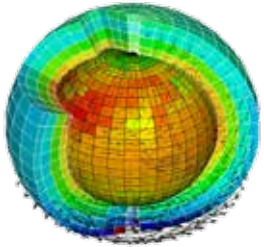
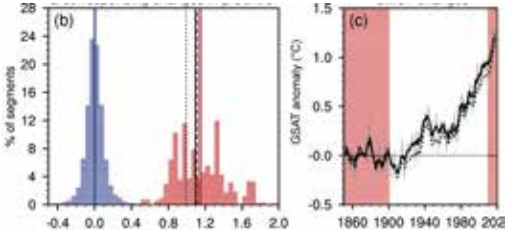
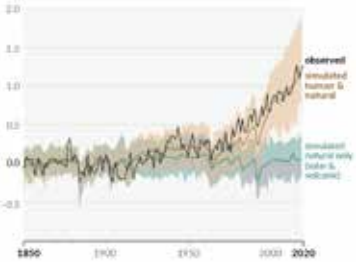
Chaire *Avenir Commun Durable*

Les modèles de climat sont-ils fiables ?

François-Marie Bréon



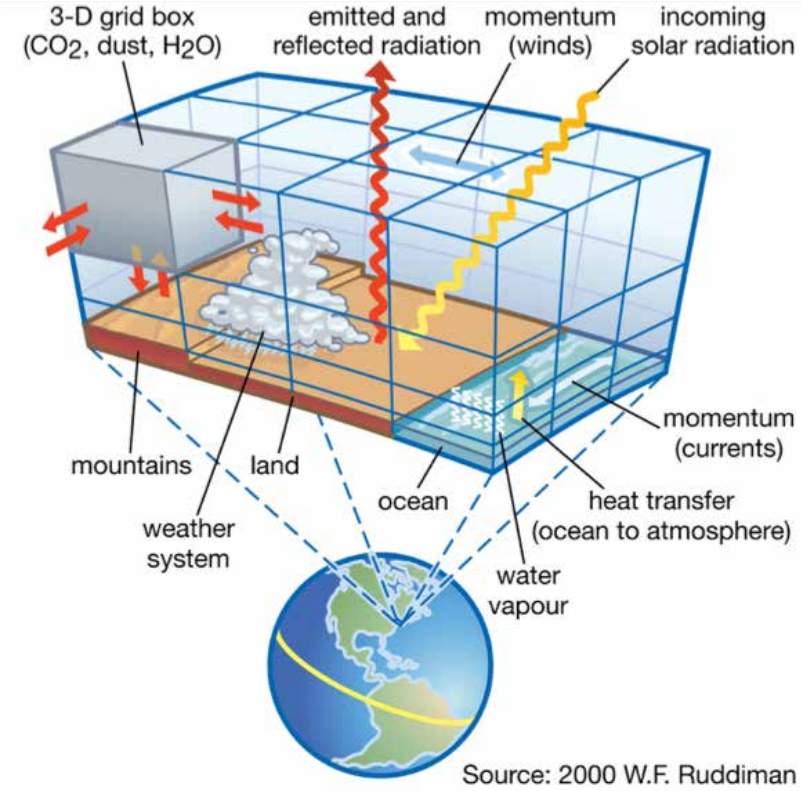




Les modèles de climat

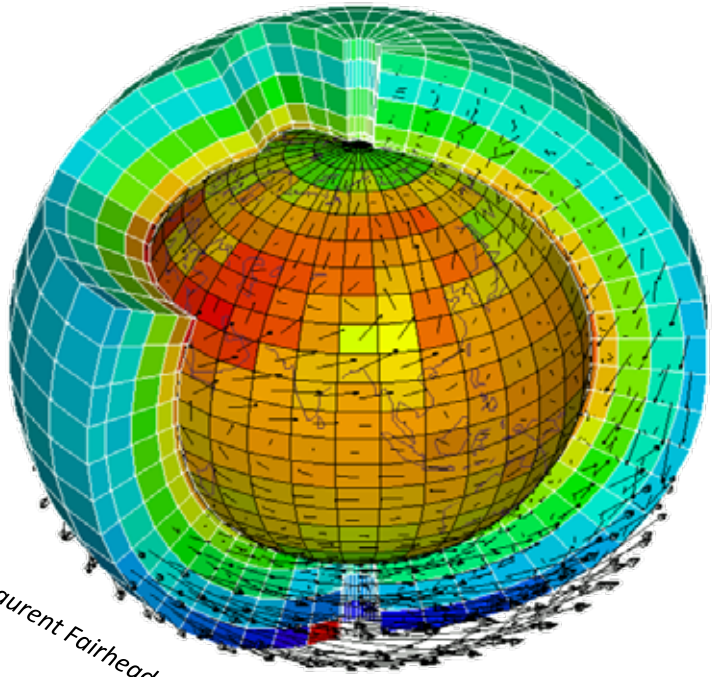
Objectifs :

- Simuler les processus climatiques
- Evaluer notre compréhension du climat
- Calculer des trajectoires « possibles »
- Evaluer l'impact des forçages et rétroactions

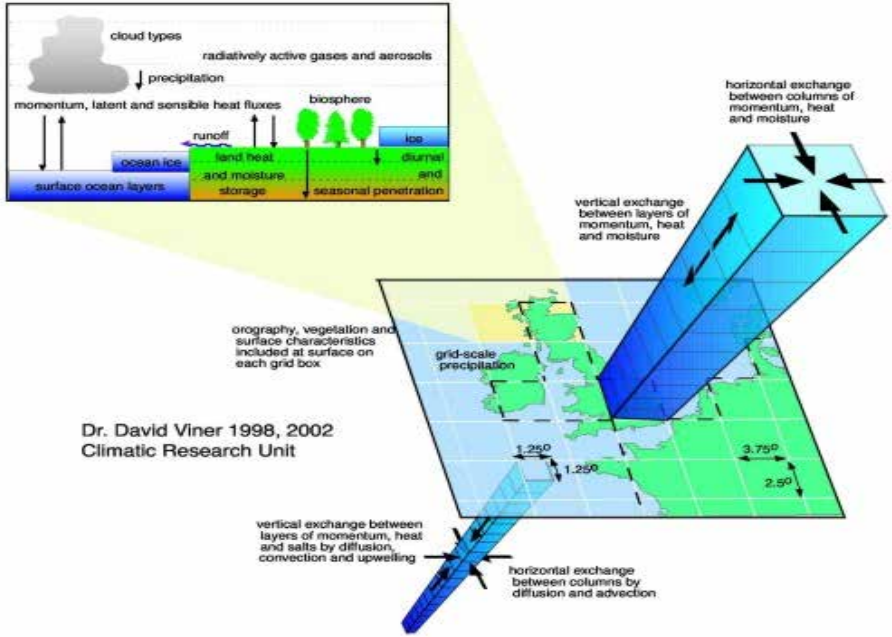


Des processus physiques

Dynamique des fluides : Circulation atmosphère et océan
Echanges radiatif : Absorption et réflexion du rayonnement solaire
Echanges matière et énergie : Evaporation, conduction, convection



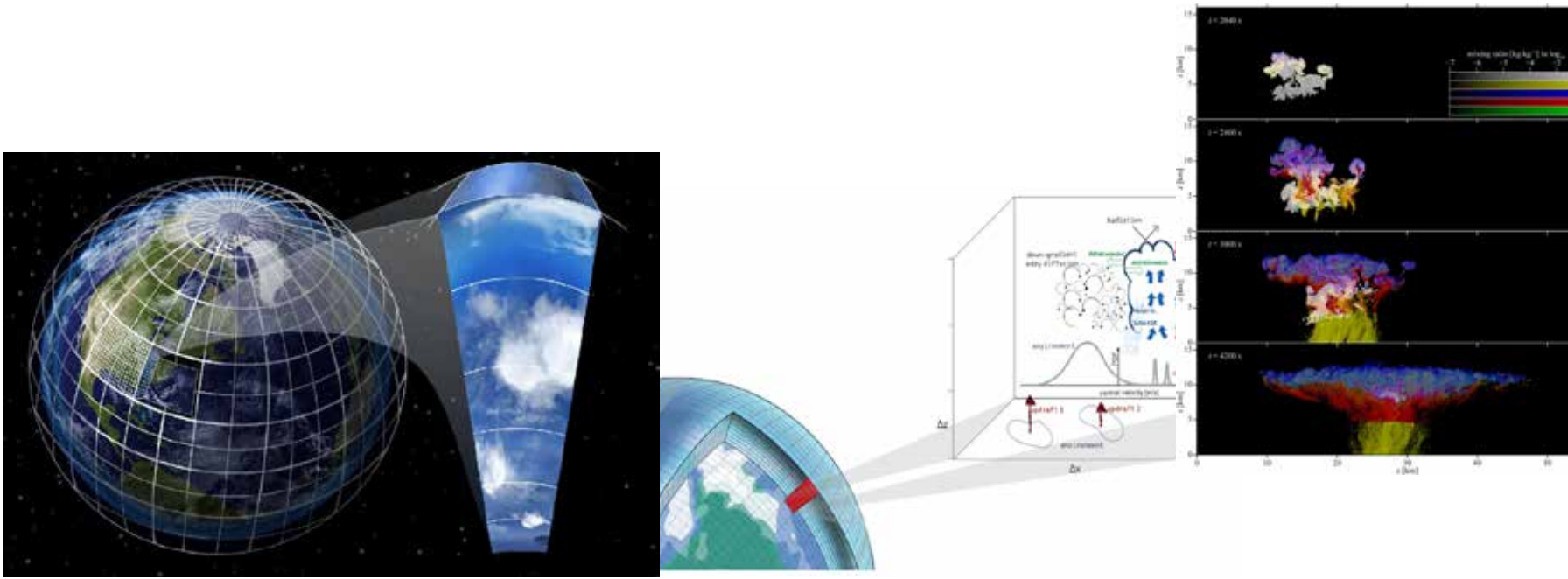
© Laurent Fairhead, LMD



Des processus “sous maille”

