

Changements climatiques: Que dit la science ?

Jean-Pascal van Ypersele

**(Université catholique de Louvain, Belgique),
Vice-président du GIEC de 2008 à 2015**

Twitter: @JPvanYpersele

**CTB (Coopération technique belge), IMDC et
APEC, Tangerang, 4-11-2016**

Merci au Gouvernement wallon et à mon équipe à l'Université catholique de Louvain (B. Gaino, P. Marbaix) pour leurs soutien et contributions. Merci à Peter Wittoeck (SPF Environnement) pour certaines des dias sur la COP21 et à Xavier Fettweiss (Ulg) pour certaines dias sur le Groenland

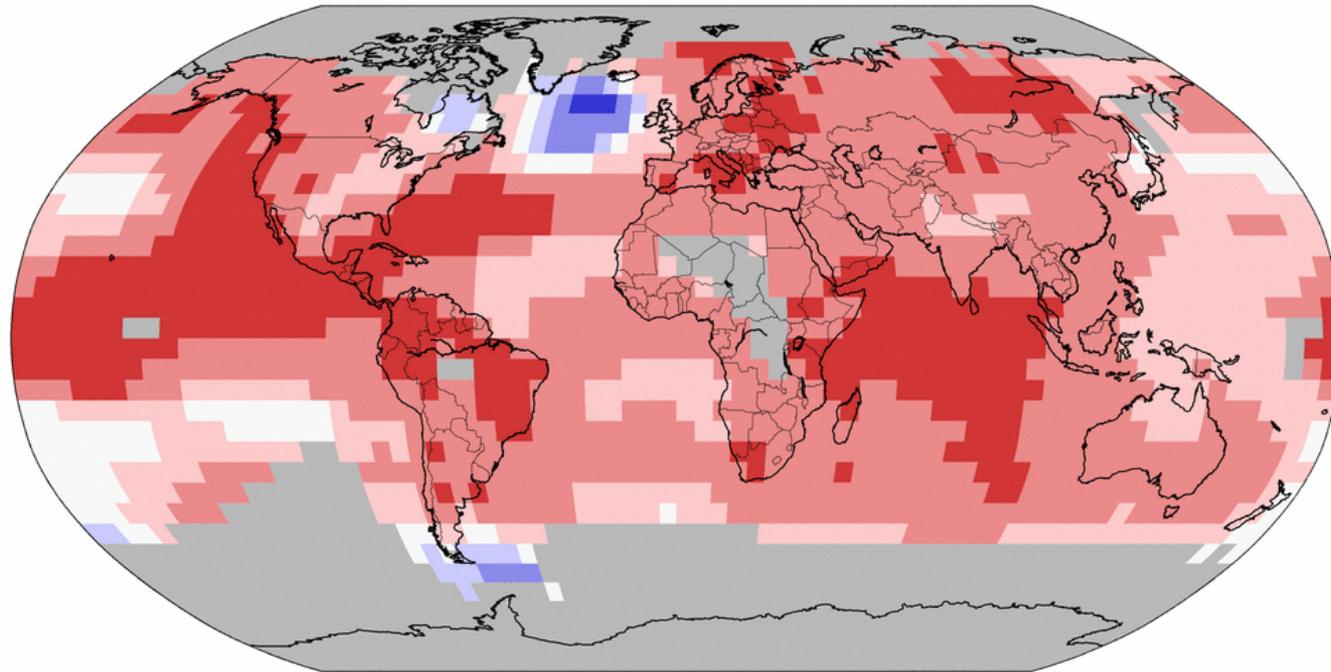


2015= année la plus chaude depuis 1880

Land & Ocean Temperature Percentiles Jan–Dec 2015

NOAA's National Centers for Environmental Information

Data Source: GHCN–M version 3.3.0 & ERSST version 4.0.0



Record Coldest

Much Cooler than Average

Cooler than Average

Near Average

Warmer than Average

