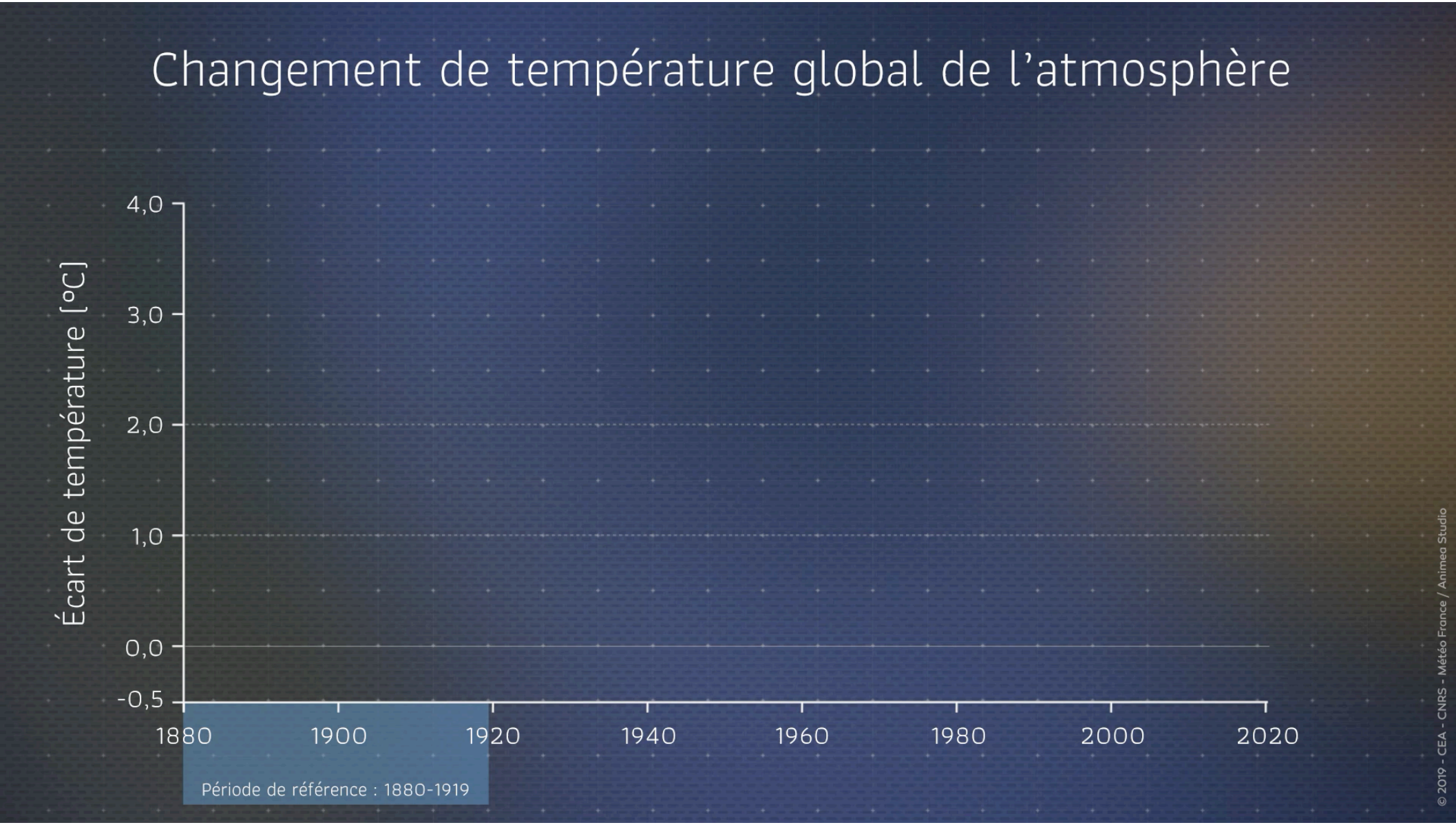
O-Neill et al 2016

Perturbations considérées dans les simulations

Variable	Subcategories	Resolution	Sources
Land use	Crop, pasture, urban area, vegetation, forest (latter two both primary and secondary).	Spatial maps indicating land use and transition matrices	Methods for historical data and scenarios developed by LUMIP
Emissions of long-lived greenhouse gases	CO_2, N_2O, halogenated gases	Spatial maps and/or emissions by region.	Historical data described in Meinshausen et al. (2016)
Concentrations of long-lived greenhouse gases	CO_2, N_2O, halogenated gases	Time series	
Emissions of air pollutants	CH_4, SO_2, NO_x, VOC, CO, NH_y, BC, OC	Spatial maps	Historical data described to be provided by the Community Emissions Data System (CEDS) project (http://www.globalchange.umd.edu/ceds/ceds-cmip6-data/)
Short-lived forcing	Ozone, optical depth	Spatial maps	

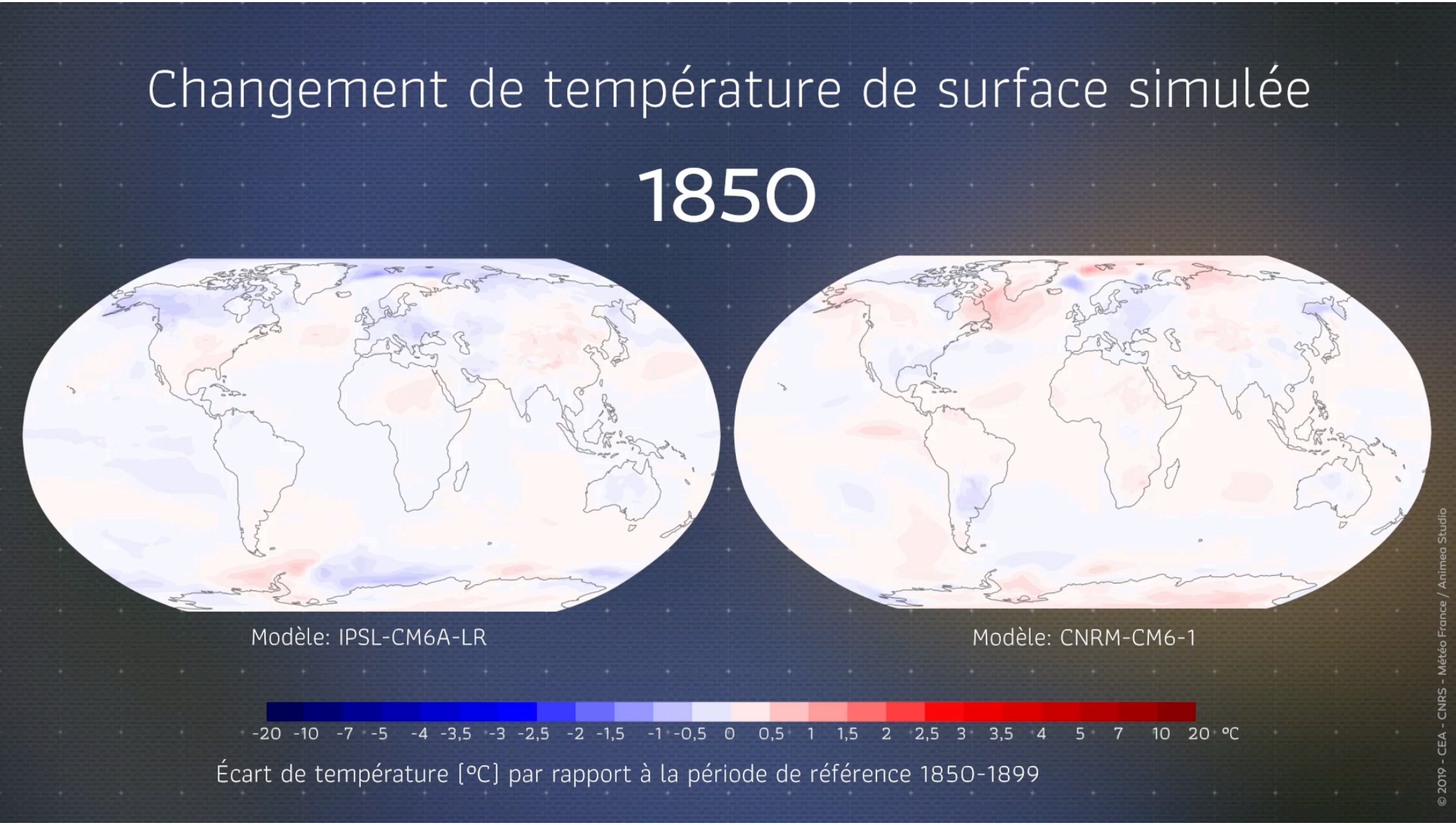
Depuis 80 ans, nos connaissances bâtissent de nouveaux mondes

Simulations des changements annuels de température



Depuis 80 ans, nos connaissances bâtissent de nouveaux mondes

Simulations des changements annuels de température



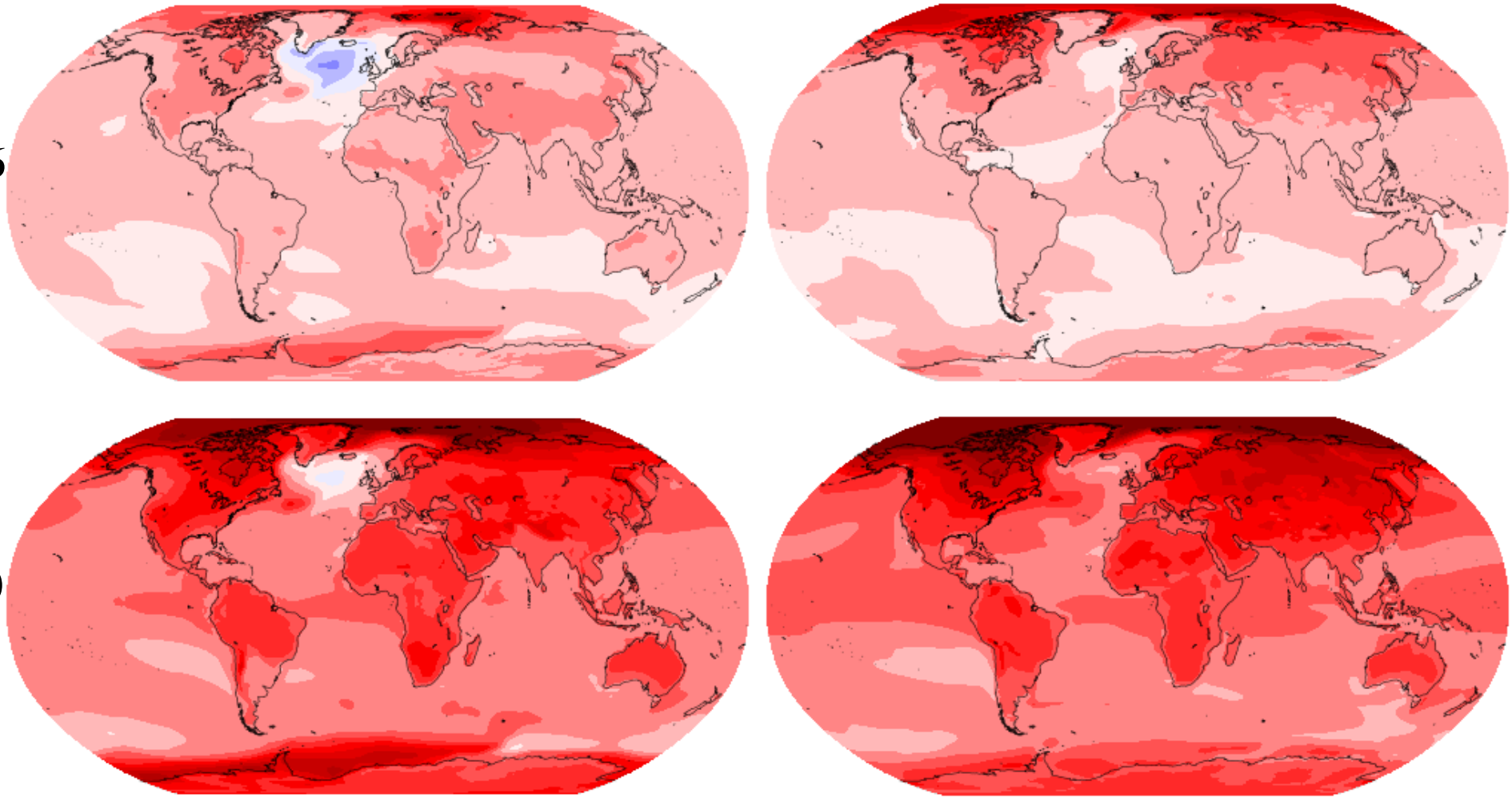
Depuis 80 ans, nos connaissances bâtissent de nouveaux mondes

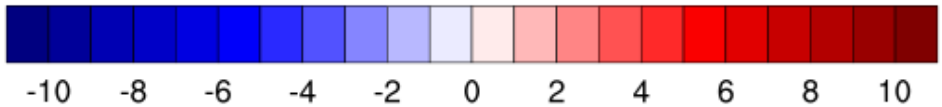
Changements de température (°C) entre 1981-2010 et 2071-2100