La maille du modèle est de l’ordre de 100 km. De nombreuses variables climatiques varient à plus fine échelle, souvent avec des interactions non-linéaires

=> Nécessité de modéliser (« paramétriser ») les processus sous grille

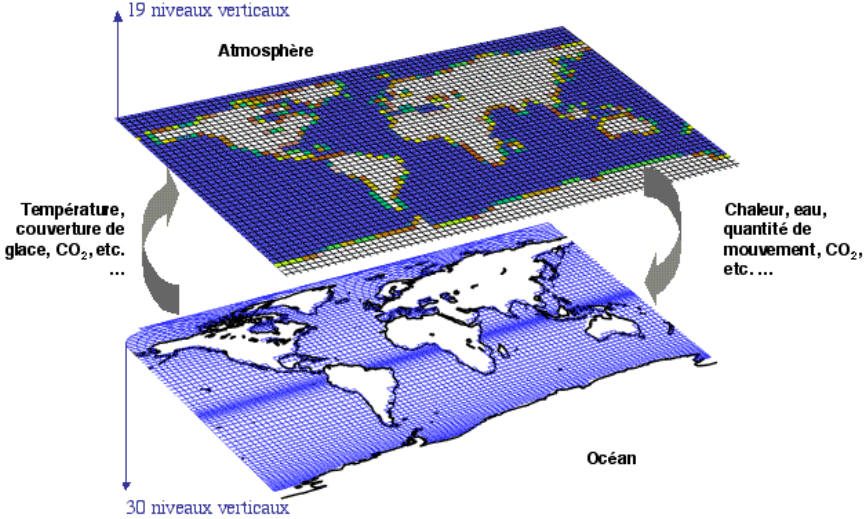


Interfaces

Nécessité de coupler océan et atmosphère, qui ont des échelles de temps caractéristiques différentes

De même pour atmosphère et terre pour les précipitations, l'eau dans le sol et l'écoulement des fleuves

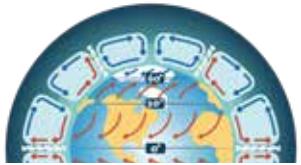
De même pour glace de mer et impact sur l'albédo et échanges océan/atmosphère



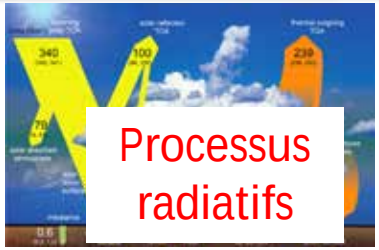
Modèle « Système Terre »

Chimie + Aérosols

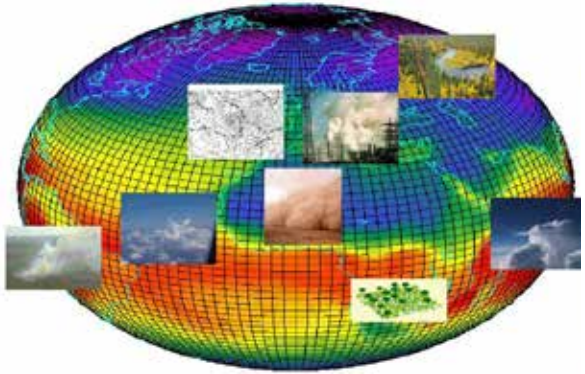
Nuages et précipitations

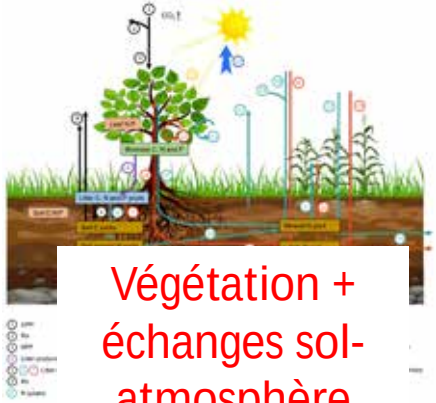


Circulation atmosphérique

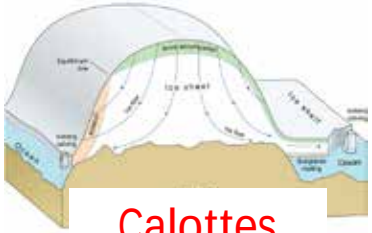


Processus radiatifs





Végétation + échanges sol-atmosphère



Calottes polaires

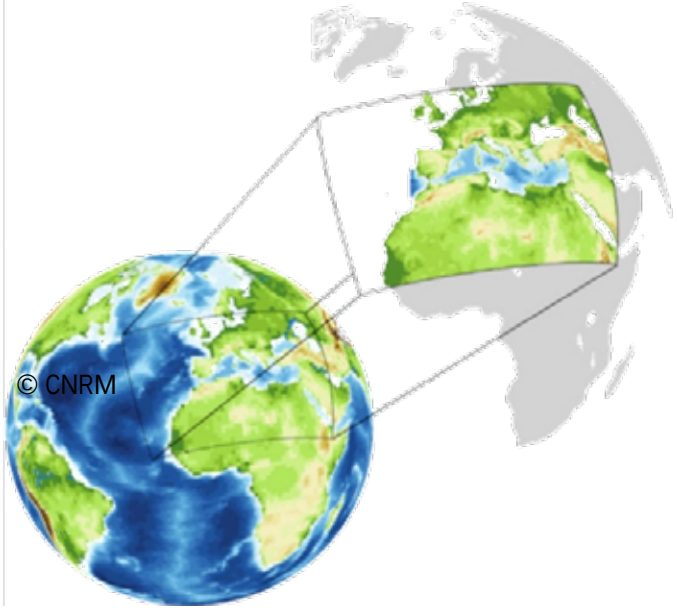
Banquise

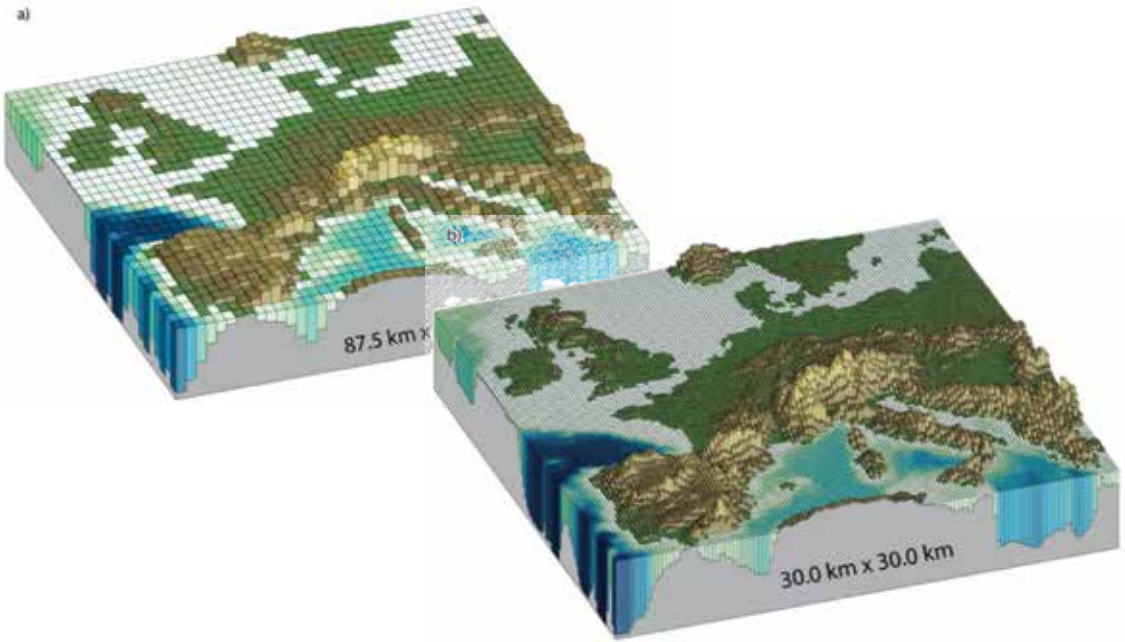
Circulation océanique

Biochimie marine

Régionalisation des simulations globales

On utilise les simulations globales du climat pour “forcer” les conditions limites de modèles régionaux à fine échelle.
Permet de mieux résoudre les effets locaux du changement climatique





Climat et chaos

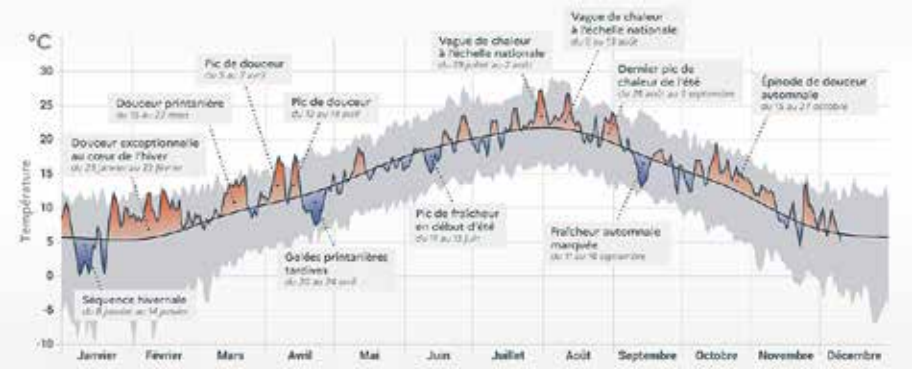
"L'atmosphère est chaotique; il est donc impossible de prévoir le climat au-delà de 2 semaines"

"On n'est pas capable de prévoir la météo à 10 jours, comment peut on espérer prévoir le climat à 100 ans"

Le caractère chaotique de la circulation atmosphérique interdit la prévision pour un jour donné. Il ne dit rien sur la possibilité d'estimer des moyennes, et l'évolution de ces moyennes en conséquence d'un forçage.