Much Warmer than Average

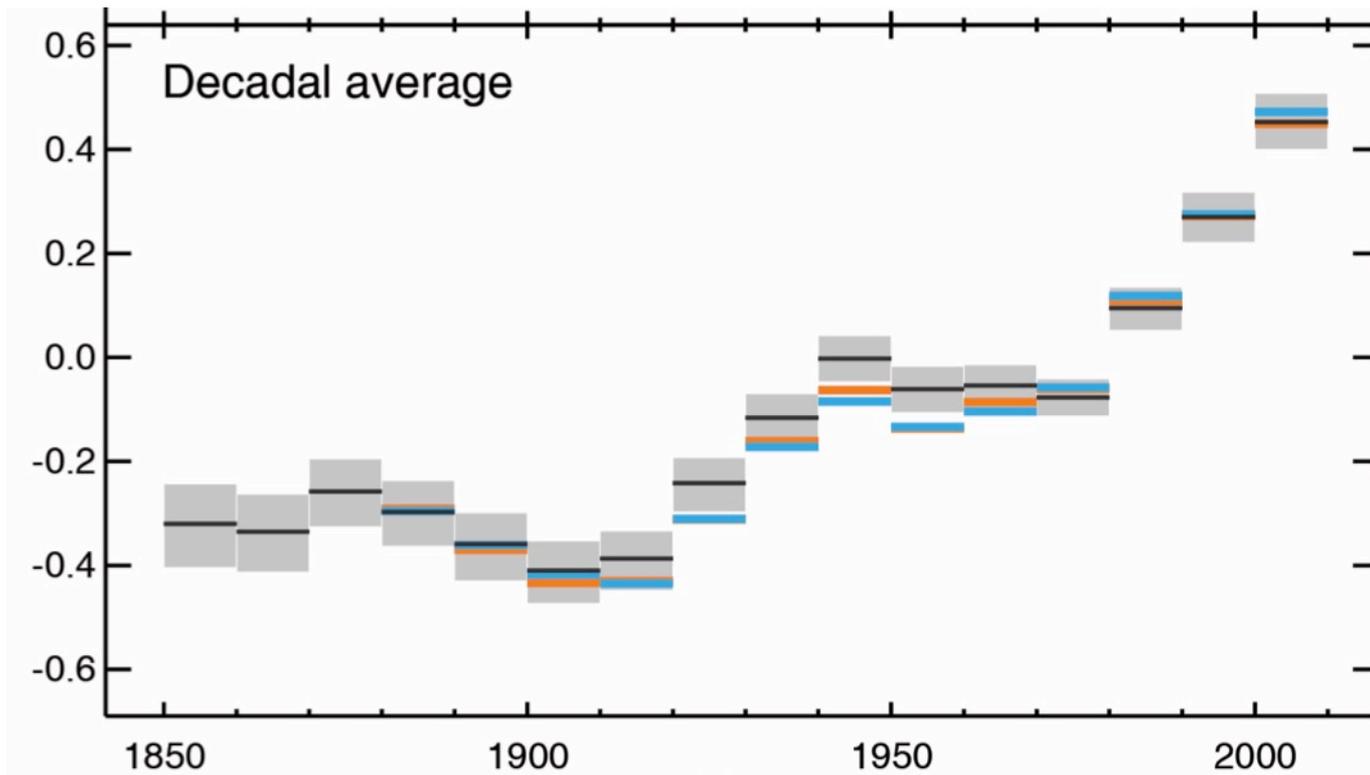
Record Warmest



Wed Jan 13 12:15:02 EST 2016

Global Temperature Anomalies video (1880-2015)

- https://youtu.be/SWPzGo_C010 (30 s)
- From Nasa Climate Change
- This color-coded map in Robinson projection displays a progression of changing global surface temperature anomalies from 1880 through 2015. Higher than normal temperatures are shown in red and lower than normal temperatures are shown in blue. The final frame represents the global temperatures 5-year averaged from 2010 through 2015. Scale in degree Celsius.



(IPCC 2013, Fig. SPM.1a)

Chacune des trois dernières décennies a été successivement plus chaude à la surface de la Terre que toutes les décennies précédentes depuis 1850

Dans l'hémisphère nord, la période 1983–2012 a probablement été la période de 30 ans la plus chaude des 1400 dernières années (degré de confiance moyen).