CNRM-CM6-1 | **IPSL-CM6A-LR**

SSP1 2,6

SSP3 7,0

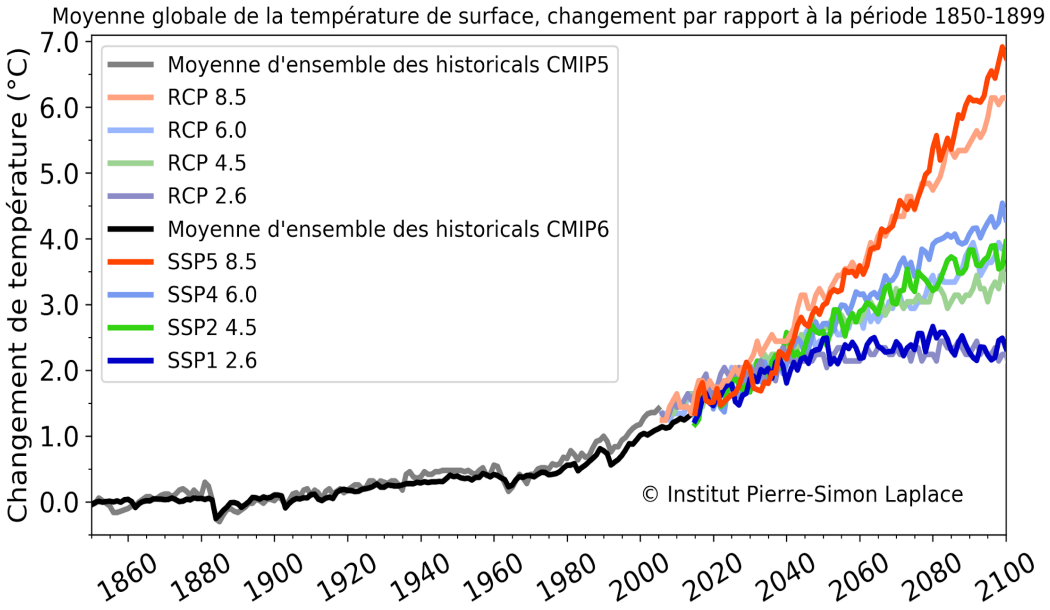


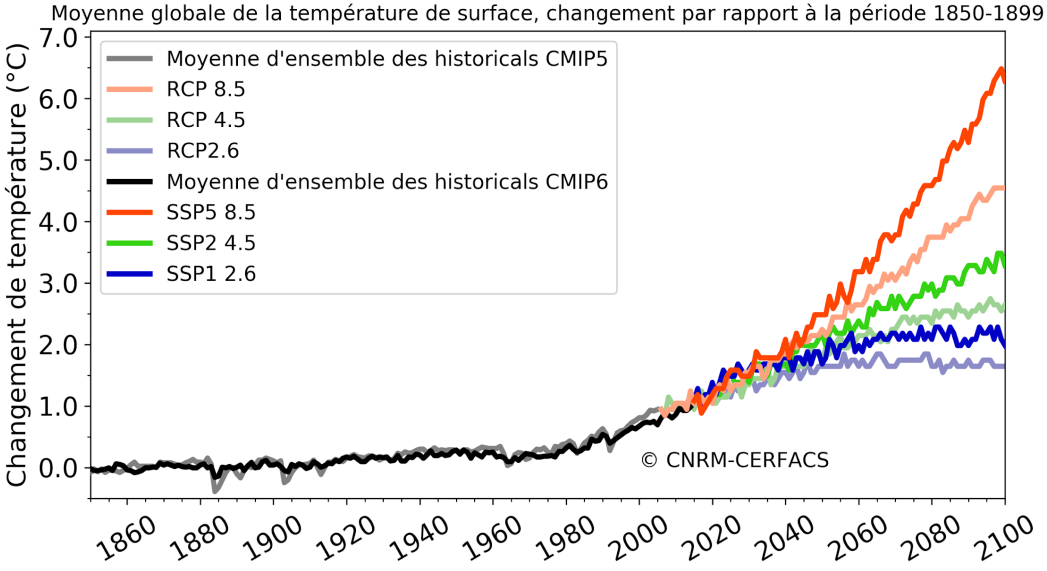


Depuis 80 ans, nos conna
bâtissent de nouveaux mo

Comparaison CMIP5-CMIP6

- Peu de changement sur la période historique entre CMIP5 et CMIP6 (voire un réchauffement légèrement moindre)
- Des projections jusqu'en 2100 très cohérentes entre les deux modèles français
- Un réchauffement à la hausse dans les modèles du CNRM qui rejoint celui du modèle de l'IPSL

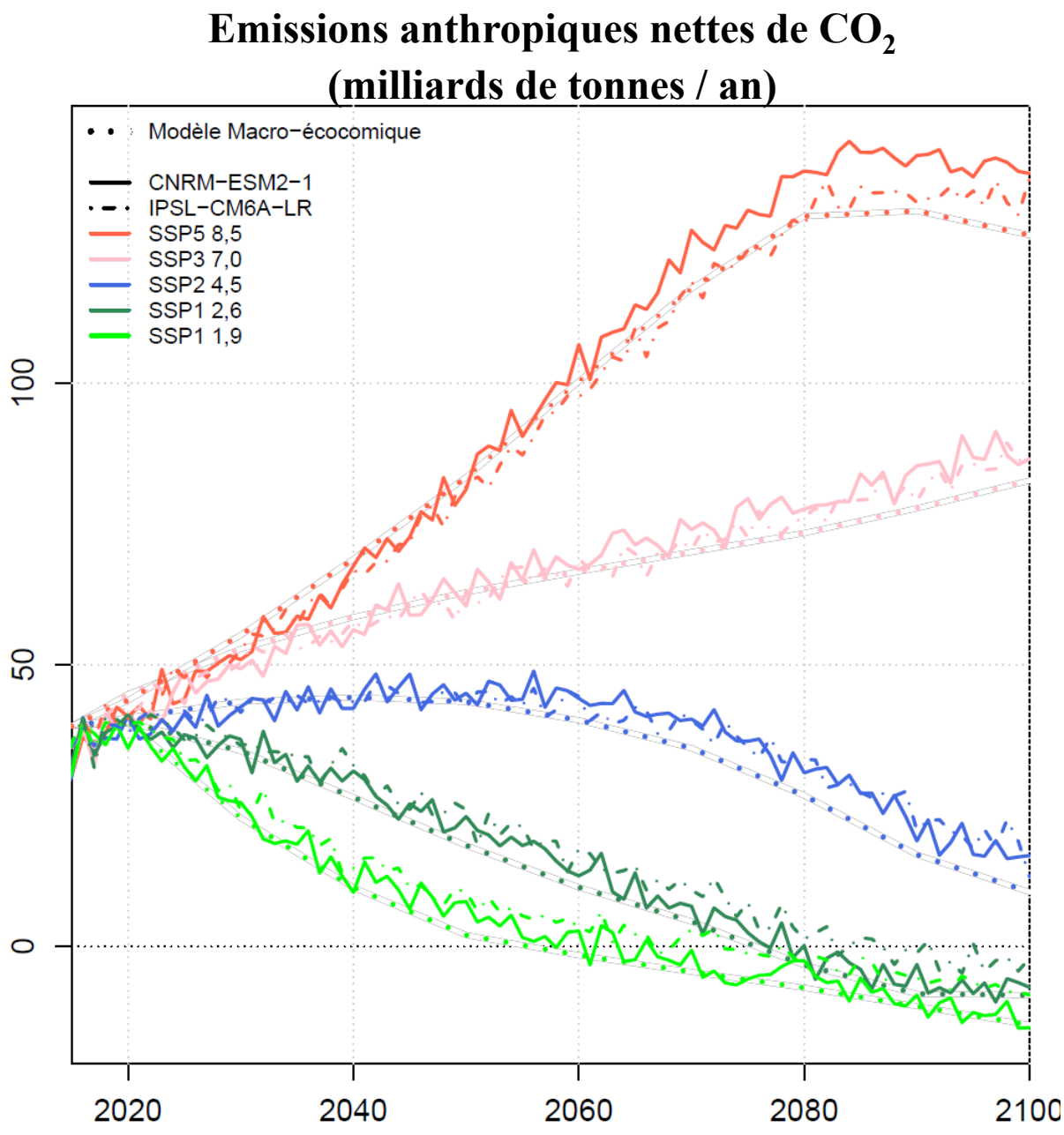




Depuis 80 ans, nos connaissances bâtissent de nouveaux mondes

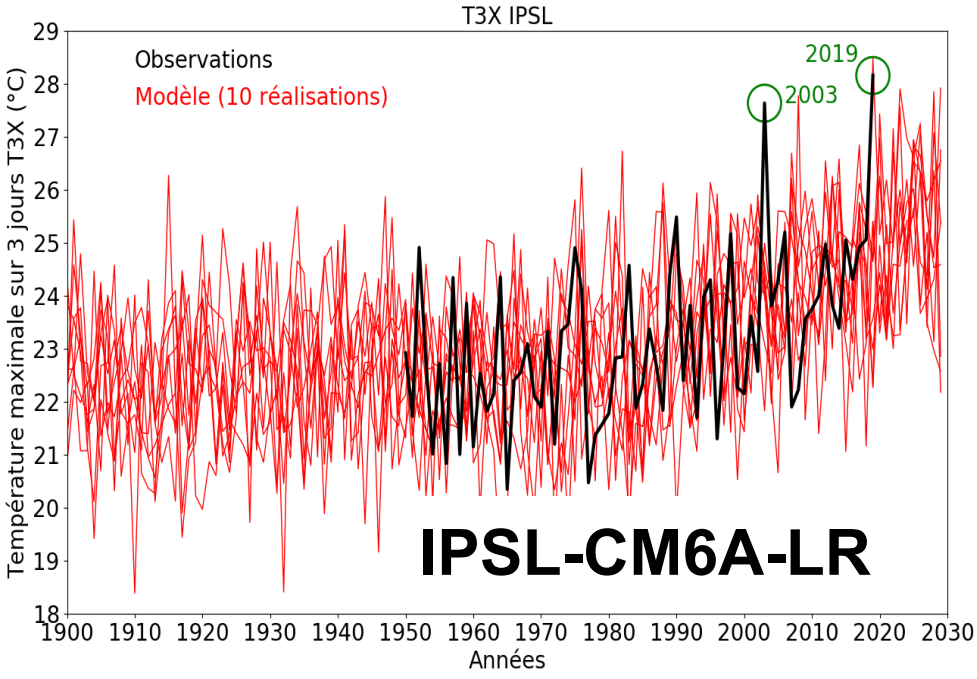
« Budgets carbone »

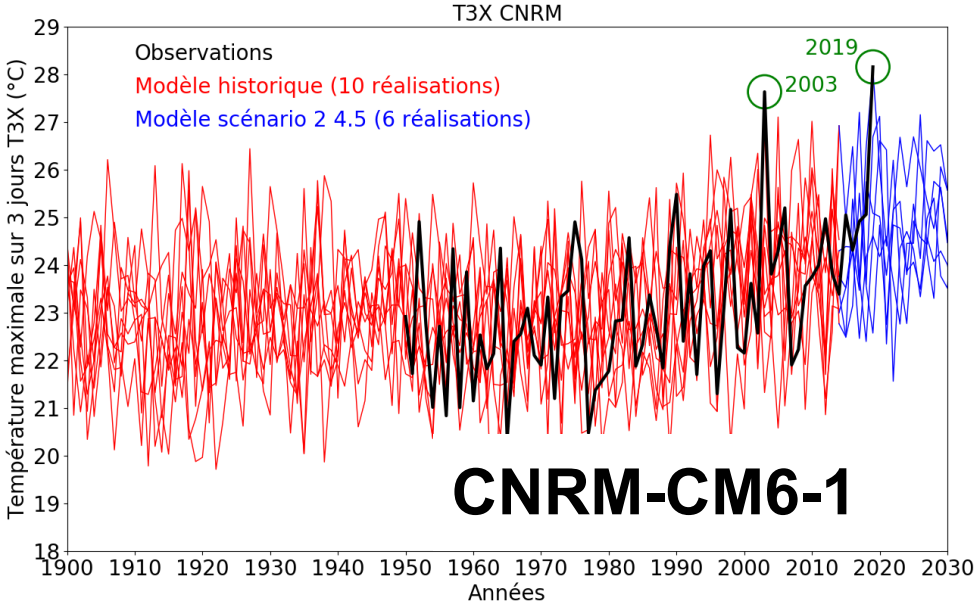
- SSP1 1,9 : neutralité carbone en 2060, puis émissions négatives (captation et stockage de CO_2)
- SSP1 2,6 : neutralité carbone en 2080, puis émissions négatives
- SSP2 4,5 : stabilisation des émissions jusqu'en 2050



Depuis 80 ans, nos connaissances bâtissent de nouveaux mondes

Vagues de chaleur en France (métropole) jusqu'en 2030





Maximum de la température moyenne sur 3 jours consécutifs sur la France métropolitaine