Exemple : Cycle saisonnier

La variabilité naturelle s'ajoute à l'impact des forçages



Les modèles de climat dans le monde

Modèles de climat qui ont participé à l'exercice CMIP-6

Une trentaine de modèles de climat ont été développés dans le monde de manière relativement indépendante

A chaque fois, plusieurs versions du modèle

En France : IPSL et Meteo-France (CNRM)

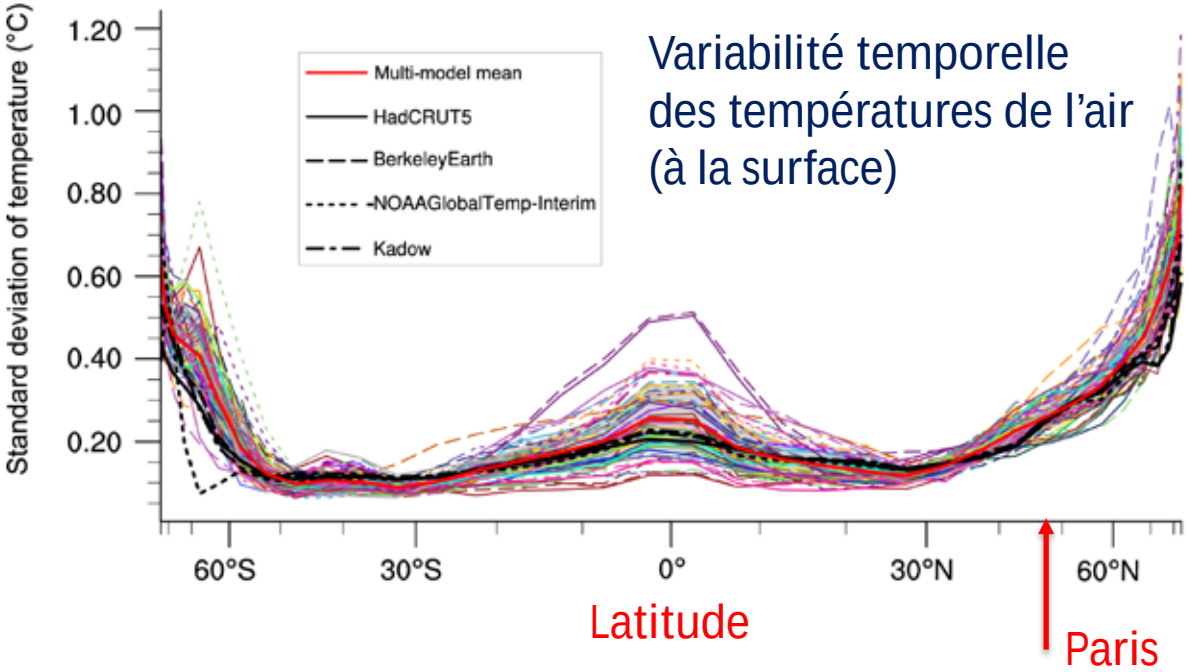
Les expériences CMIP-6

model	# of activities	AerChemMIP	C4MIP	CDRMIP	CFMIP	CMIP	DAMIP	DCPP	FAFMIP	GMMIP	GeoMIP	HighResMIP	ISMIP6	LS3MIP	LUMIP	OMIP	PAMIP	PMIP	RFMIP	ScenarioMIP	VolMIP
# of models	485	49	20	13	16	75	24	17	11	17	8	41	2	13	21	25	13	21	33	60	6
IPSL-CM5A2-INCA	4	1422				2043									307					972	
IPSL-CM6A-ATM-HR	1											249									
IPSL-CM6A-ATM-ICO-HR	1											594									
IPSL-CM6A-ATM-ICO-LR	1																				
IPSL-CM6A-ATM-ICO-MR	1																				
IPSL-CM6A-ATM-ICO-VHR	1																				
IPSL-CM6A-ATM-LR-REPROBUS	1	211																			
IPSL-CM6A-LR	16	11454	830																	37819	
IPSL-CM6A-LR-INCA	3	2543																			
IPSL-CM6A-MR1	1																				
BCC-CSM2-HR	1																				
BCC-CSM2-MR	9		513		1029	2139	1472	36288		241				40	863					890	
BCC-ESM1	2	4405				1635															
CAMS-CSM1-0	5	153				768				183		63								766	
CAS-ESM2-0	6	300		58		1329			136							69				1185	
CESM1-1-CAM5-CMIP5	1							382329													
CESM1-CAM5-SE-HR	1											345									
CESM1-CAM5-SE-LR	1											377									
CESM1-WACCM-SC	1																96647				
CESM2	15		2561	136	4051	19263	6456		1407	294			958	1165	6597	1546	121300	1070	808	8451	
CESM2-FV2	3					8814												89		701	
CESM2-WACCM	5	6722				7200					3322								222	14479	
CESM2-WACCM-FV2	2					7727												115			
CIESM	3					863				144										355	
CMCC-CM2-HR4	3					670						538				106					
CMCC-CM2-SR5	6	355				5665	5850	452212								236				1436	
CMCC-CM2-VHR4	1											538									
CMCC-ESM2	7	441	589			1714								970	1684	202				2193	
CNRM-CM6-1	14	1950			3939	13530	5131	87851		832		6953		1494	153	116	151059	172	1028	6120	
CNRM-CM6-1-HR	6	227				1352				107		5111				55				933	
CNRM-ESM2-1	12	12206	3290	903		14473		13675		181	2444			904	2808	136			1266	18311	
CanESM5	16	15561	5345	4476	2976	30836	79896	359700	2745	2140	1148				3104	274	204300		3668	85761	17090
CanESM5-1	3	6160				19746														19968	
CanESM5-CanOE	6	894	1399	648		2864										185				3578	

Plusieurs expériences proposées permettant d'évaluer des processus climatiques ou des rétroactions dans les modèles

Représentation de la variabilité temporelle

Moyenne mensuelle et zonales (par bande de latitude) de la température. Quelle variabilité inter-annuelle ?



Variabilité temporelle des températures de l'air (à la surface)

Les modèles reproduisent correctement, mais pas parfaitement, la variabilité des températures (plus faible aux tropiques; un peu plus forte à l'équateur, et forte au hautes-latitudes)

Certains modèles font mieux que d'autres => hiérarchie

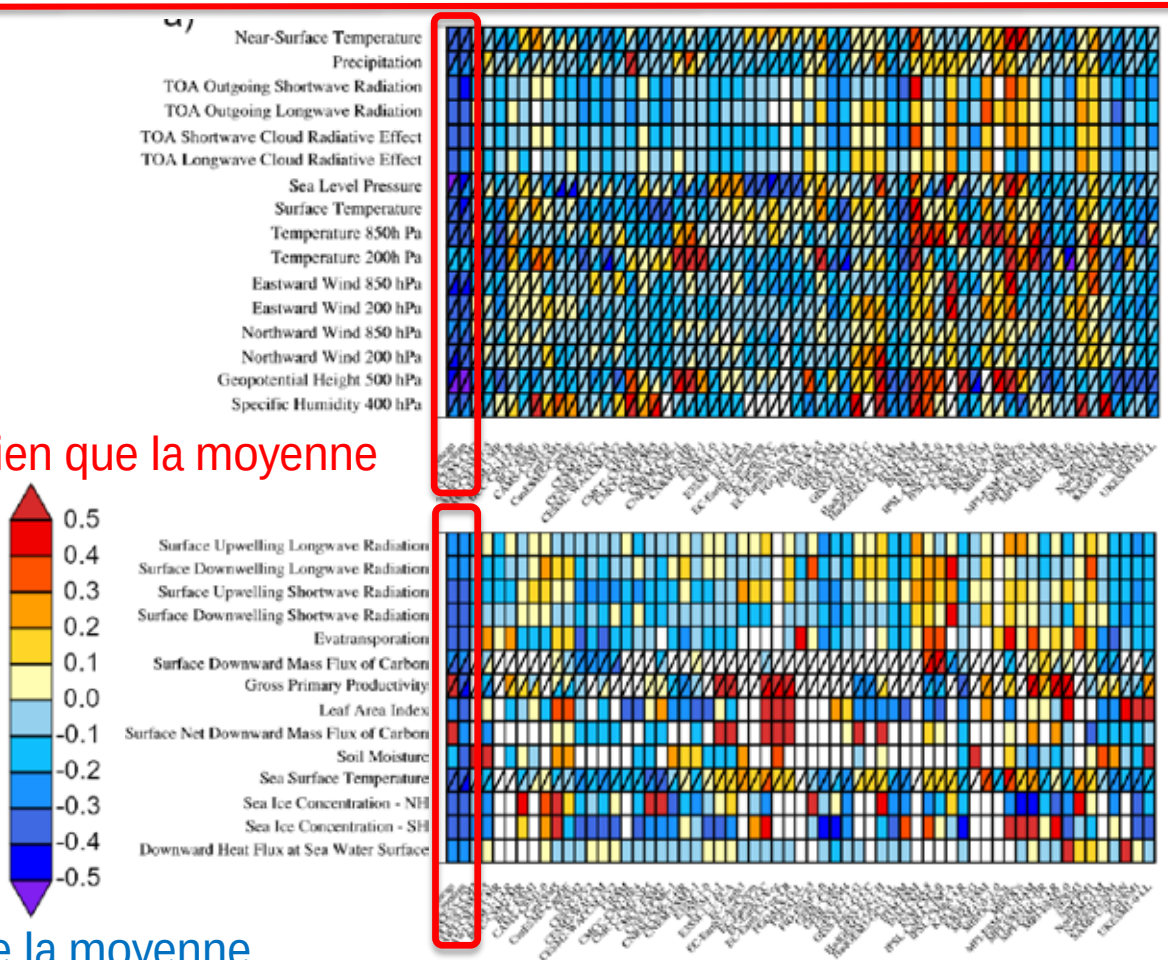
Modèles évalués sur le climat présent

On compare les simulations pour le présent aux distributions spatiales de nombreuses variables climatiques.