Depuis 1950, les **jours extrêmement chauds** and les **pluies intenses** sont devenues plus courants

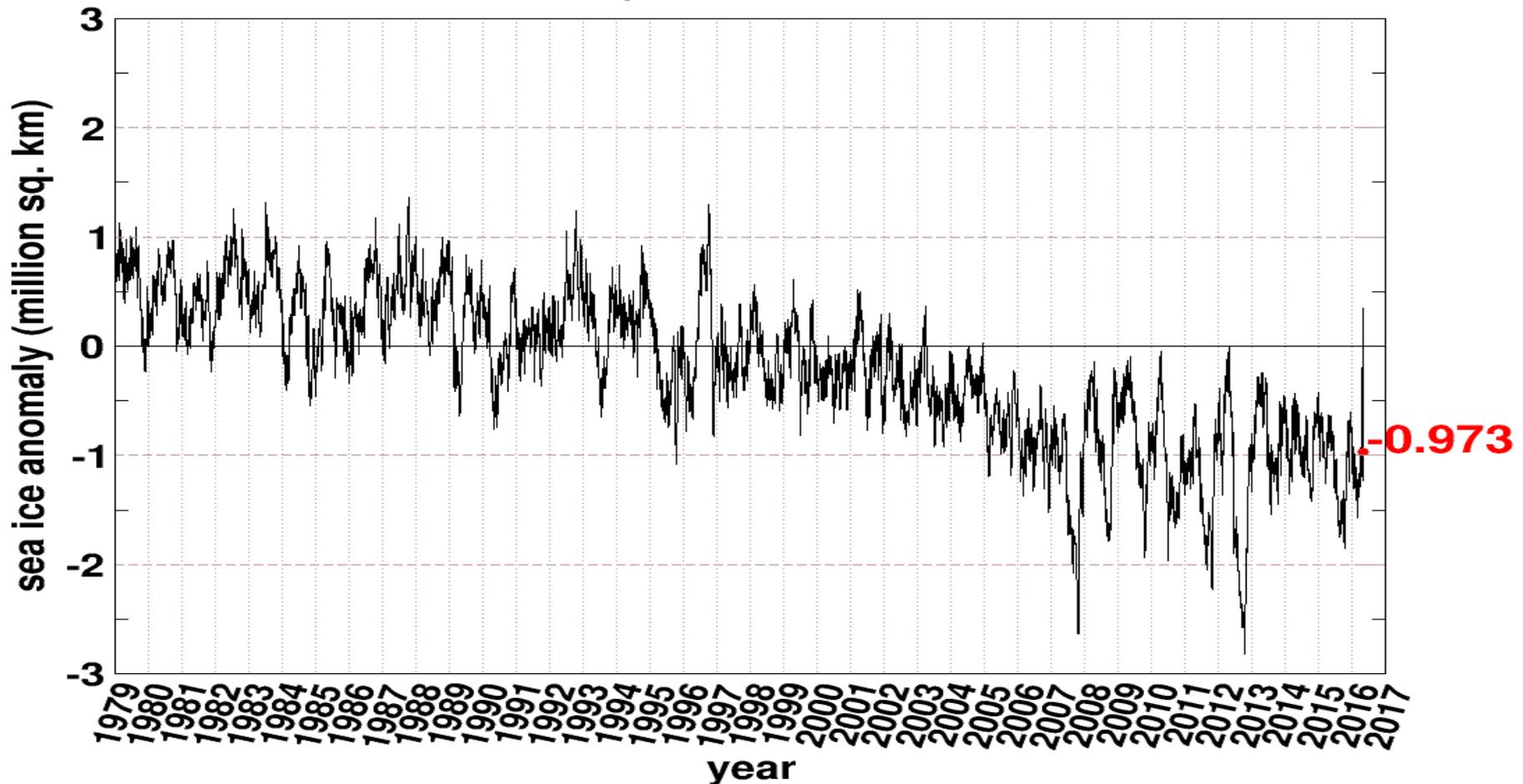


There is evidence that anthropogenic influences, including increasing atmospheric **greenhouse gas concentrations**, have changed these extremes