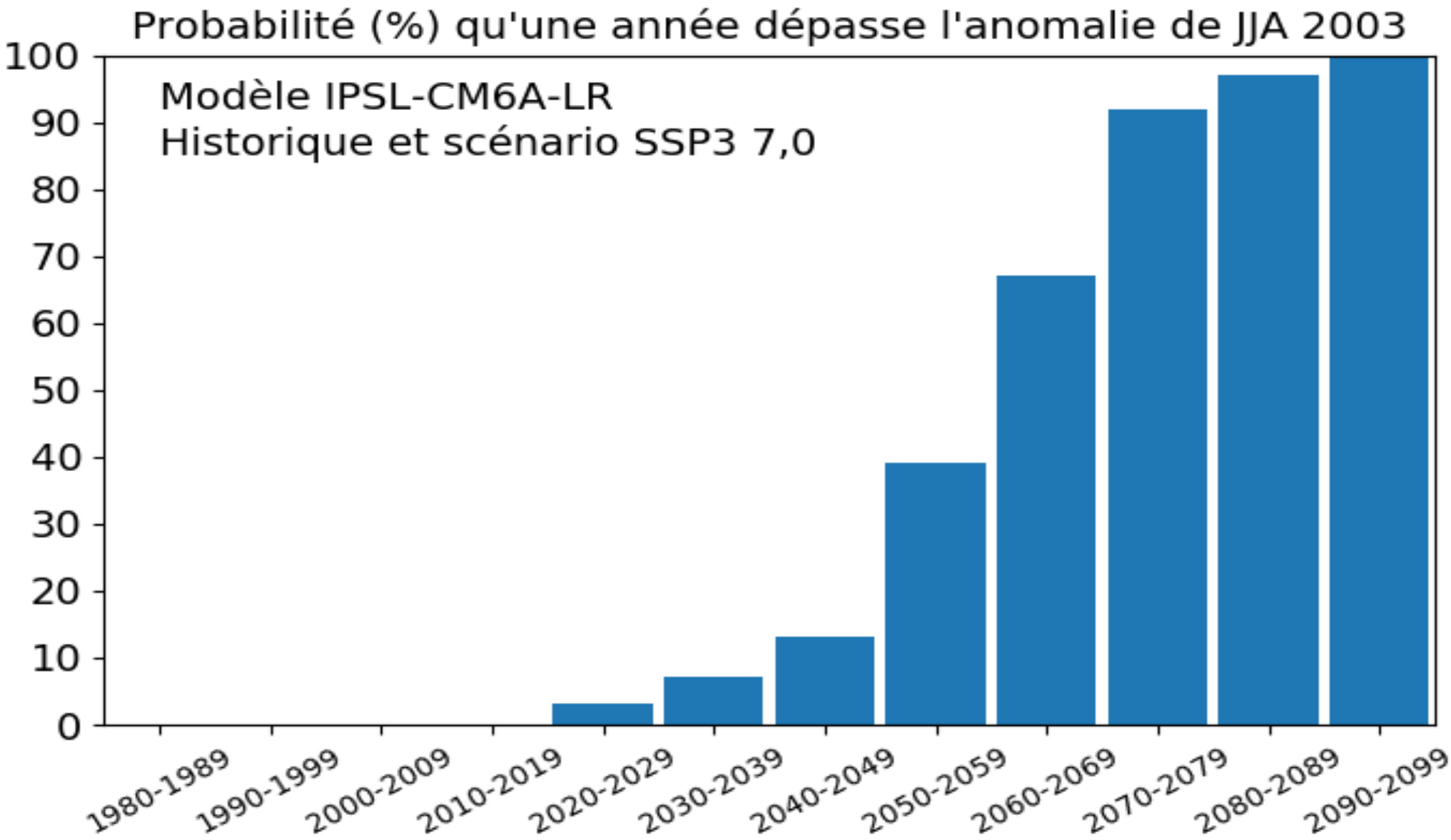
En augmentation dans les observations et dans les simulations

Canicules typiquement 2°C plus intense qu'auparavant dans les simulations

Cela va continuer…

Depuis 80 ans, nos connaissances bâtissent de nouveaux mondes

Etés chauds en France (métropole)

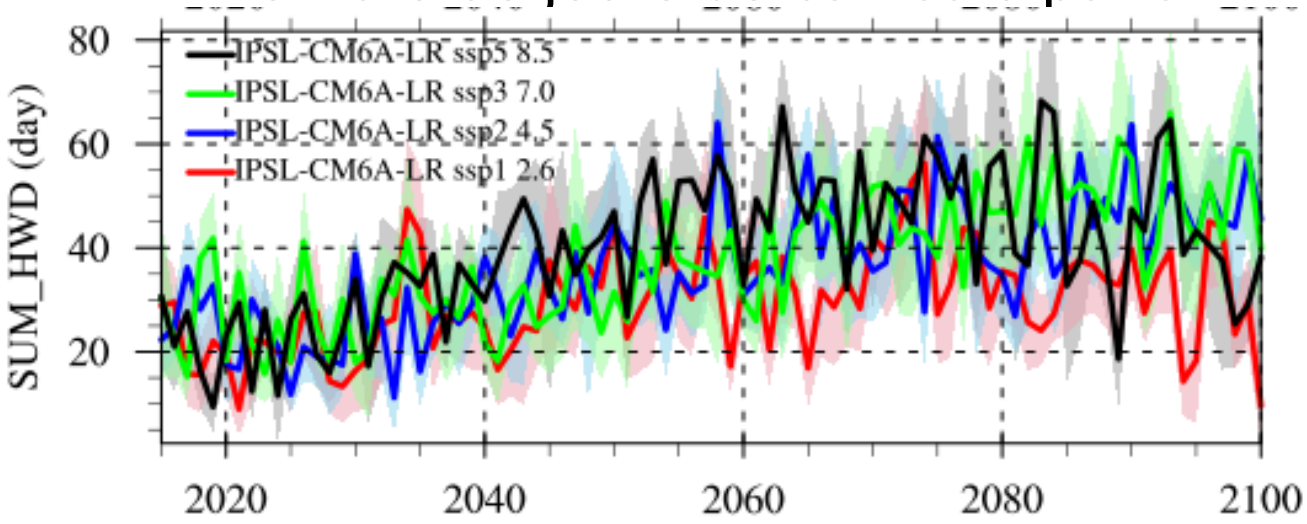


Depuis 80 ans, nos connaissances bâtissent de nouveaux mondes

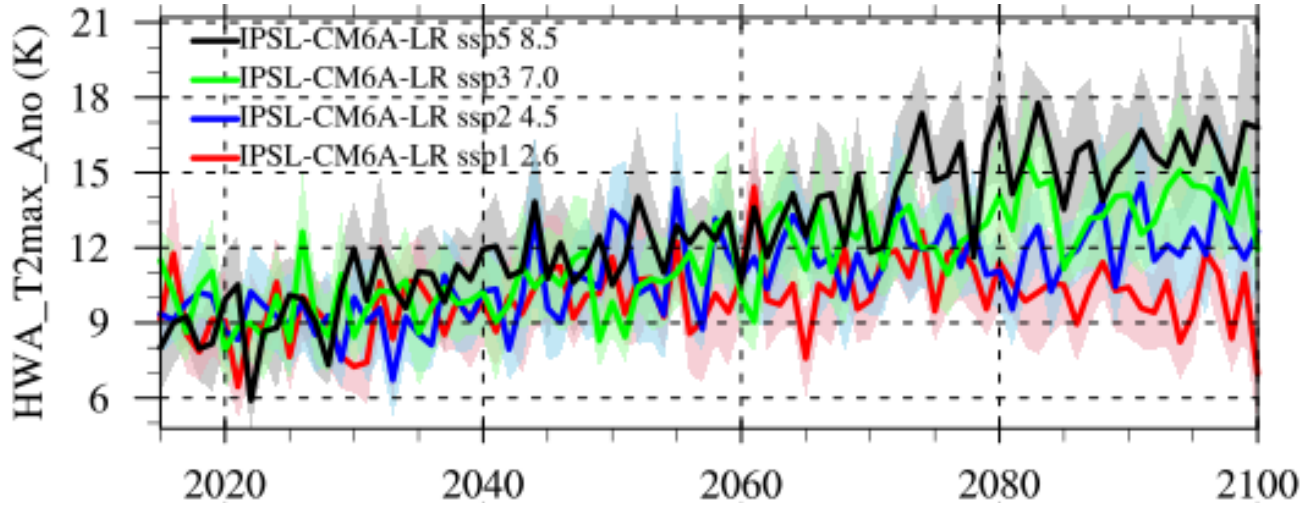
… et en Europe de l'Ouest jusqu'en 2100

- Intensité maximale des canicules, nombre total de jours de canicule, et durée des épisodes de canicule augmentent
- Mais ces augmentations se différencient fortement après 2050 selon les scénarios SSP
- Seul le nombre de canicules augmente peu (car les canicules sont plus longues !)
- IPSL-CM6A-LR simule des canicules plus longues et plus intenses que CNRM-CM6-1.

Nombre de jours de canicule par an

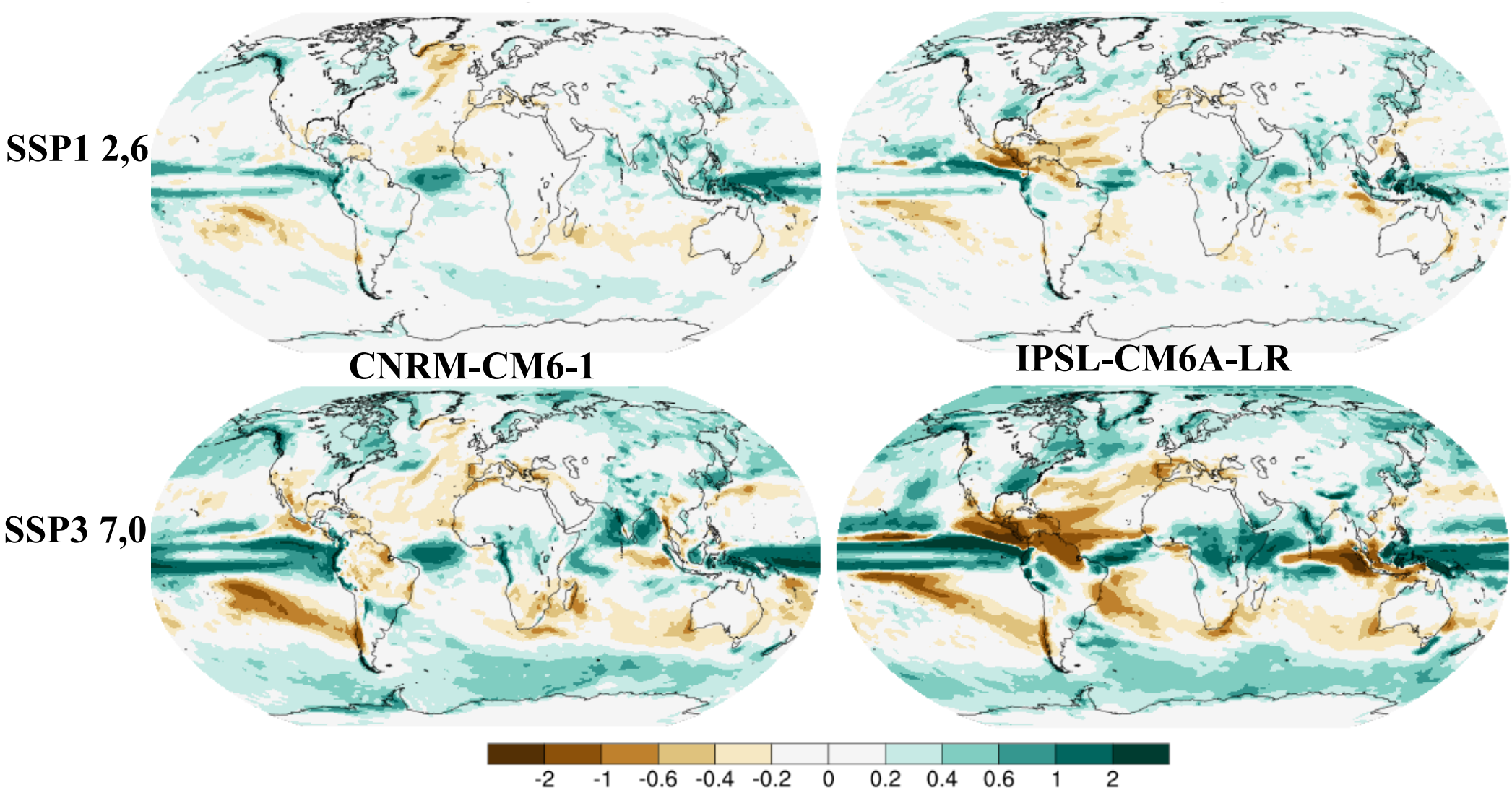


Anomalie de température (canicule)



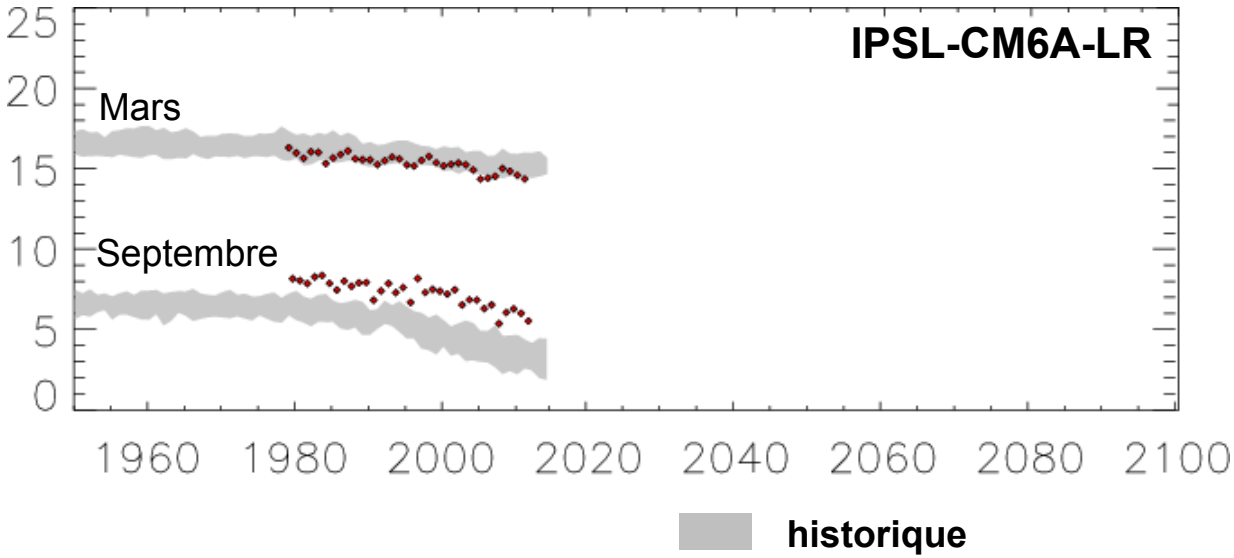
Depuis 80 ans, nos connaissances bâtissent de nouveaux mondes