Permet de quantifier la capacité des modèles à simuler correctement le climat d'aujourd'hui

Les statistiques sont comparées à la moyenne des modèles

Sur ce plan, le « meilleur » modèle est la moyenne (ou le médian) de tous les modèles

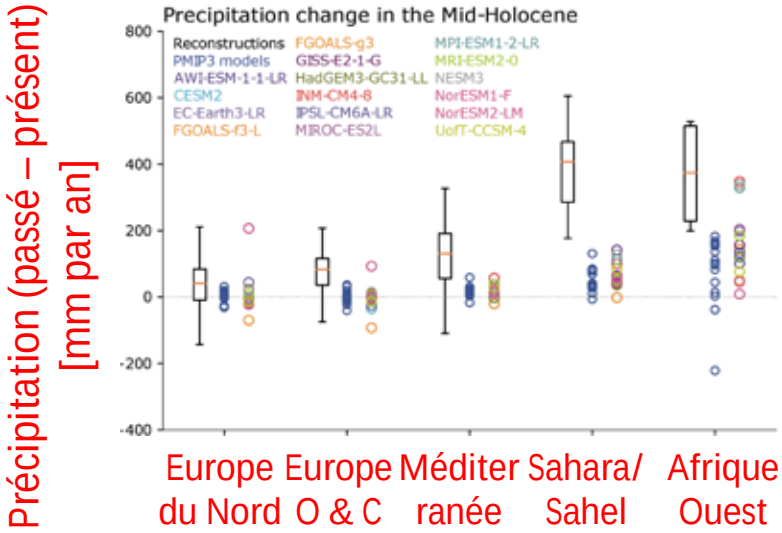


Comparaison aux climats du passé

On peut évaluer la capacité des modèles de climat à représenter des climats du passé pour lesquels on a des informations déduites des enregistrements géologiques (proxies)

Exemple : Le « Sahara Vert » du début de l'Holocène

Il y a ≈6000 ans

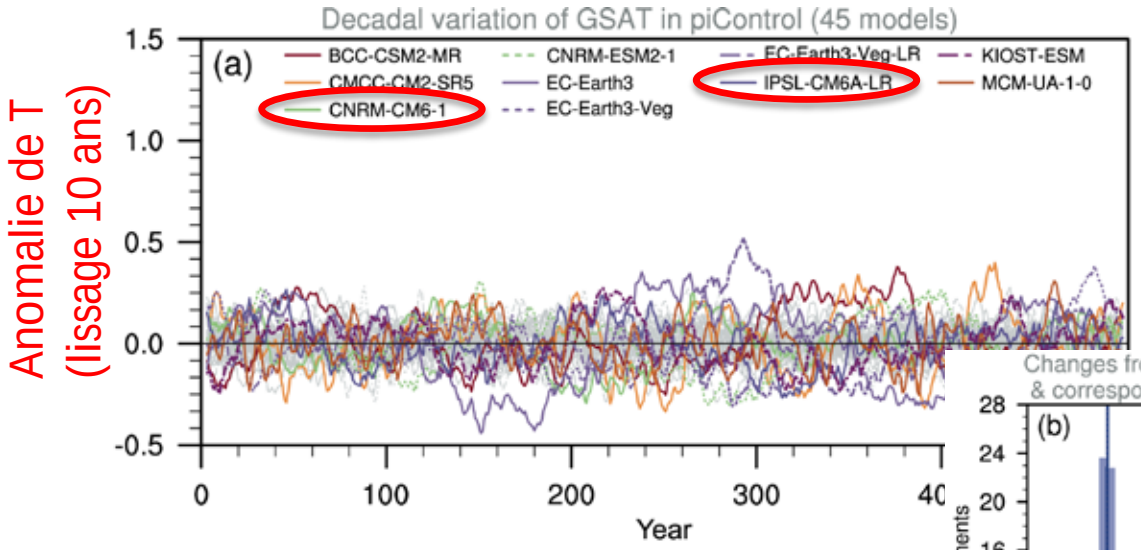


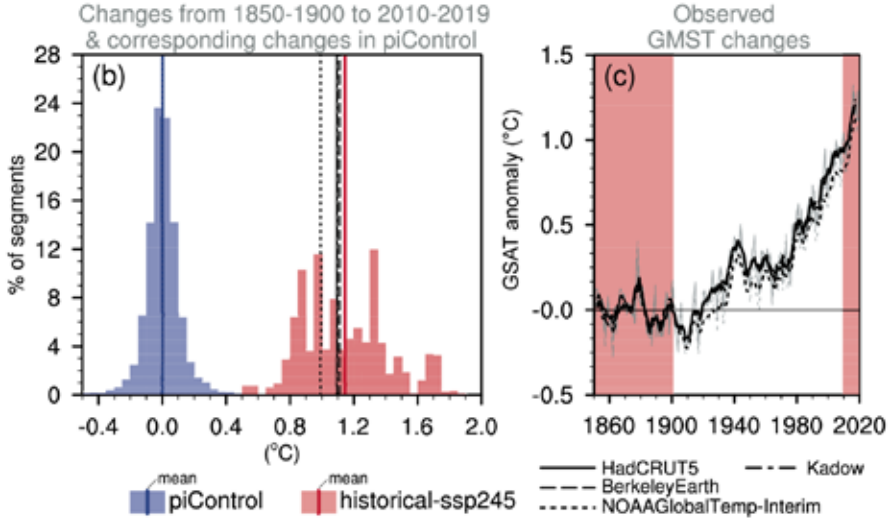
Les modèles de climat reproduisent bien le fait que les précipitations étaient plus abondantes à cette époque sur le Sahel et l'Afrique de l'Ouest, mais amplitude trop faible

La cause première de cette évolution climatique est la précession des équinoxes

Une variabilité “naturelle” ?

Modèles laissé “libres”, sans évolution des forçages, pendant 500 ans





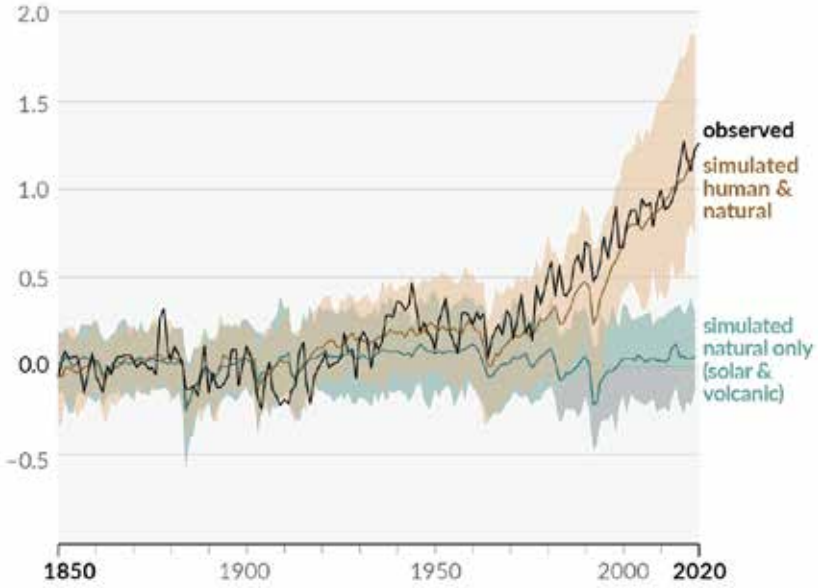
Selon les simulations, la variabilité “naturelle” conduit à 0,1-0,2°C entre 2010-2019 et 1850-1900

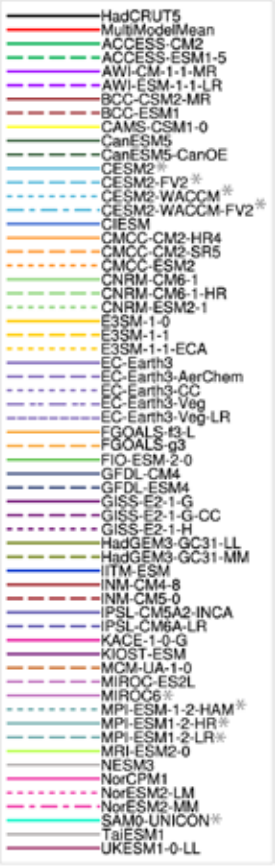
Le réchauffement n’est clairement « pas naturel »

Mais dispersion significative, au-delà de la variabilité naturelle du climat

Comparaison aux observations

Les modèles de climat reproduisent bien, en moyenne, les variations de la température moyenne sur la période historique





Les modèles n'ont-ils pas été ajustés pour reproduire le passé ?
Qu'en est il des projections faites dans le passé ?