Surface de la glace de mer arctique (écart par rapport à la moyenne)

Northern Hemisphere Sea Ice Anomaly

Anomaly from 1979-2008 mean



Qori Kalis Glacier (Pérou): juillet 1978



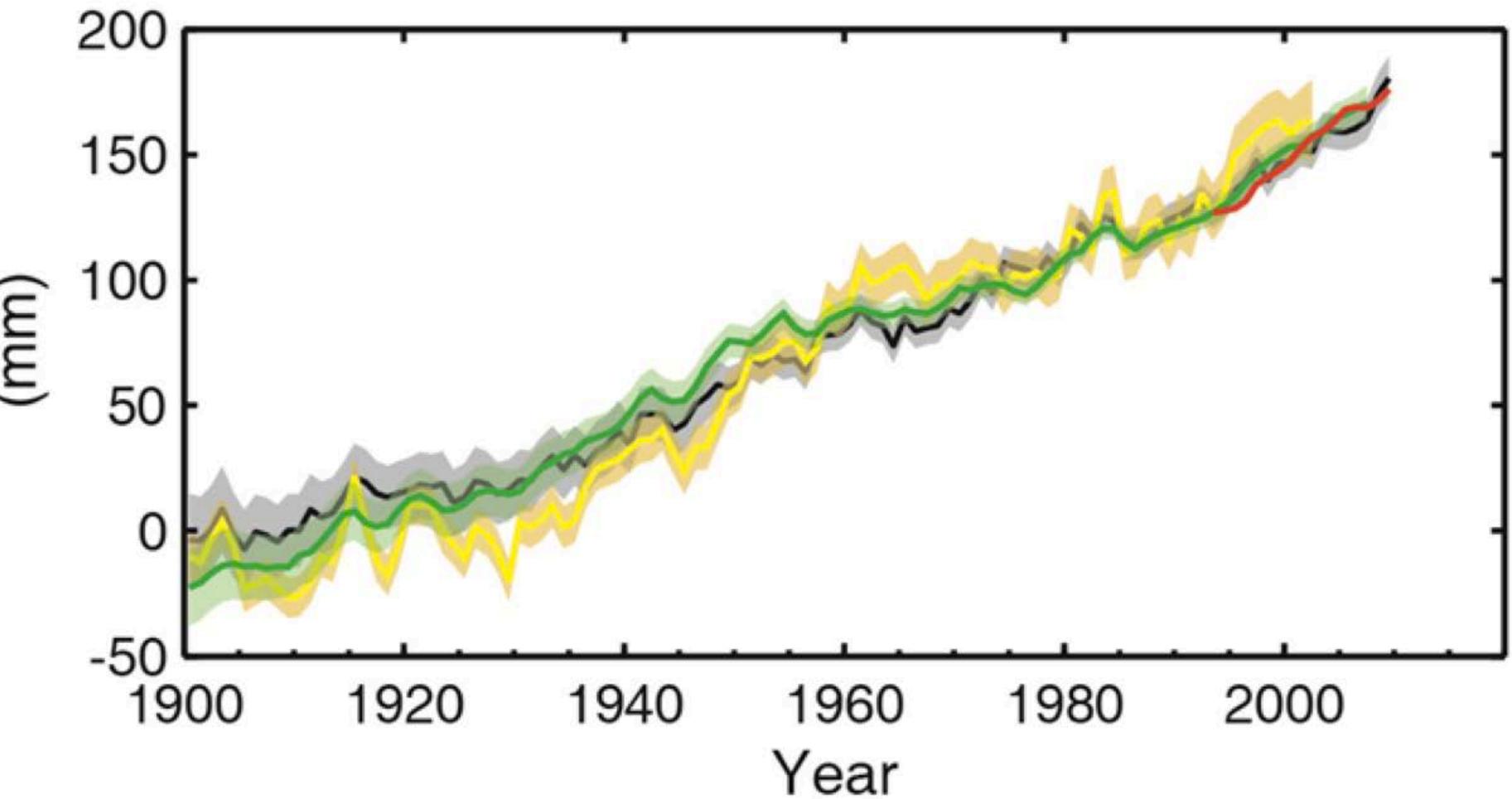
Source: Dr. Lonnie Thompson (OSU),
via <http://climate.nasa.gov/images-of-change#543-melting-qori-kalis-glacier-peru>