Changements de précipitations entre 1981-2010 et 2071-2100 (mm/jour)

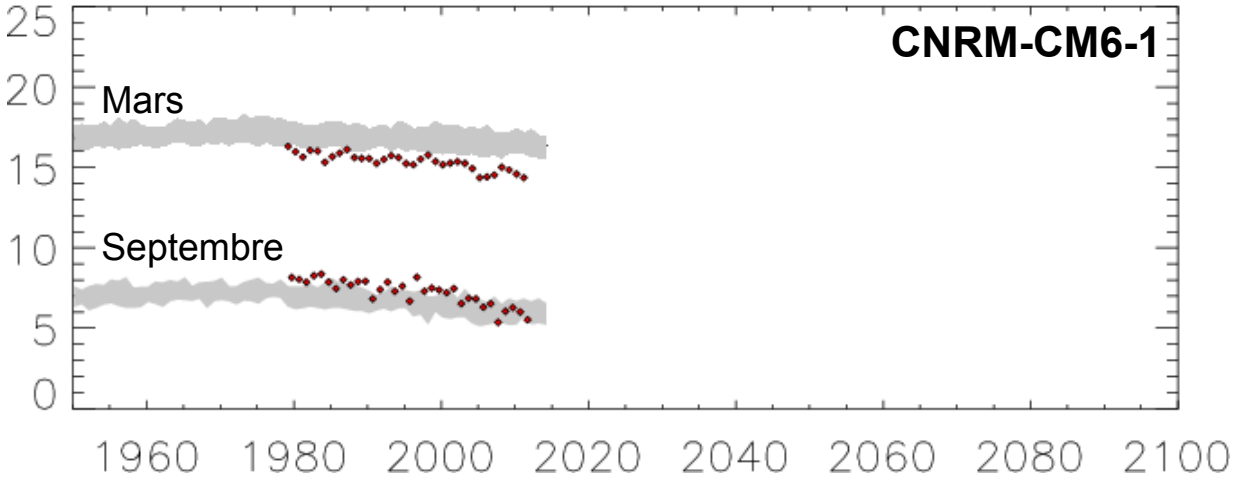


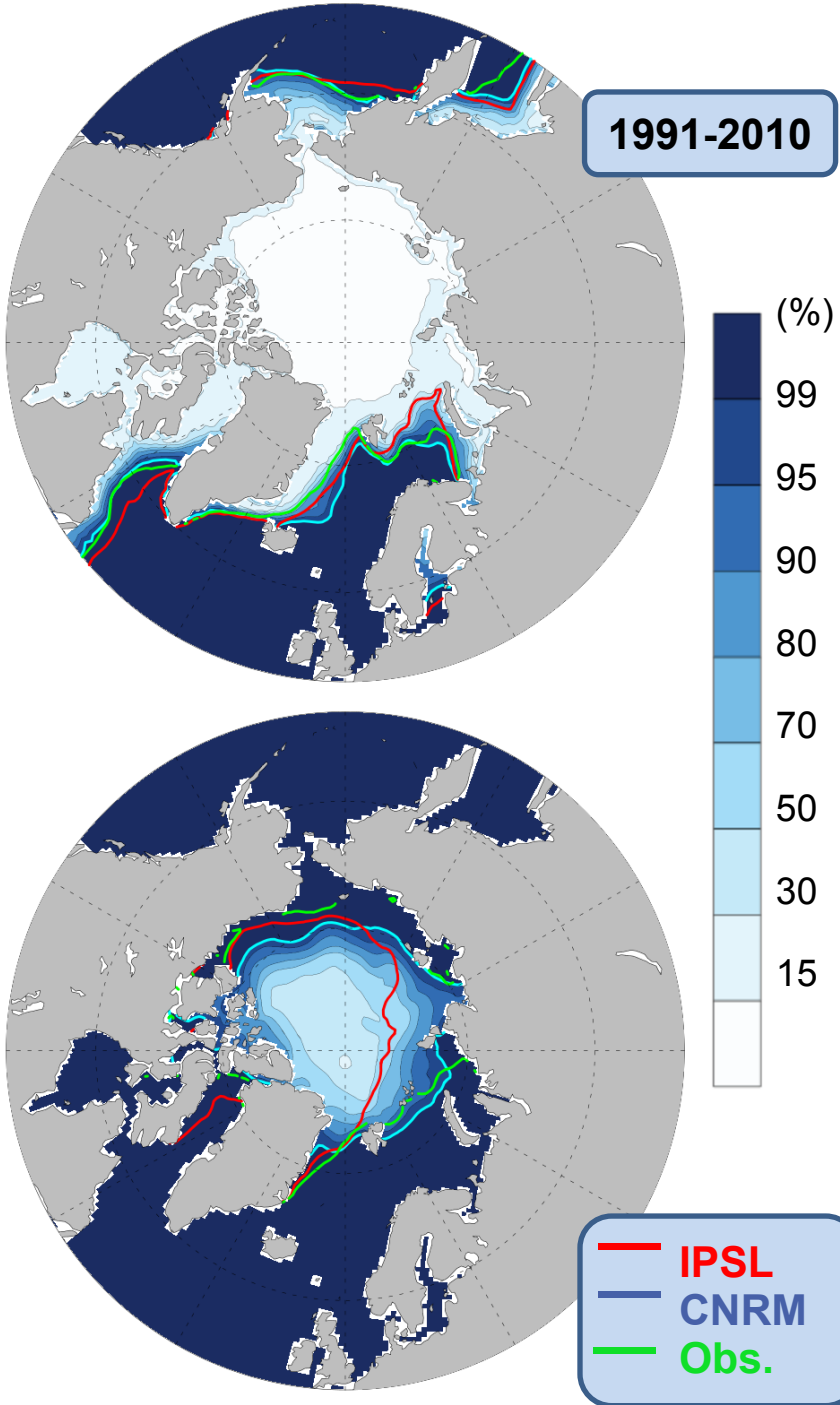
Depuis 80 ans, nos connaissances bâtissent de nouveaux mondes

Évolution de la banquise Arctique – historique

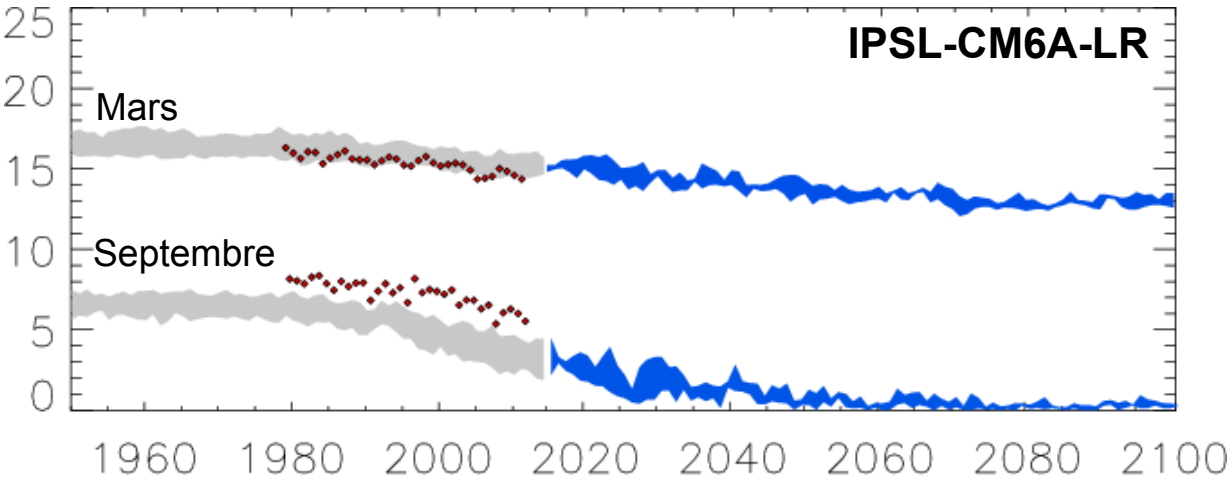


Extension des glaces (millions de km²)



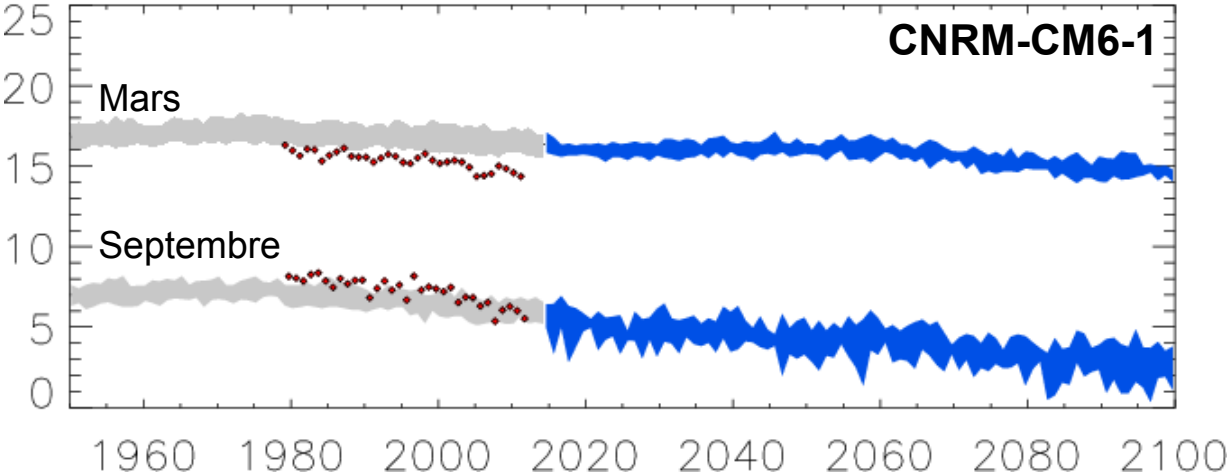


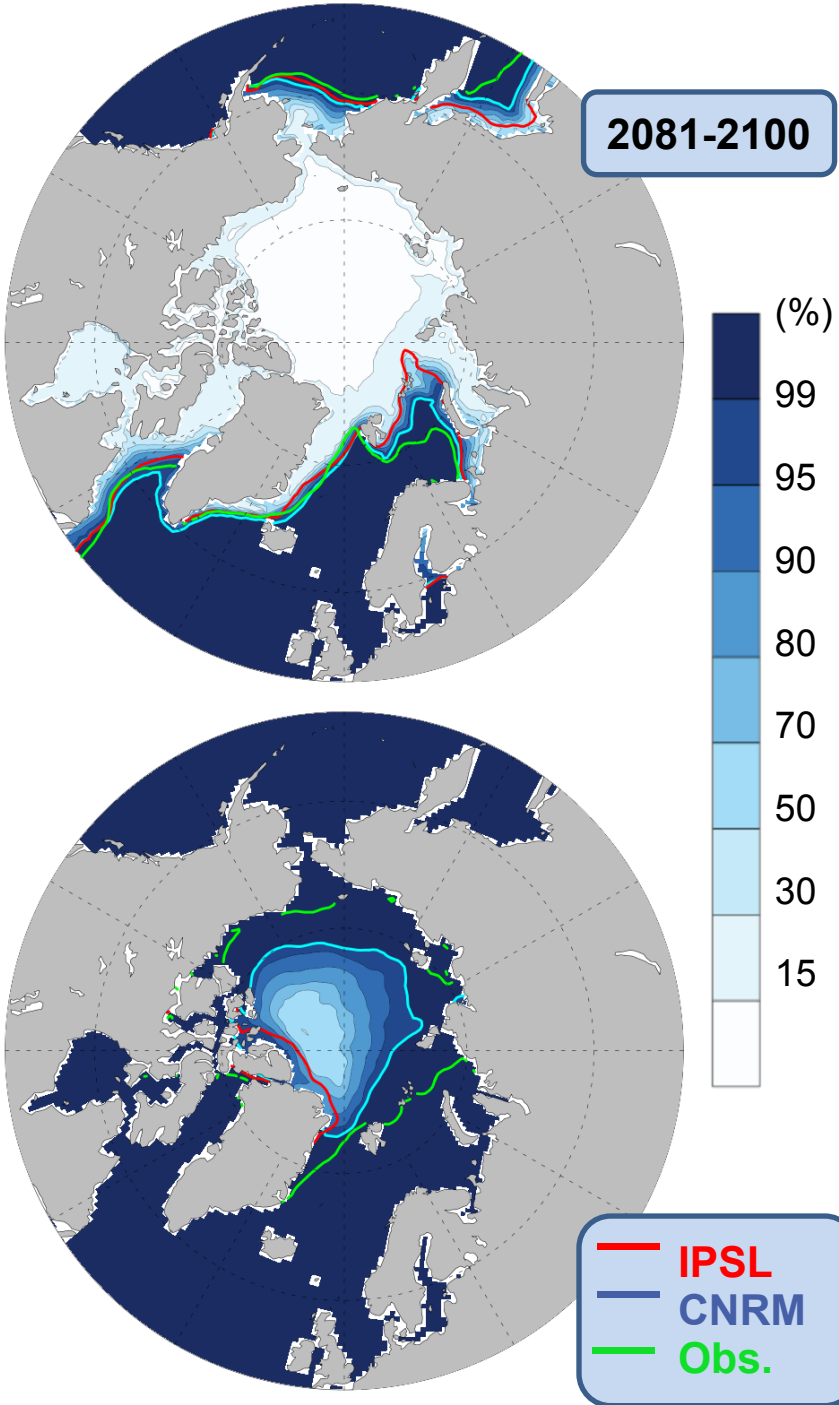
Évolution de la banquise Arctique – SSP1 2,6