Hansen et al, 1981

Climate Impact of Increasing Atmospheric Carbon Dioxide

J. Hansen, D. Johnson, A. Lacis, S. Lebedeff
P. Lee, D. Rind, G. Russell

28 August 1981, Volume 213, Number 4511

SCIENCE

Plusieurs scénarii sur l'évolution des émissions de CO_2 (projections faites avant le développement de la Chine…)

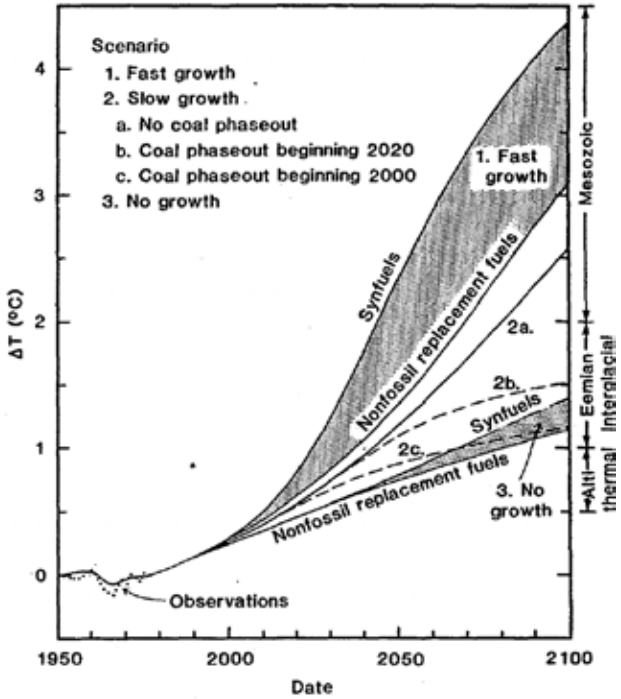
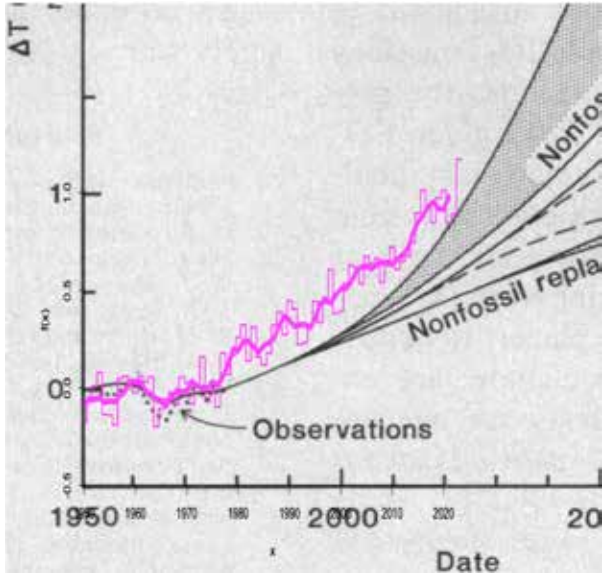


Fig. 6. Projections of global temperature. The diffusion coefficient beneath the ocean mixed layer is 1.2 cm^2 sec^{-1}, as required for best fit of the model and observations for the period 1880 to 1978. Estimated global mean warming in earlier warm periods is indicated on the right.



Hansen avait correctement anticipé le réchauffement avant que celui-ci ne débute vraiment.
Mais sous estimation des émissions

https://climate-dynamics.org/wp-content/uploads/2016/06/hansen81a.pdf

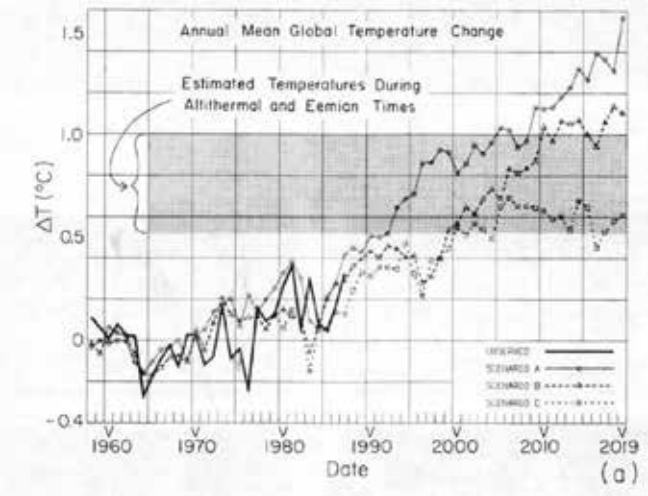
Hansen et al, 1988

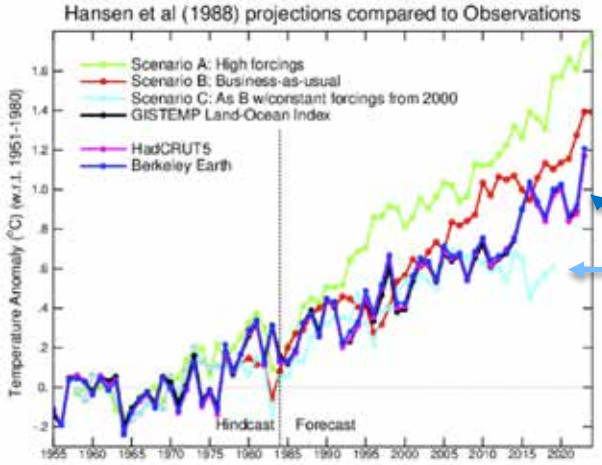
Global climate changes as forecast by Goddard Institute for Space Studies three-dimensional model

J. Hansen, I. Fung, A. Lacis, D. Rind, S. Lebedeff, R. Ruedy, G. Russell, P. Stone

First published: 20 August 1988 | https://doi.org/10.1029/JD093iD08p09341 | Citations: 705

Une des toutes premières simulations du climat. Anticipation du réchauffement global pour 3 hypothèses d'émissions





1955 1984 2020

Trois simulations

Observations (postérieures)

Nécessité de comparer le climat observé avec une simulation faite avec la bonne trajectoire d'émissions !

http://www.klimaskeptiker.info/download/1988_Hansen_etal.pdf

Revue de la littérature

Geophysical Research Letters

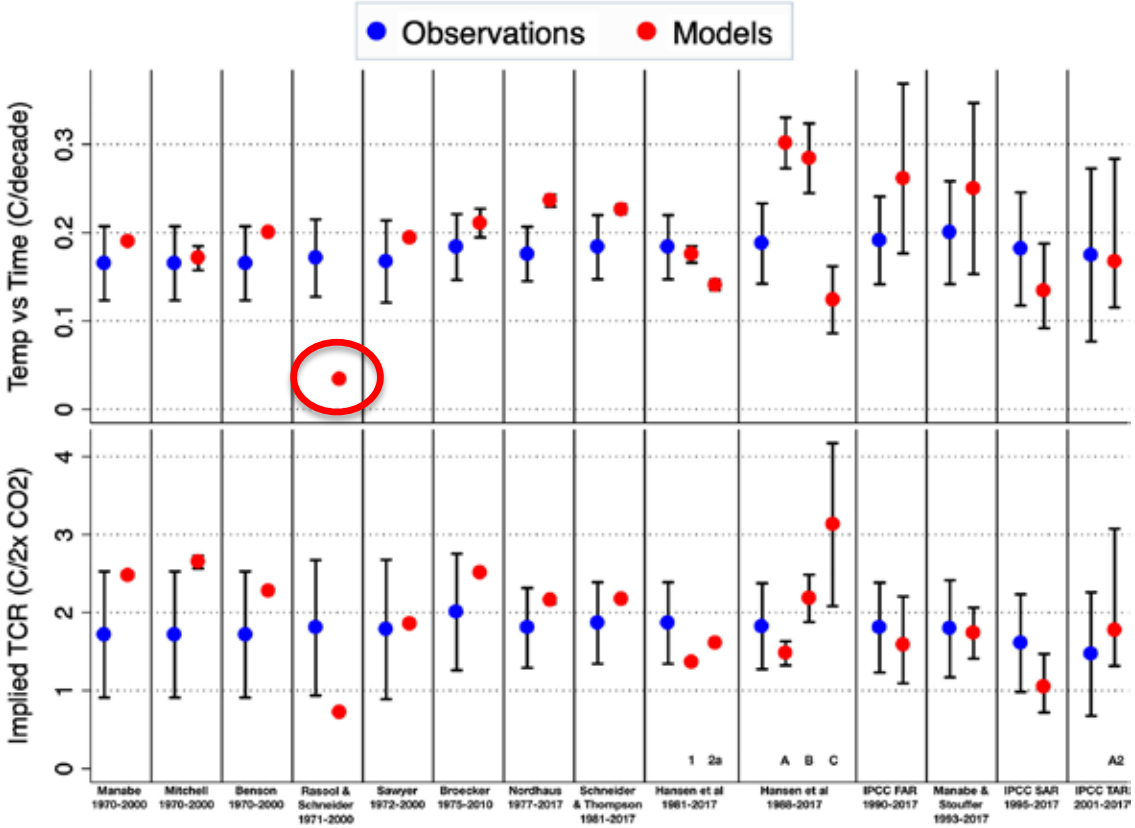
Research Letter | Free Access

Evaluating the Performance of Past Climate Model Projections

Zeke Hausfather, Henri F. Drake, Tristan Abbott, Gavin A. Schmidt

Les estimations faites dans les années 1970-1990 sont cohérentes avec les observations

Une exception, basée sur une hypothèse d'une très forte augmentation des aérosols atmosphériques

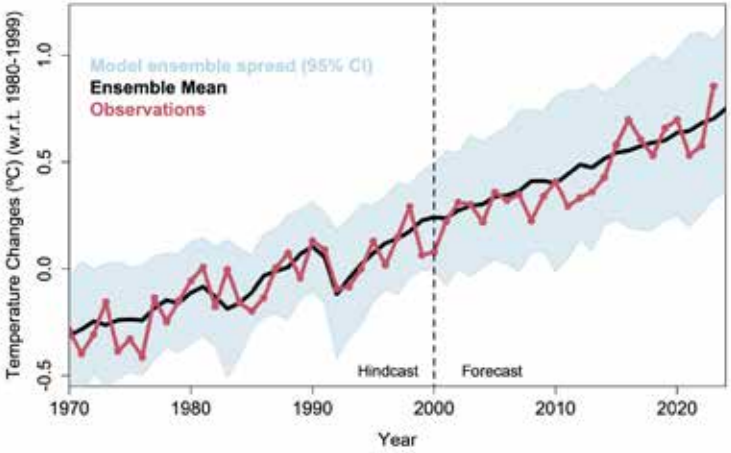


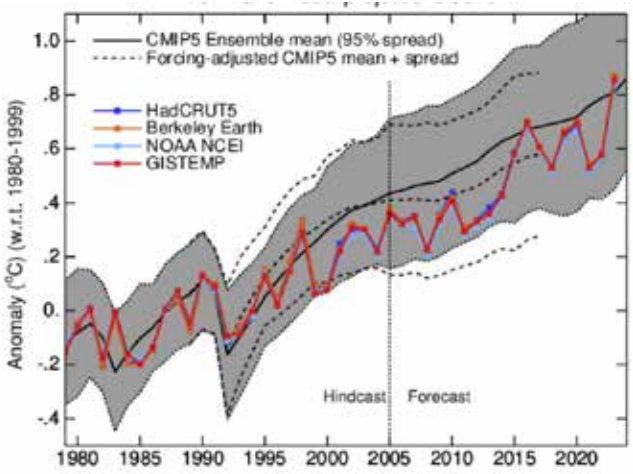
https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2019GL085378

Les projections GIEC du passé

Simulations faites au début des années 2000 (CMIP3), et publiées dans le cadre du 4ème rapport du GIEC (AR4, 2007).

Les observations confirment les simulations faites à l'époque





Simulations faites à la fin des années 2000 (CMIP5), et publiées dans le cadre du 5ème rapport du GIEC (AR5, 2013).

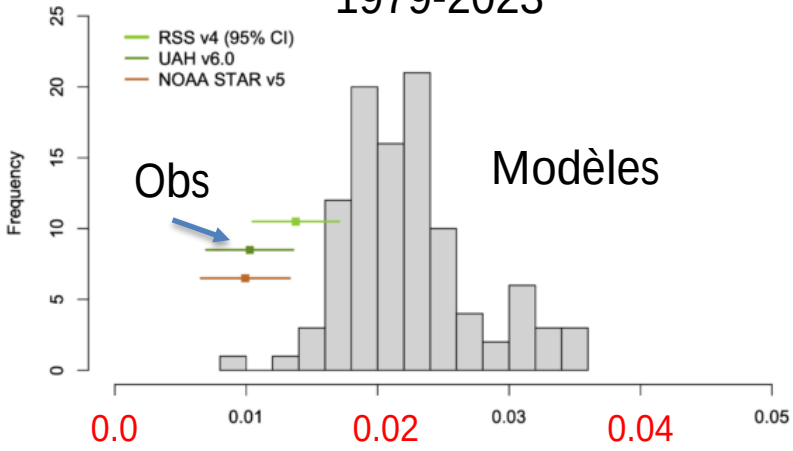
Les observations confirment les simulations faites à l'époque

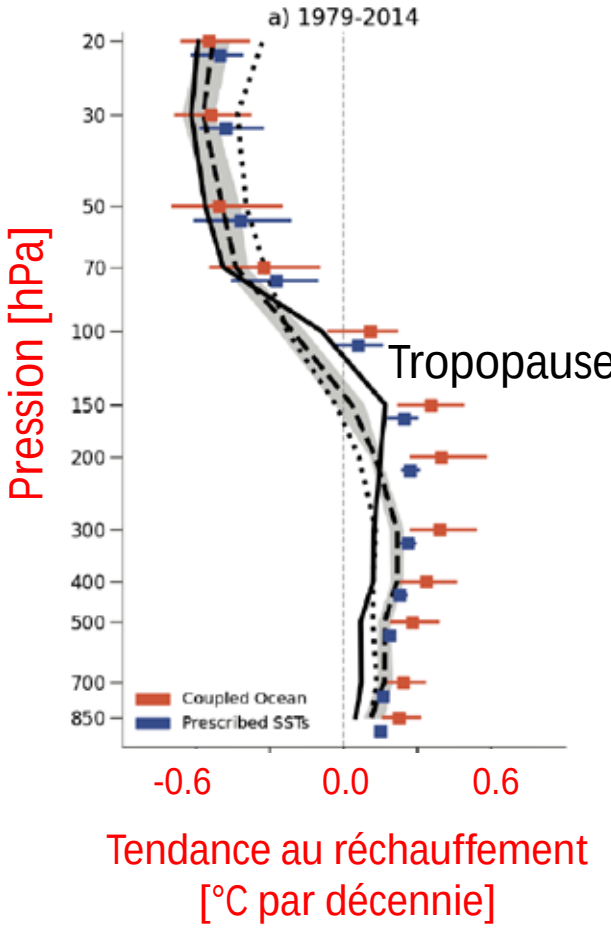
Pointillés : Correction sur les « forçages » (Solaire+volcans)

Des défauts identifiés

Dans la zone équatoriale (20S-20N), les modèles simulent un réchauffement de la moyenne atmosphère qui est nettement plus fort que ce qui est observé

Température moyenne troposphère tropicale 1979-2023





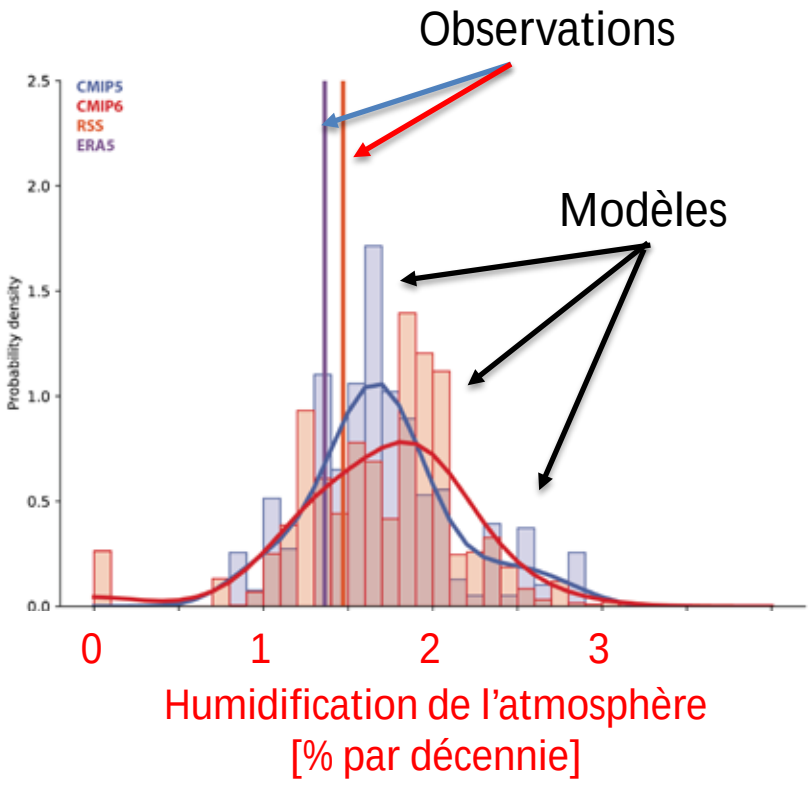
Humidification de l'atmosphère

Avec le réchauffement, on s'attend à une humidification de l'atmosphère

7% par °C ; 0.2 °C par décennie => ≈1,4% par décennie

Cohérent avec ce qui est observé.

La plupart des modèles indiquent une humidification plus rapide

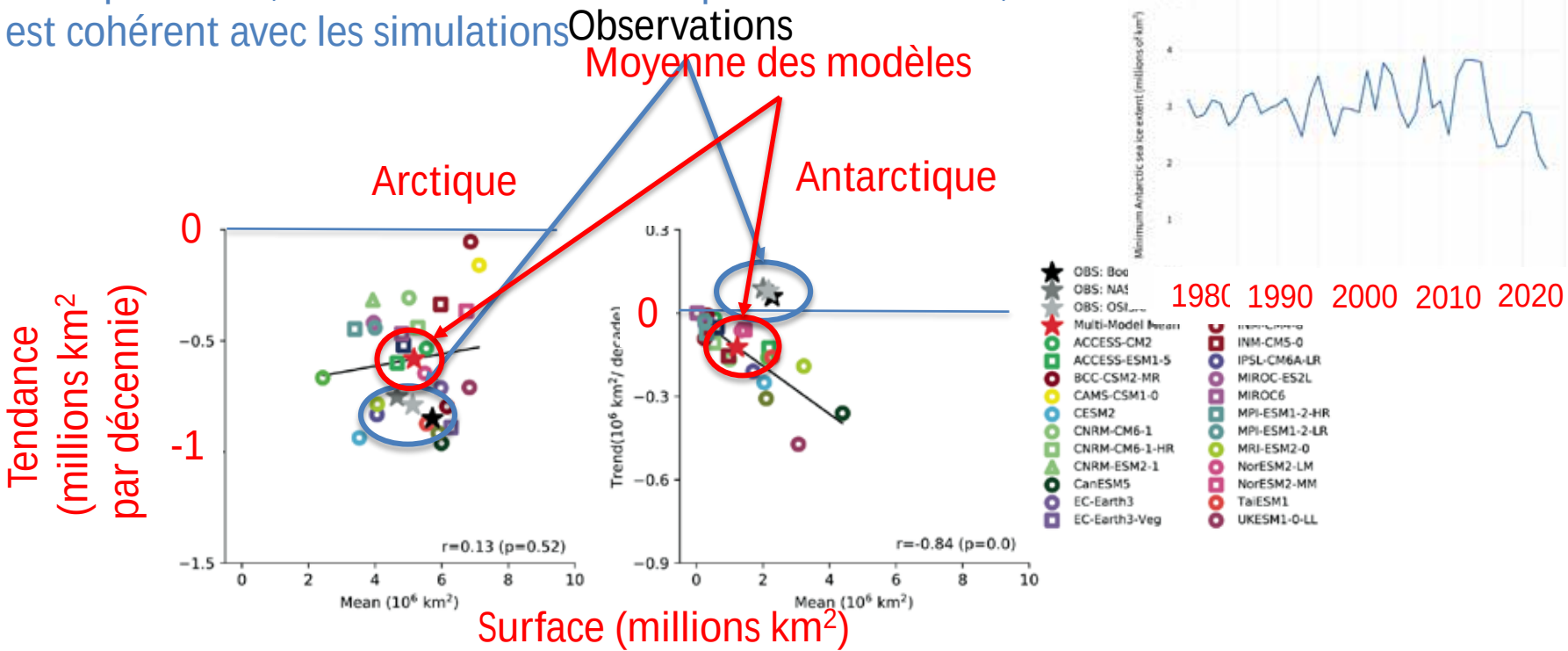


La banquise (1979-2017)