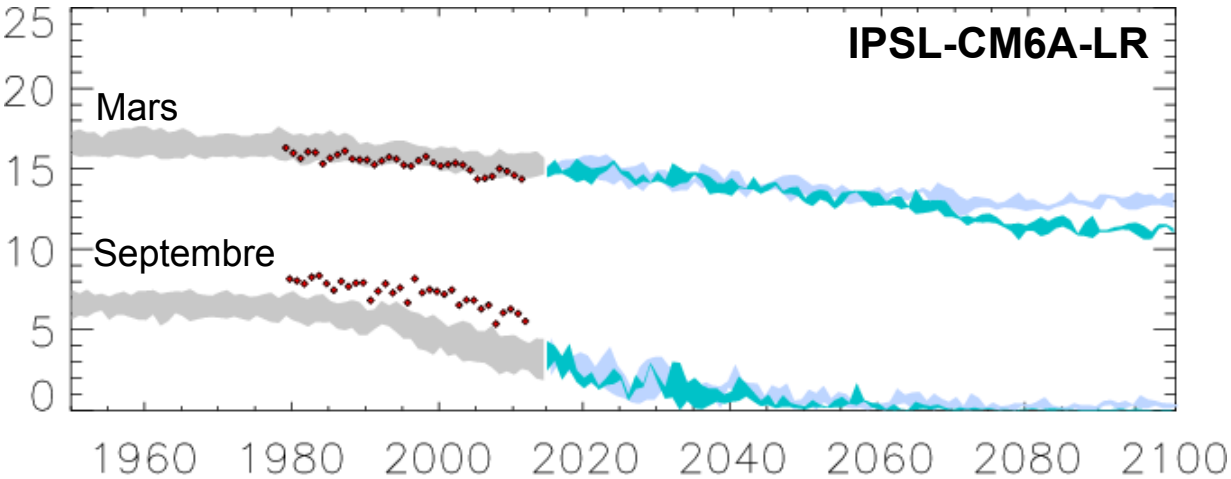
Historique
SSP1 2,6

Extension des glaces (millions de km²)



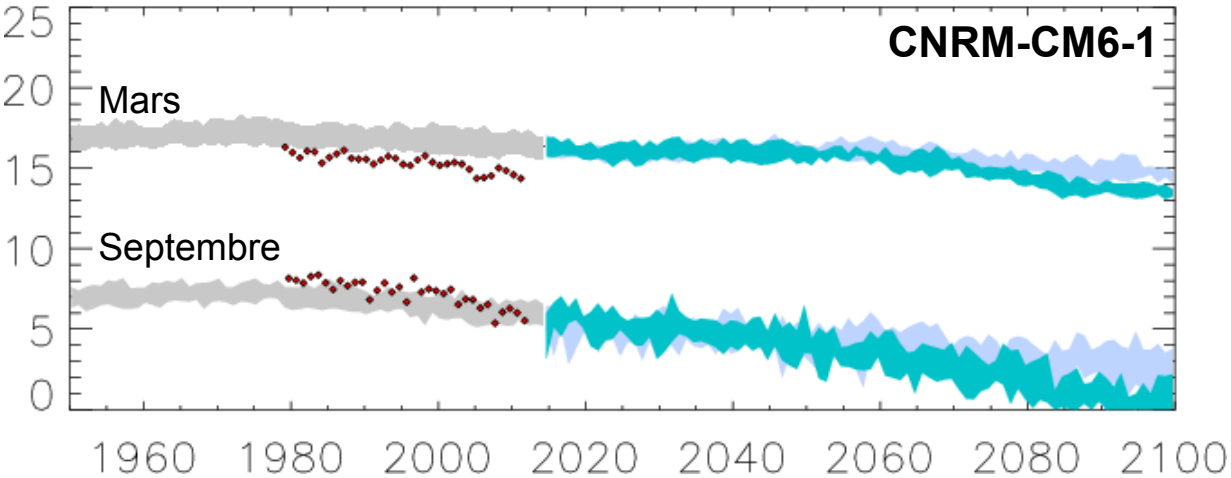


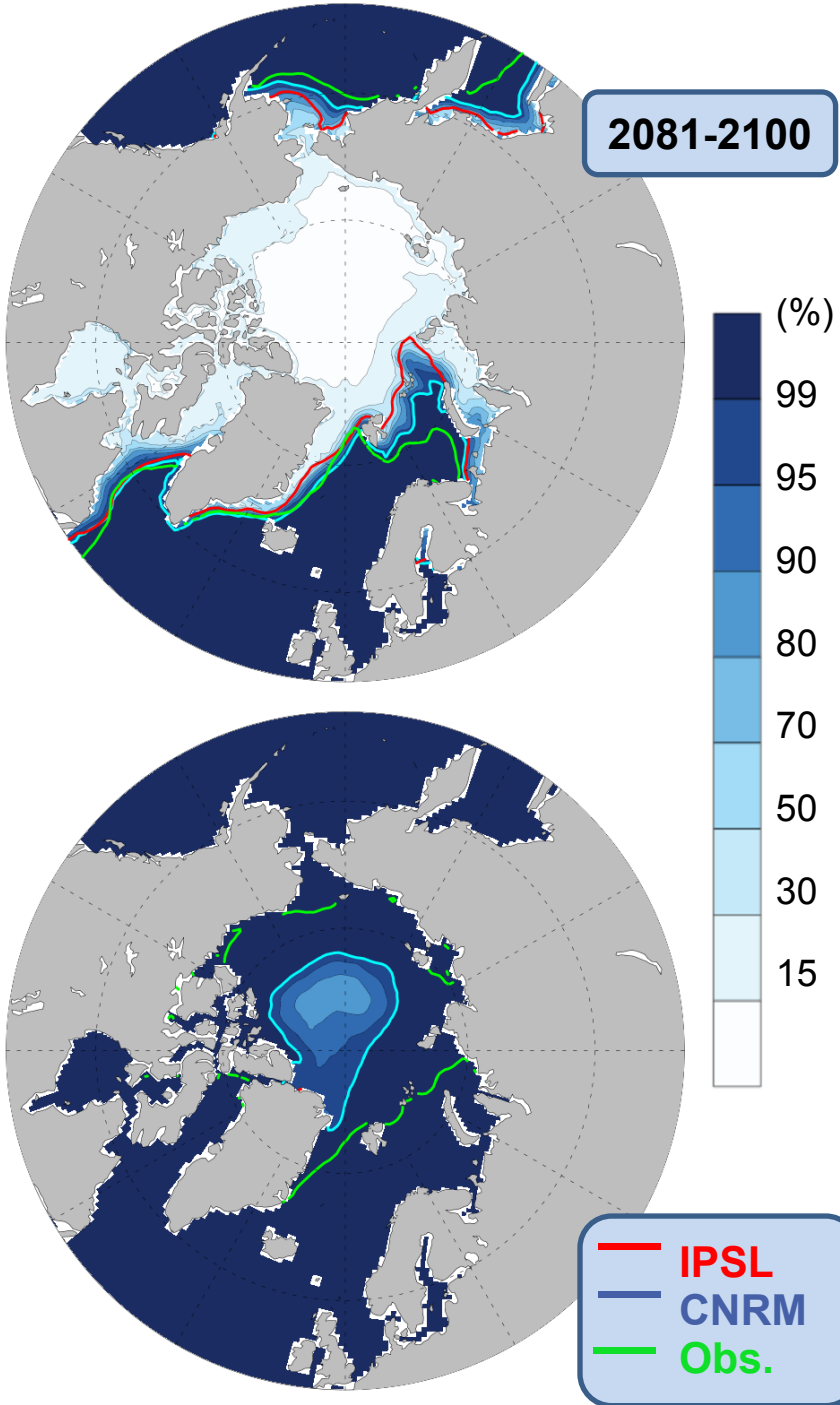
Évolution de la banquise Arctique – SSP2 4,5



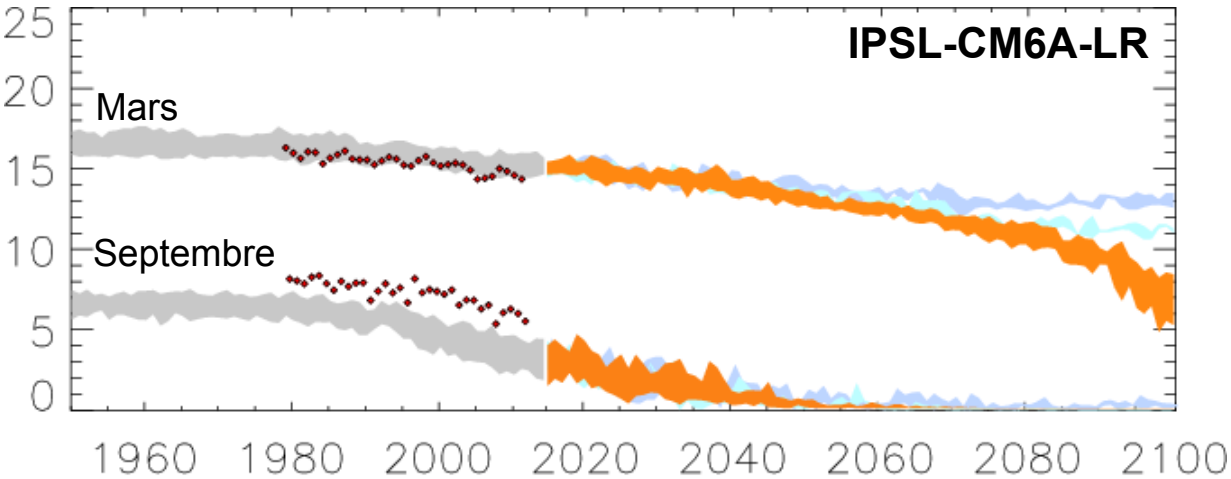
Extension des glaces (millions de km²)