Analyse de la surface de banquise à la fin de l'été (de chaque hémisphère)

Grande variabilité sur l'estimation de l'évolution des banquises Arctiques et Antarctiques

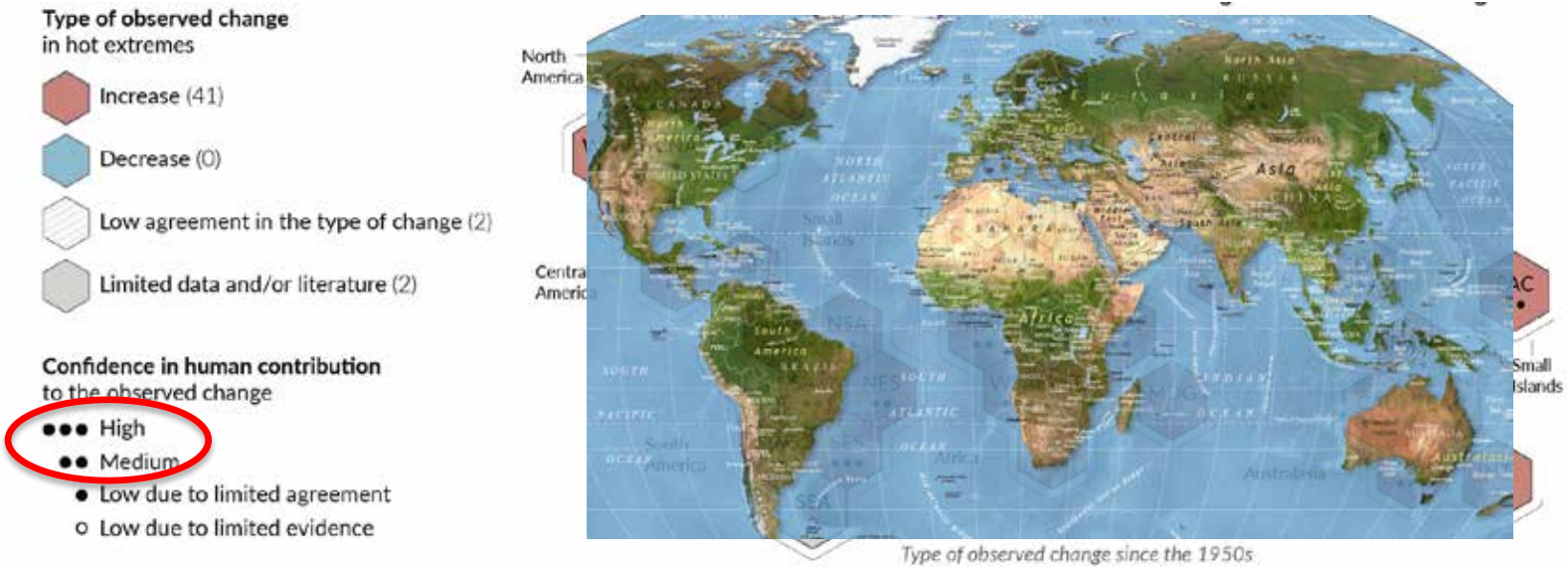
Note : Depuis 2017, la tendance en Antarctique est à la baisse, ce qui est cohérent avec les simulations



Tendances régionales (1/3)

On observe, presque partout, une augmentation de la **fréquence des canicules**.

C'est une signature du changement climatique qui est bien reproduite par les modèles de climat



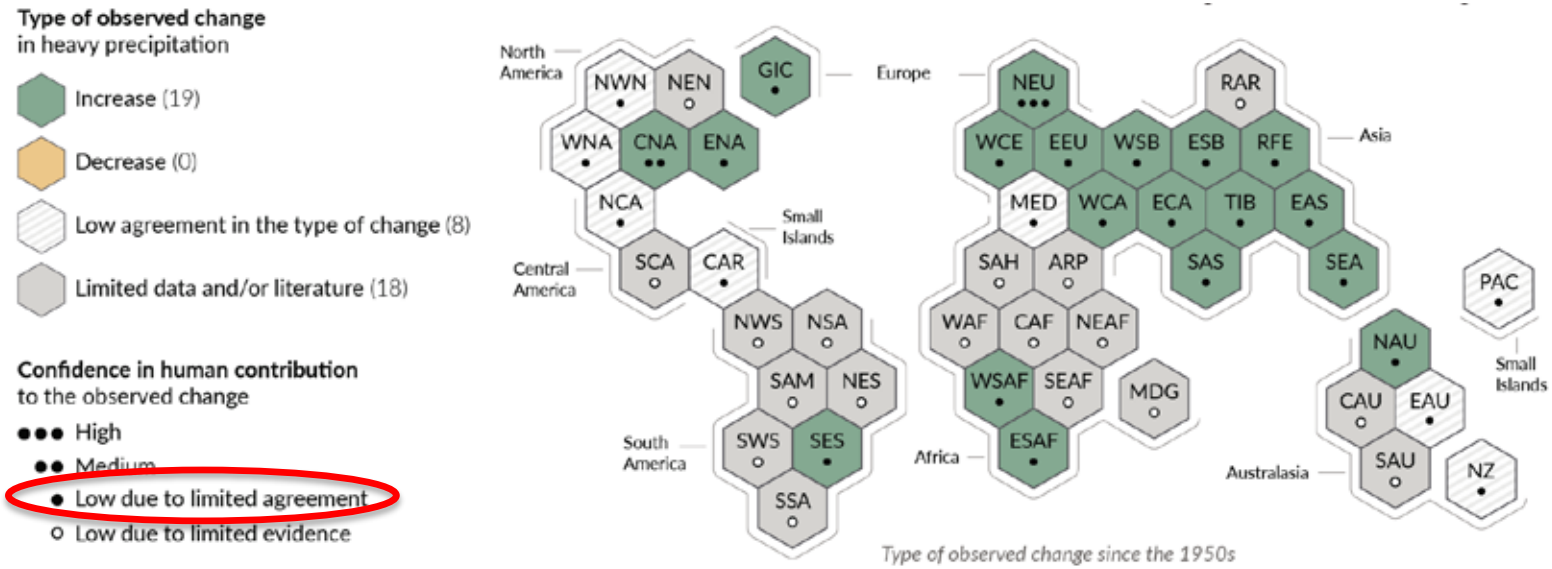
Type of observed change since the 1950s

Presque partout, il y a une bonne cohérence entre les projections des modèles et ce qui est observé

Tendances régionales (2/3)

On observe, dans certaines régions, une augmentation de la **fréquence des précipitations extrêmes**.

C'est une signature du changement climatique qui n'est PAS bien reproduite par les modèles de climat

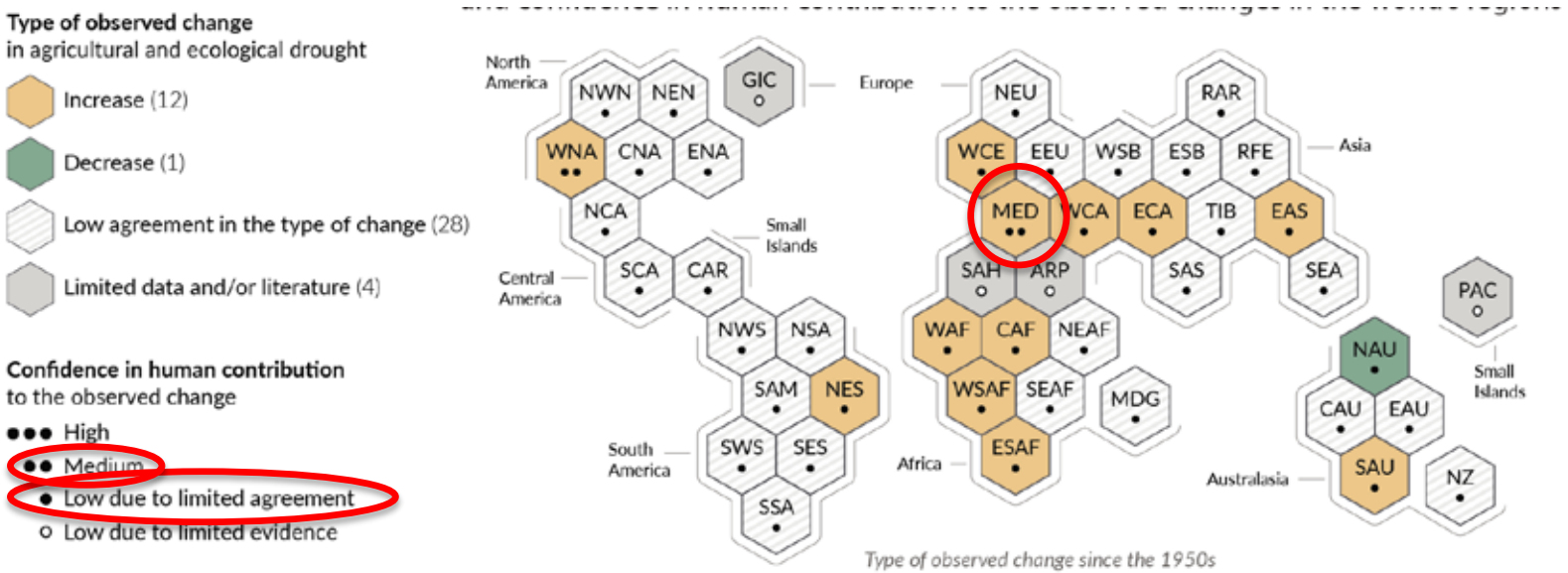


Presque partout, il y a peu de cohérence entre les projections des modèles et ce qui est observé

Tendances régionales (3/3)

On observe, dans certaines régions, une augmentation de la **fréquence des sécheresses agricoles (sols secs)**. Une exception : Nord de l'Australie

Ce n'est PAS une signature du changement climatique qui est bien reproduite par les modèles de climat

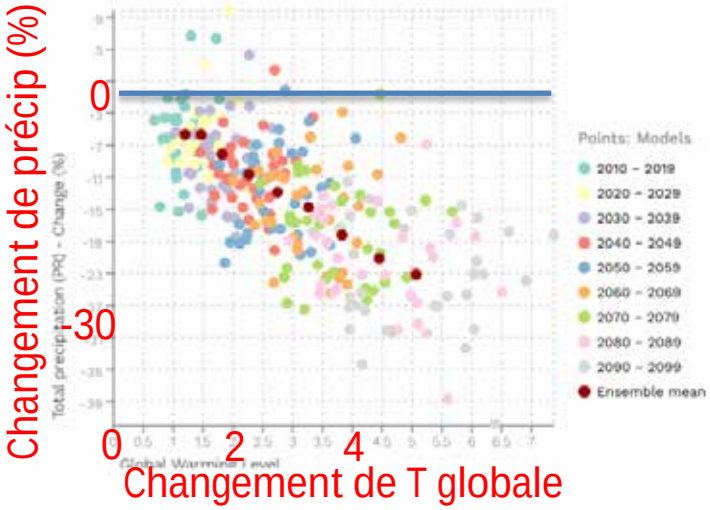


Presque partout, il y a peu de cohérence entre les projections des modèles et ce qui est observé

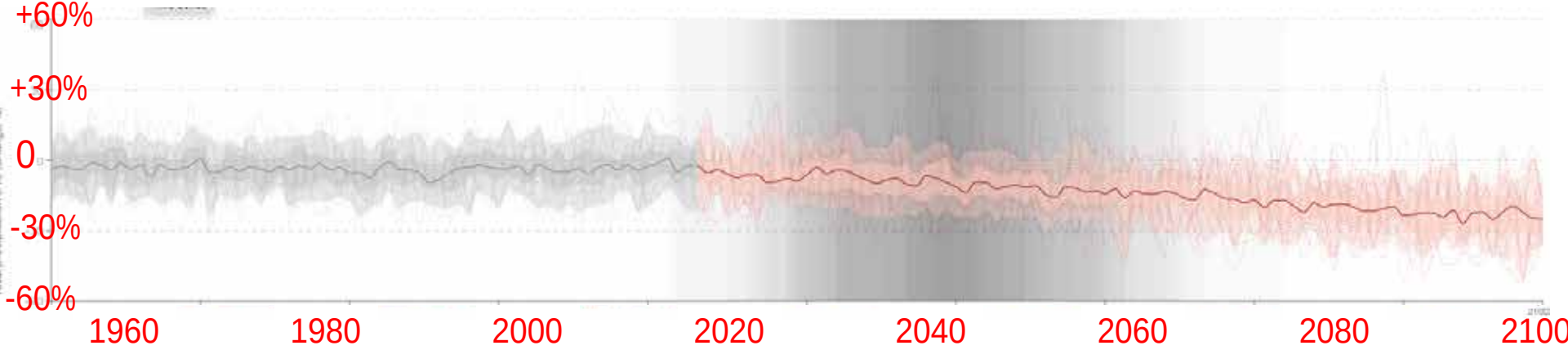
Exception : Région méditerranéenne. Cohérence moyenne. La plupart des modèles reproduisent l'assèchement observé

Focus sur la Méditerranée

Sur la zone méditerranéenne, la quasi-totalité des modèles de climat anticipent une diminution des précipitations annuelles



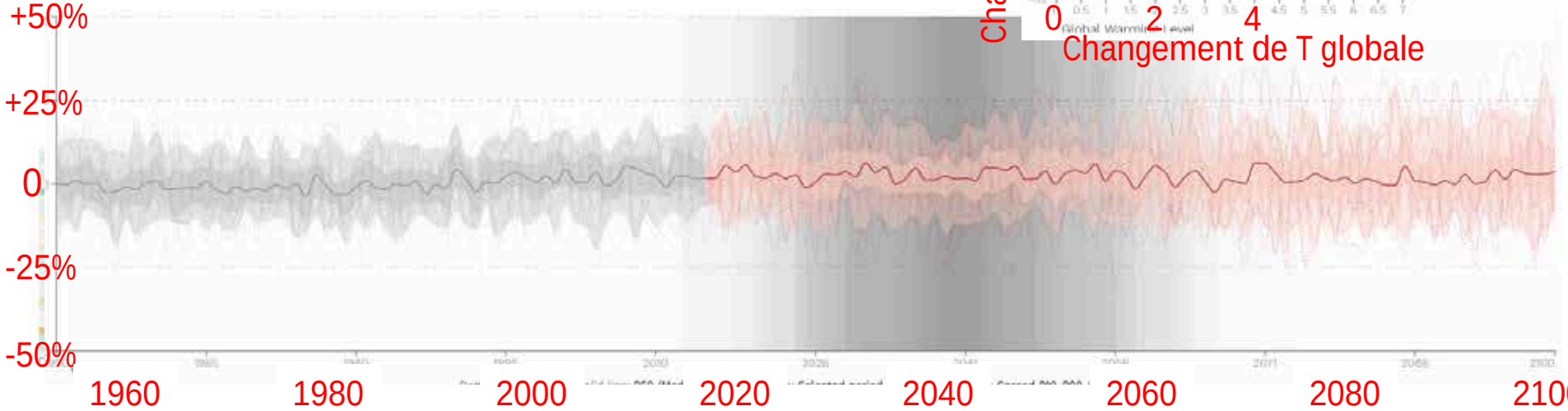
C'est donc un résultat robuste concernant l'évolution du climat

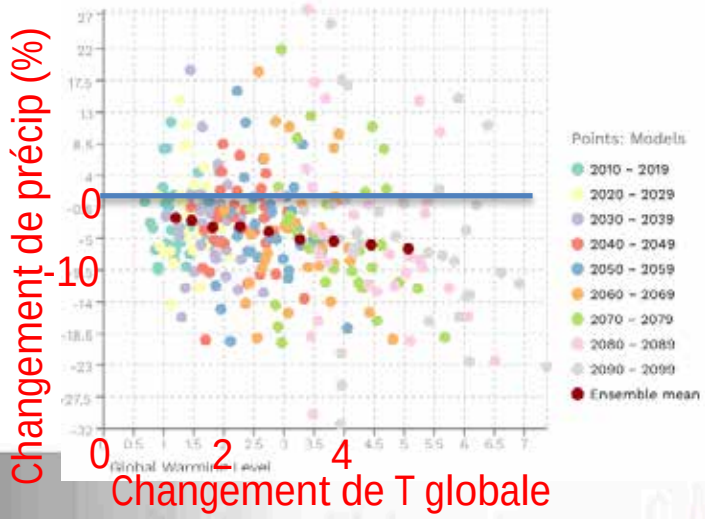


Sur l'Amazonie…

Sur la zone Amazonie, certains modèles anticipent plus de précipitations annuelles, tandis que d'autres annoncent une diminution

Il n'y a donc pas de prédiction robuste sur cette région



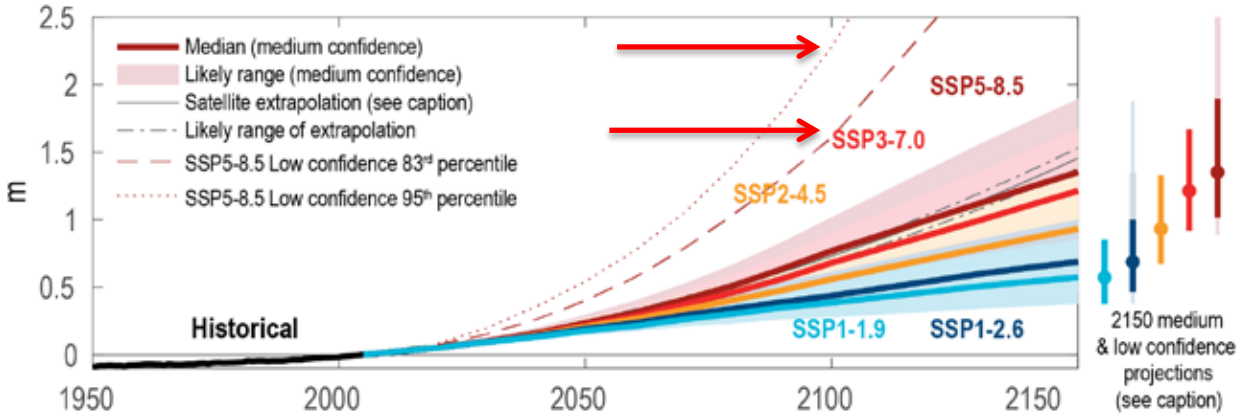


Les modèles tous faux ?

Il est impossible de démontrer qu'il n'y a pas de processus climatiques qui ne serait pas pris en compte par tous les modèles

Le fait que le système climatique puisse sortir de l'ensemble des futurs "possibles" tels que modélisés est bien reconnu par le GIEC

Exemple : Déstabilisation des calottes polaires et impact sur le niveau des mers



L'analyse des processus et la compréhension des changements climatiques dans le passé vise à exclure cette possibilité

Quelques points à retenir…

Les modèles de climat (ou *modèle Système Terre*) permettent de simuler le climat à toutes les échelles de temps

Ils sont basés sur des équations physiques robustes, et sur des paramétrisations empiriques

Il existe une trentaine de modèles dans le monde, développés de manière partiellement indépendante

Les modèles sont évalués sur le climat présent et l'évolution des climats passés.

Aucun modèle n'est réellement fiable

La simulation de l'ensemble des modèles permet d'identifier les changements climatiques « robustes » et ceux qui ne le sont pas

Les changements de température apparaissent plus robustes que ceux de précipitations

On ne peut pas exclure l'existence de processus non représentés dans les modèles qui conduirait à une évolution du climat non anticipé. Mais peu probable

Un modèle de climat n'est pas fiable. L'inter-comparaison des résultats des modèles apporte une certaine fiabilité sur la description des futurs possibles.