Historique
SSP1 2,6
SSP2 4,5



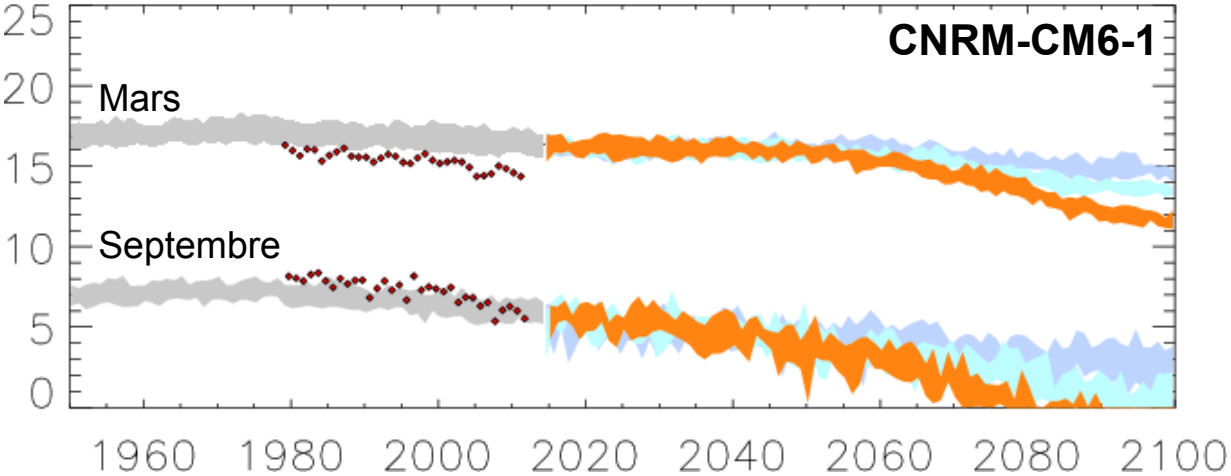


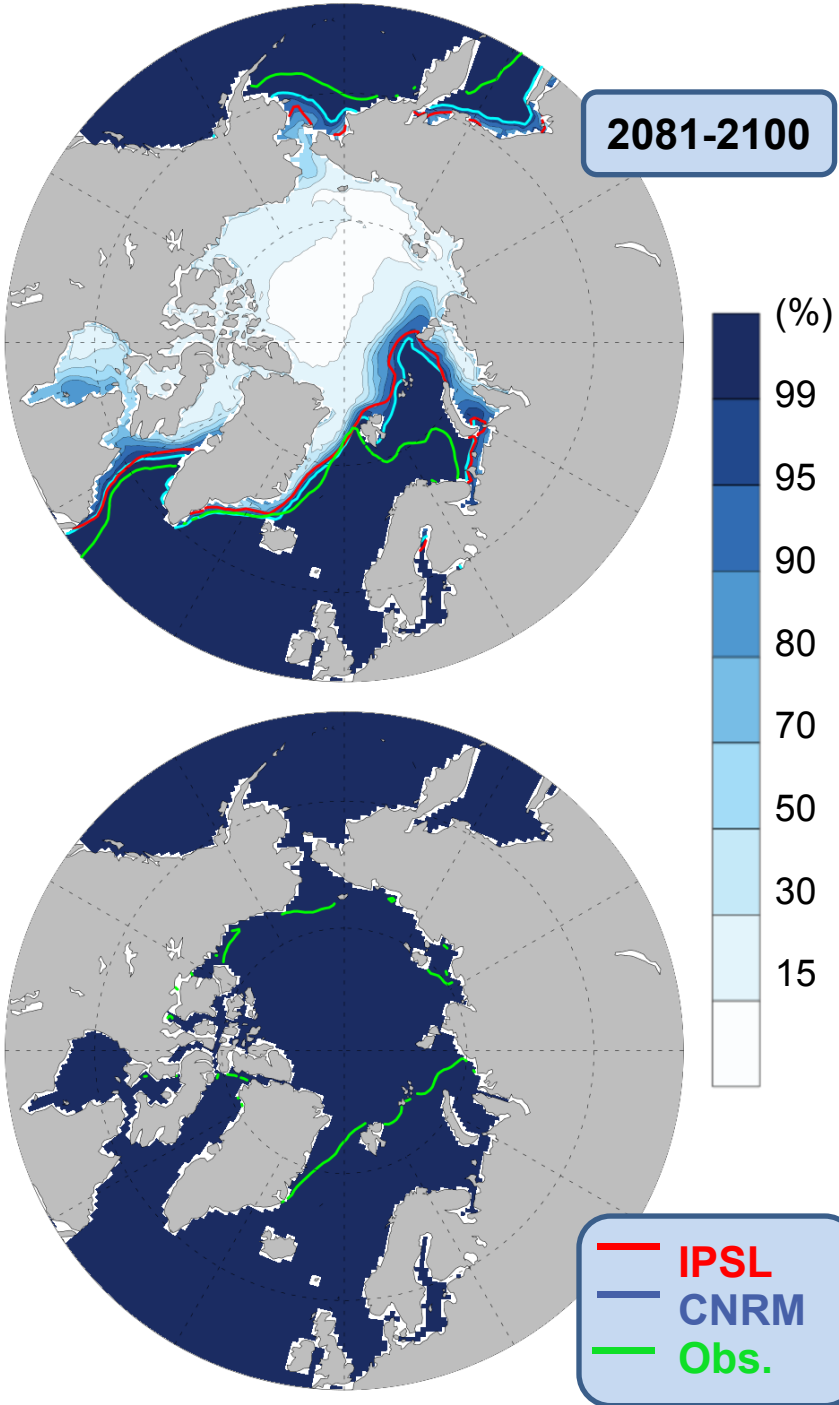
Évolution de la banquise Arctique – SSP3 7,0



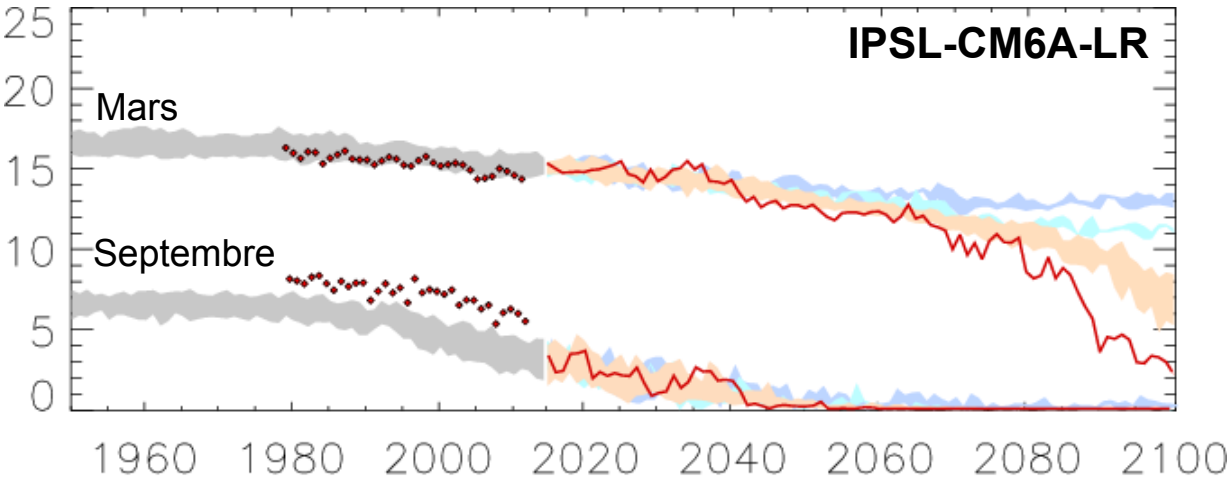
Extension des glaces (millions de km²)

Historique
SSP1 2,6
SSP2 4,5
SSP3 7,0



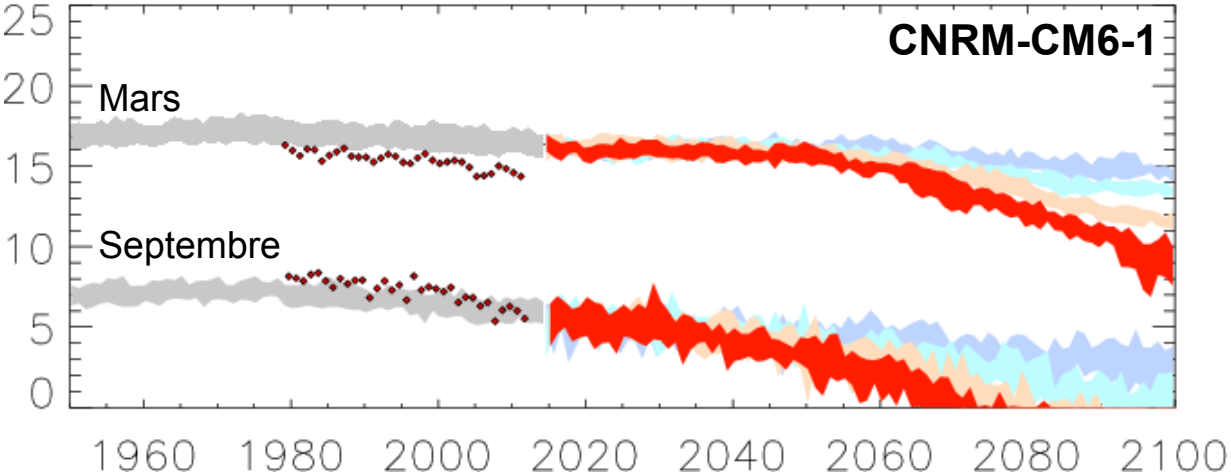


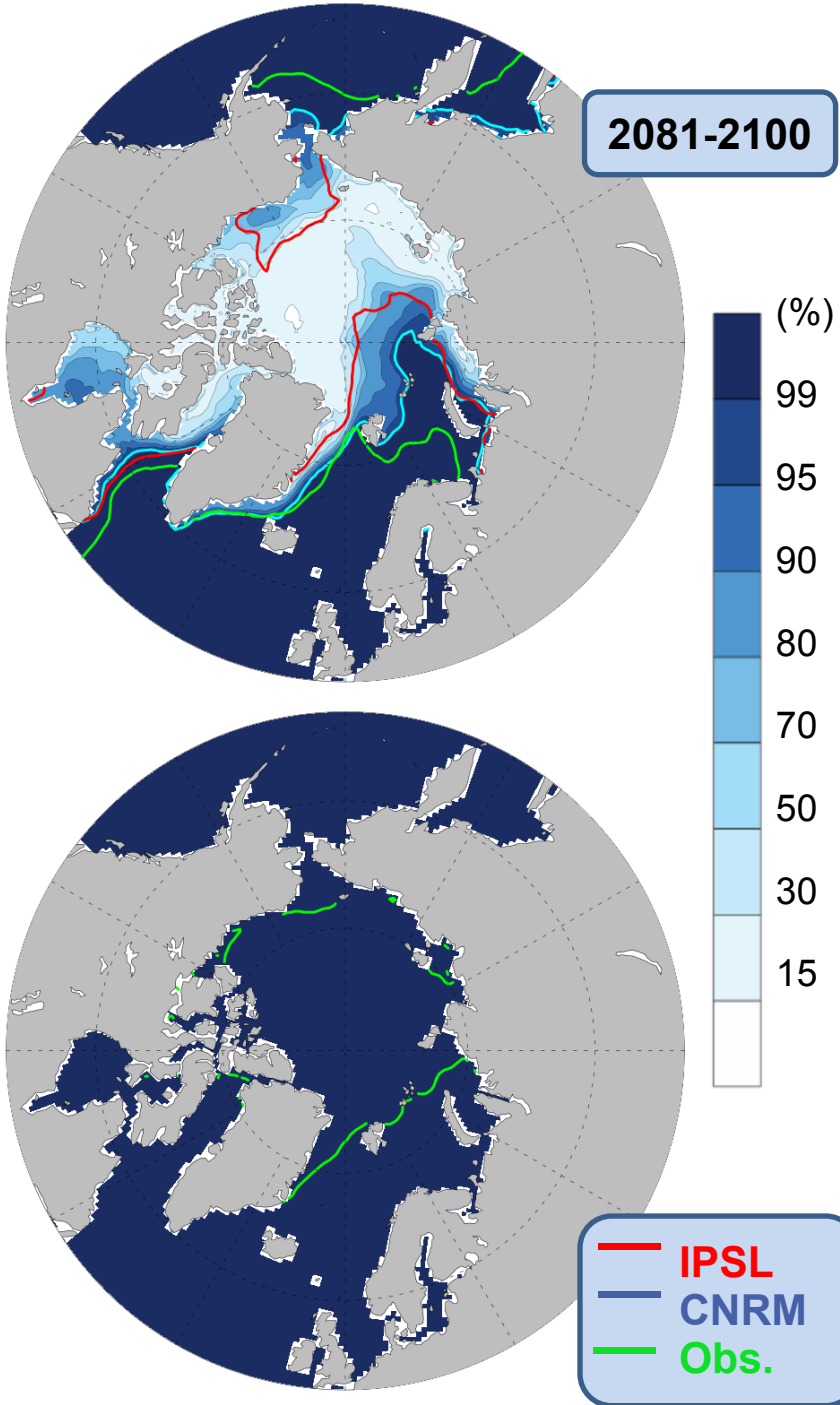
Évolution de la banquise Arctique – SSP5 8,5



Extension des glaces (millions de km²)

- Historique
- SSP1 2,6
- SSP2 4,5
- SSP3 7,0
- **SSP5 8,5**

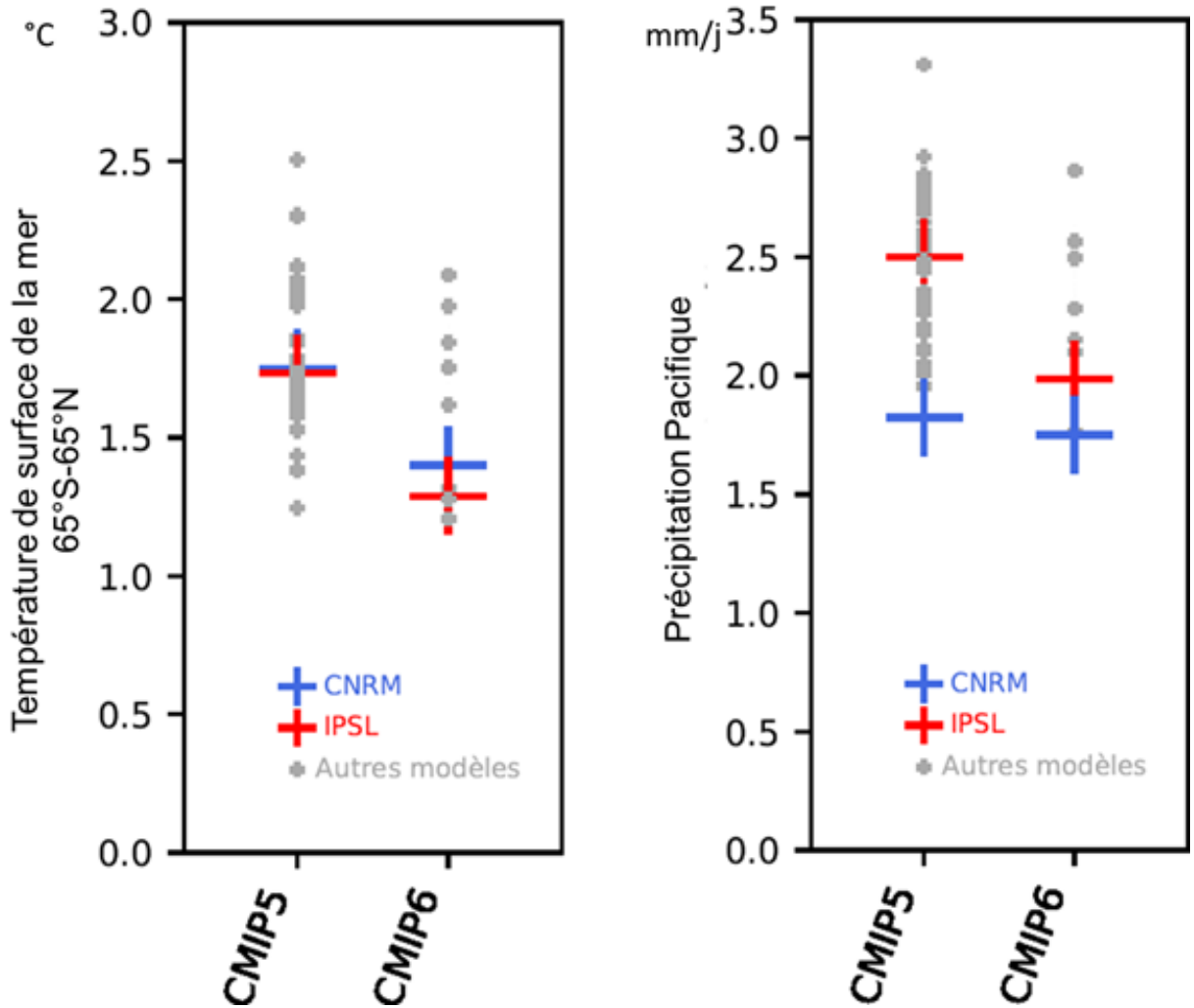




Les nouveaux modèles sont-ils plus fiables ?

Meilleure représentation de nombreux aspects du climat aux échelles globales et régionales

Deux exemples de la mesure intégrée de l'écart aux observations tenant compte de la structure spatiale et de l'amplitude des variables simulées



Moins bon

Meilleur

Depuis 80 ans, nos connaissances bâtissent de nouveaux mondes

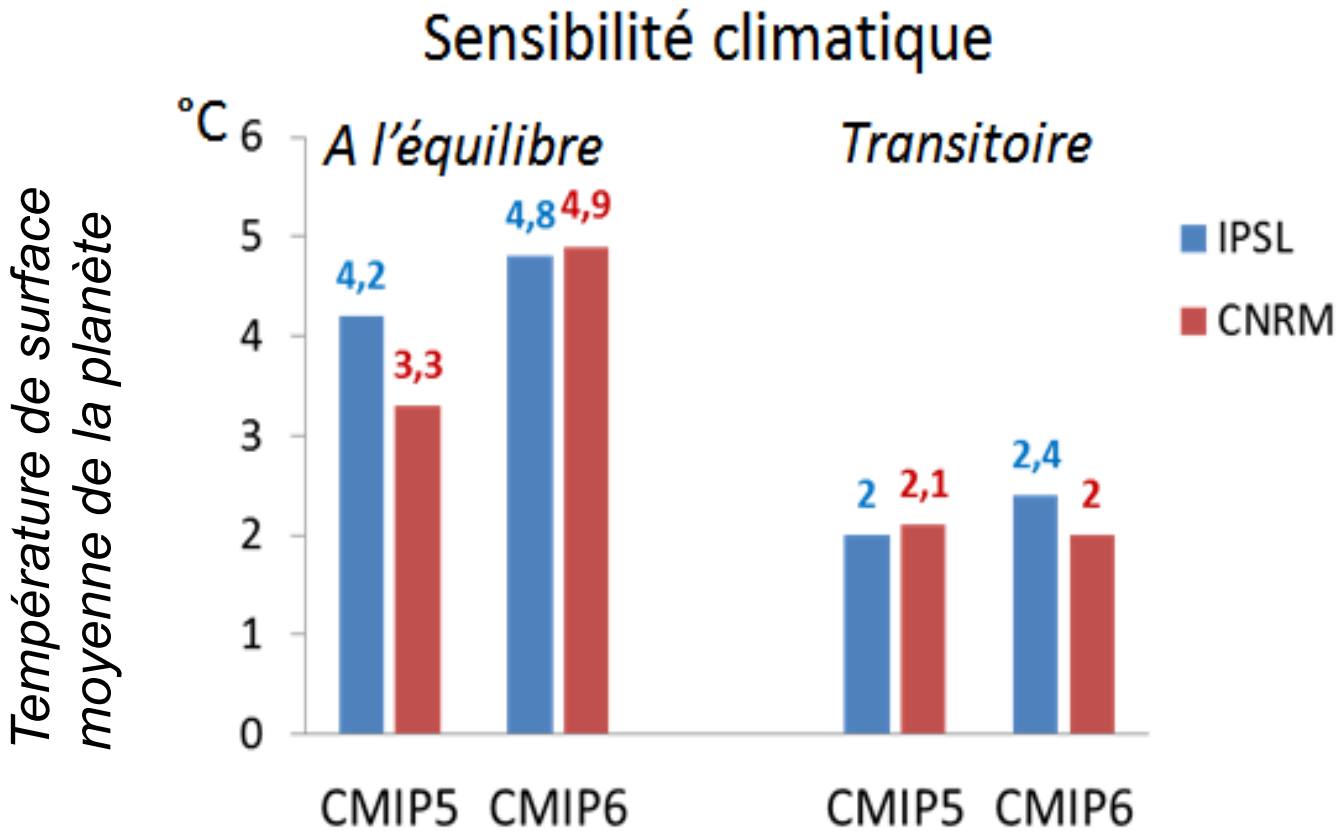
Réponse des modèles à un doublement du CO_2

A l'équilibre :

$2xCO_2$ dans l'atmosphère → Changement de température ?

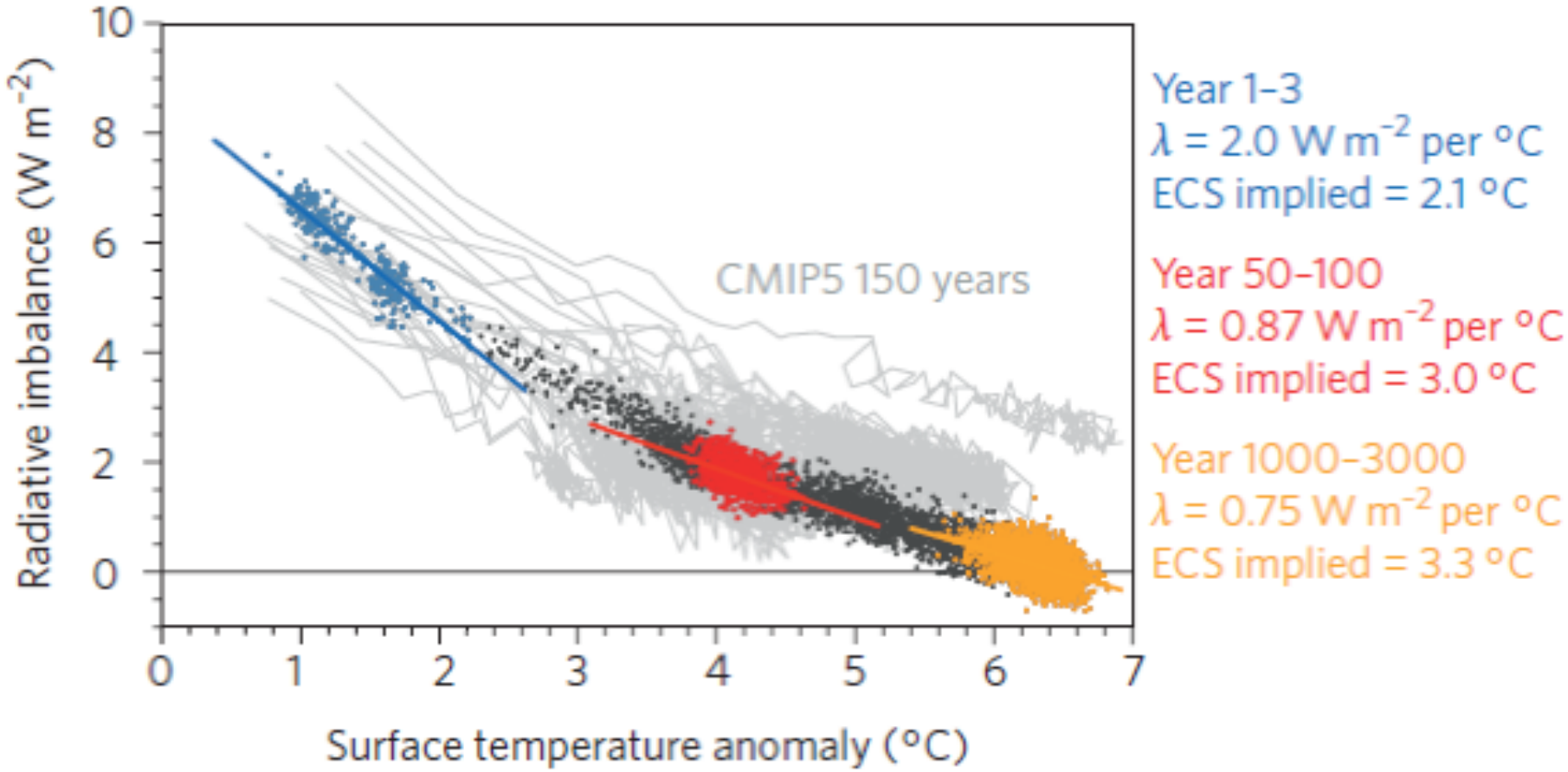
Transitoire :

+1%/an de CO_2 dans l'atmosphère → Changement de température après 70 ans ($2xCO_2$) ?



Depuis 80 ans, nos connaissances bâtissent de nouveaux mondes

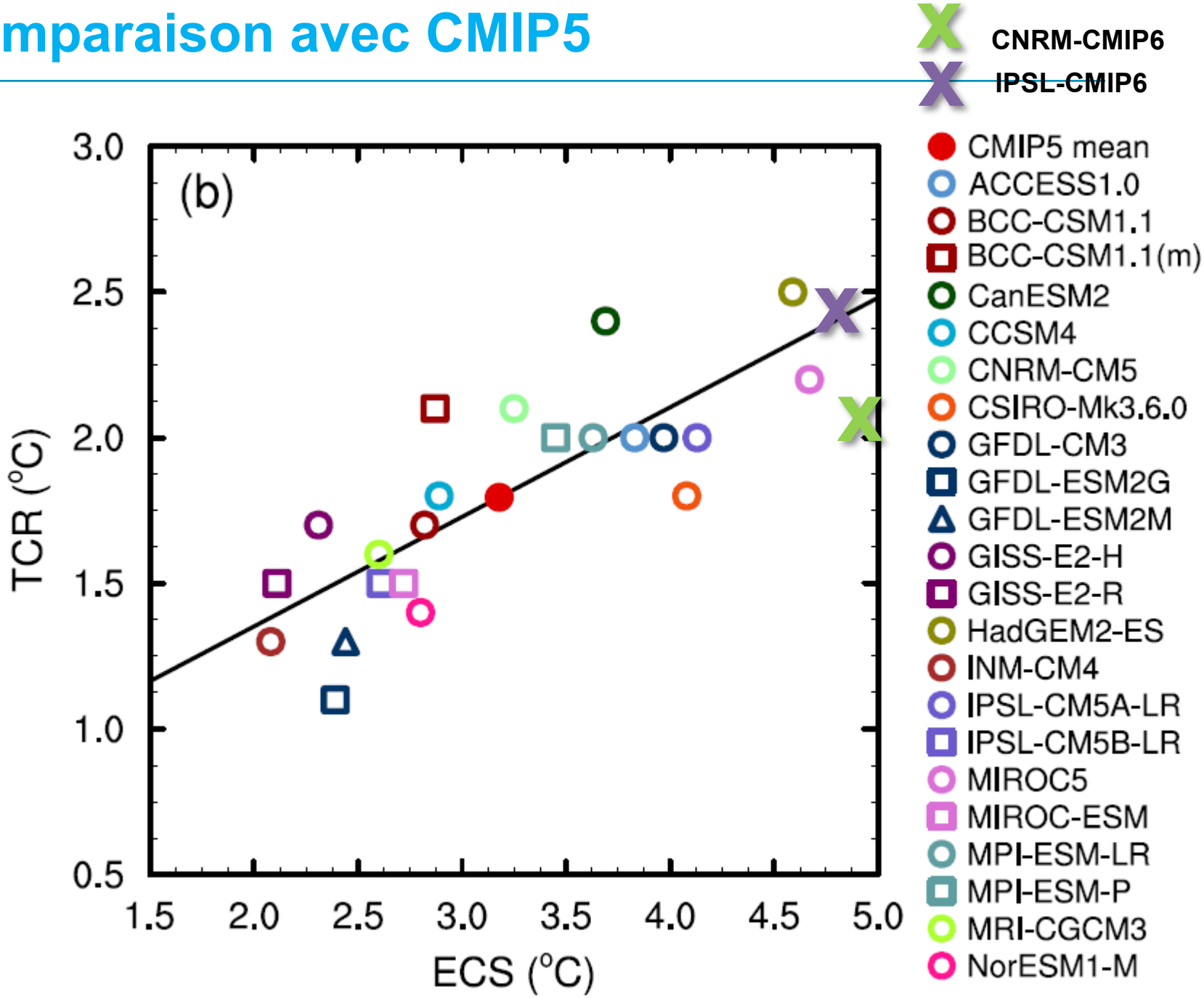
Estimation de la sensibilité climatique



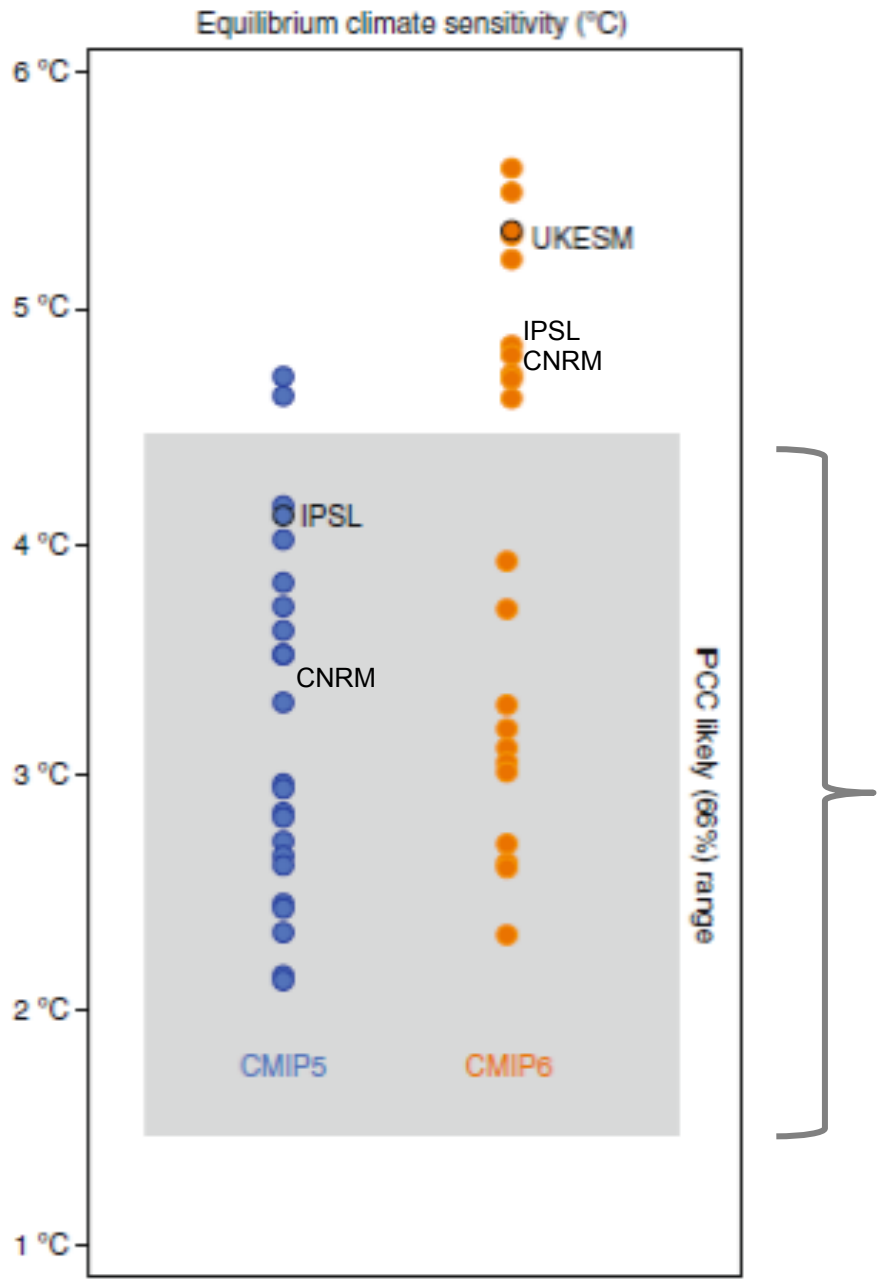
Knutti et al. Ngeo 2017

Depuis 80 ans, nos connaissances bâtissent de nouveaux mondes

Comparaison avec CMIP5



Depuis 80 ans, nos connaissances bâtissent de nouveaux mondes



Estimation à partir de différentes sources

- Études de processus
- Climat du 20eme siècle
- Climat du dernier millénaire
- Paléoclimats

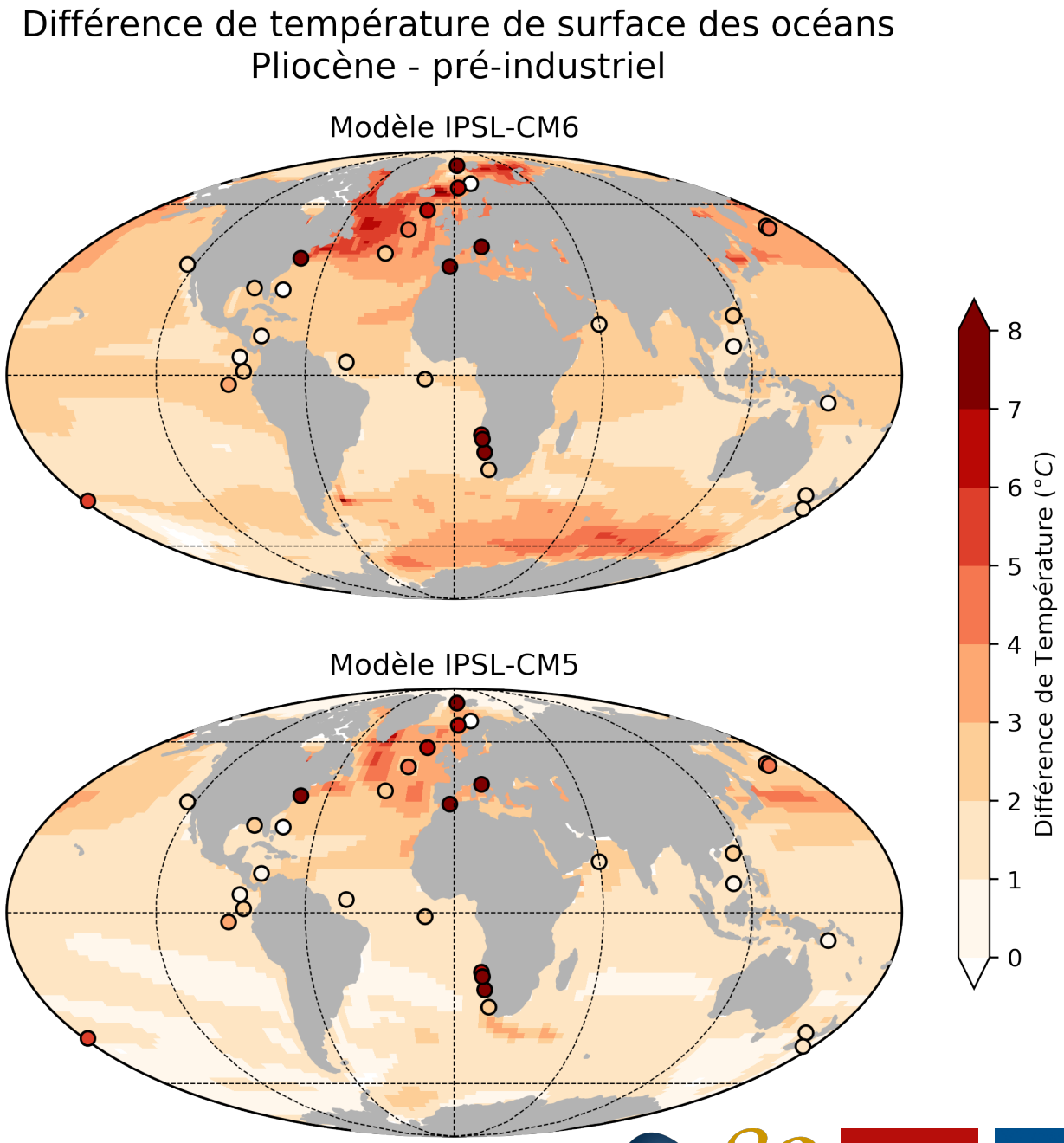
Forster et al. NCC 2020

Depuis 80 ans, nos connaissances bâtissent de nouveaux mondes

Les nouveaux modèles sont-ils plus fiables ?

Le verdict des paléoclimats :
il y a 3,3 Ma (400 ppm de CO_2)

Meilleure représentation du réchauffement et de l'amplification polaire

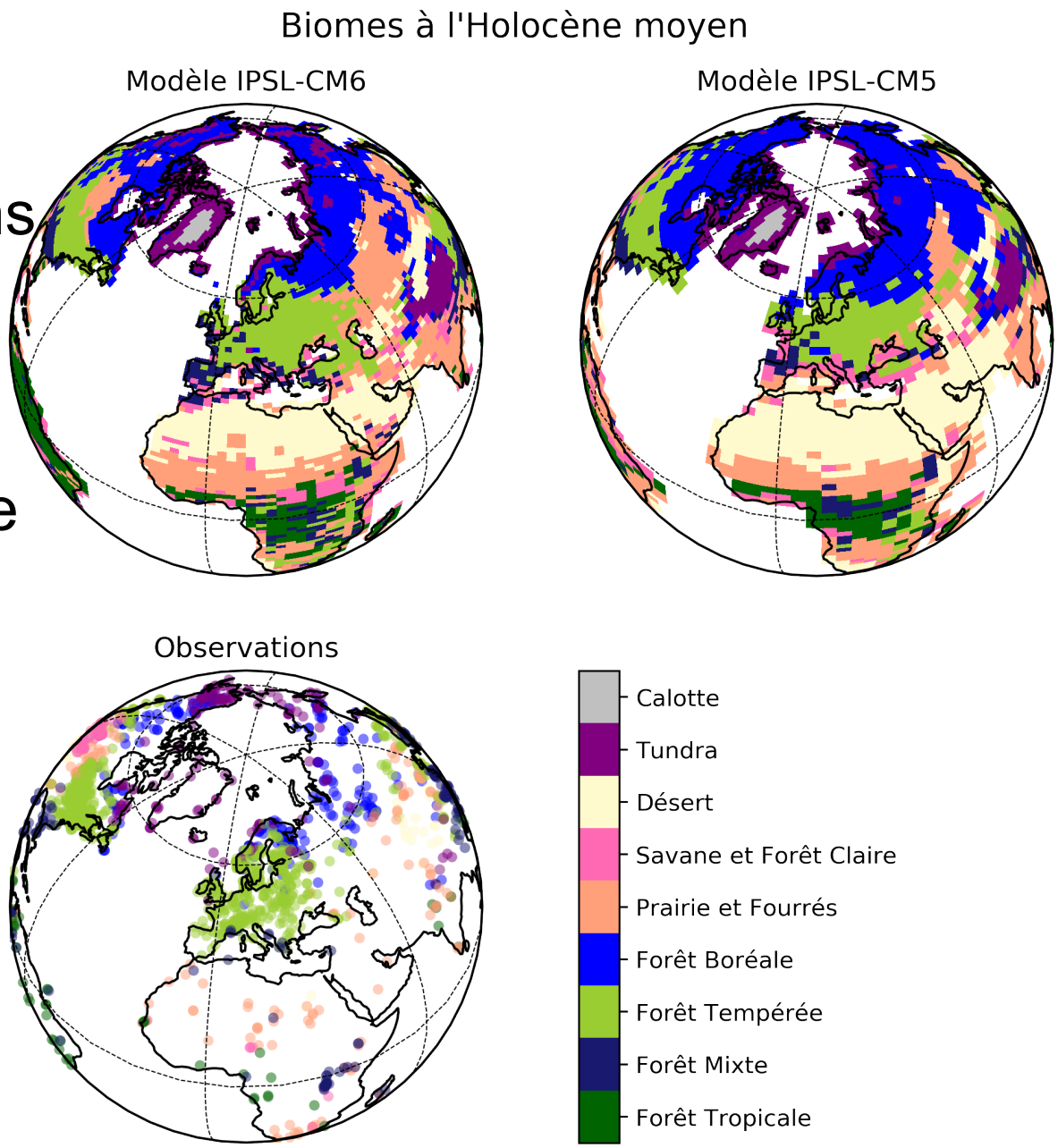


Depuis 80 ans, nos connaissances bâtissent de nouveaux mondes

Vers les services climatiques : lien climat-environnement

Ex végétation il y a 6000 ans

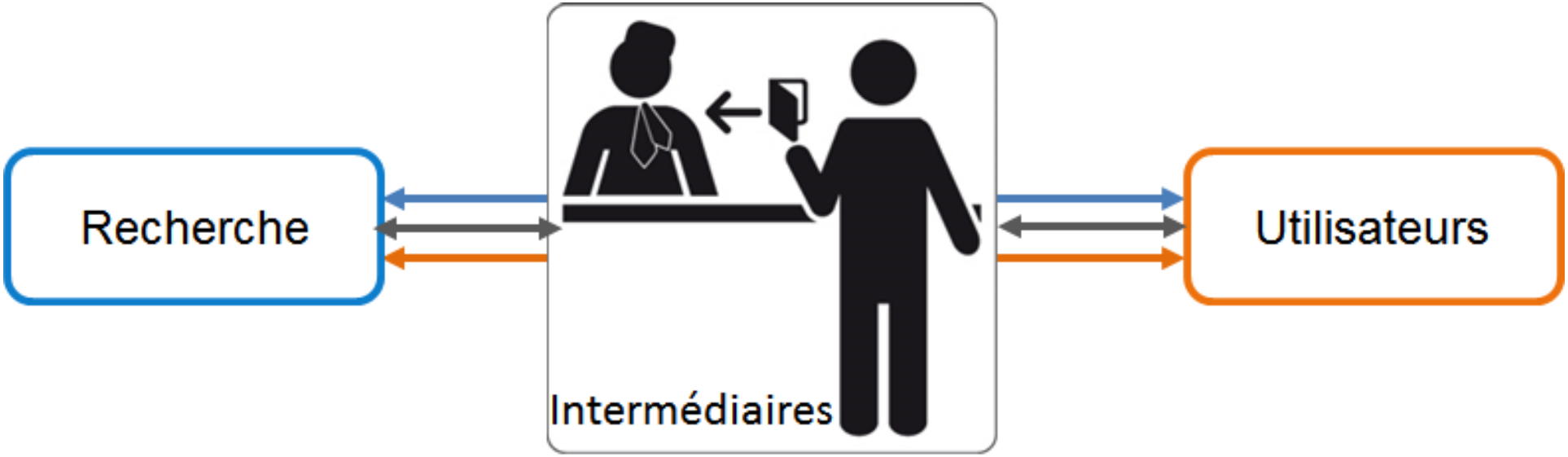
Meilleure représentation de
- l'extension de la forêt tempérée vers le nord de l'Europe
- la végétation accrue au Sahara Sahel



Depuis 80 ans, nos connaissances bâtissent de nouveaux mondes

Vers les services climatiques

- Plateforme d'analyse commune (accès aux simulations, observations et méthodes d'analyse)
- Analyses et projets multidisciplinaires pour caractériser et comprendre les impacts du changement climatique
- Contributions aux services climatiques européen COPERNICUS (C3S) et français DRIAS



De la science à la prise de décision et l'action pour faire face au changement climatique