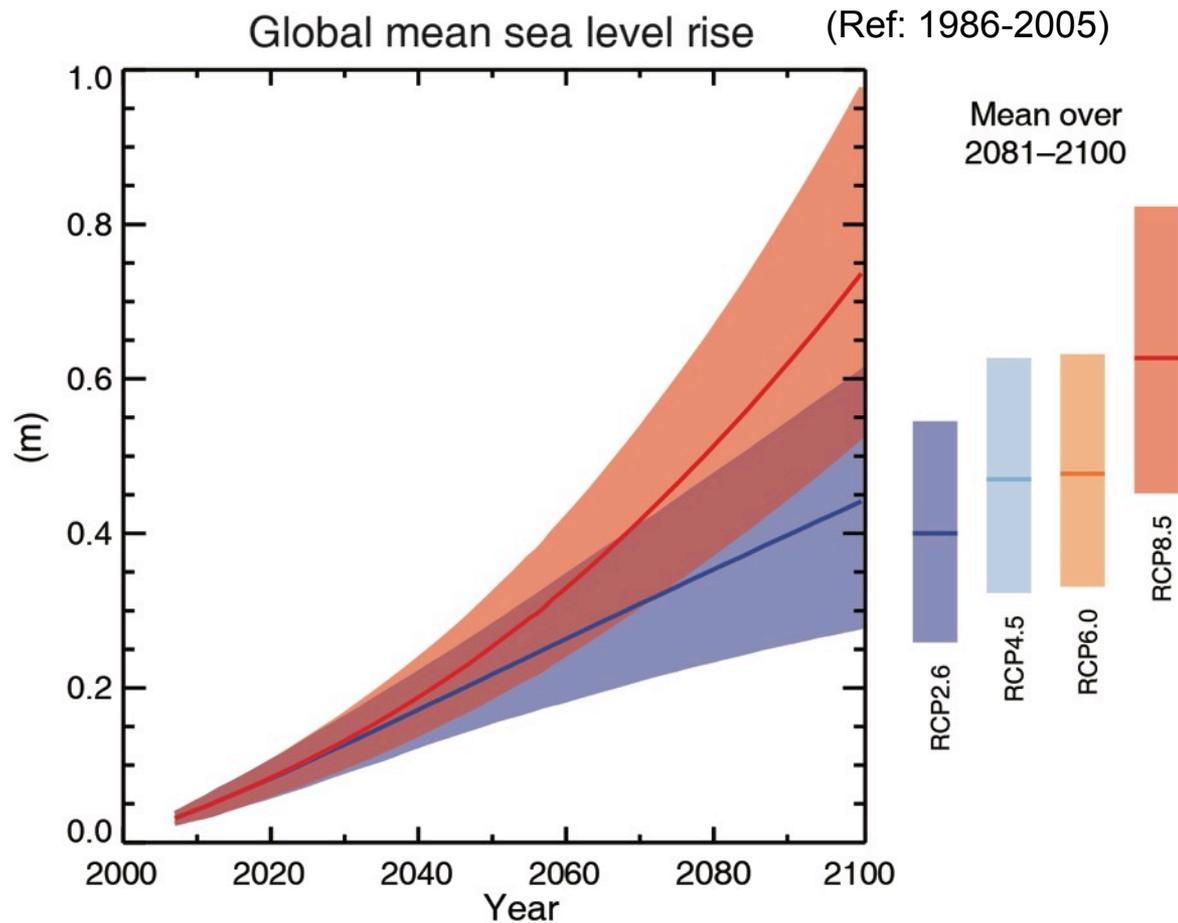
Qori Kalis Glacier (Pérou): juillet 2011



Source: Dr. Lonnie Thompson (OSU),
via <http://climate.nasa.gov/images-of-change#543-melting-qori-kalis-glacier-peru>

Evolution du niveau moyen des mers

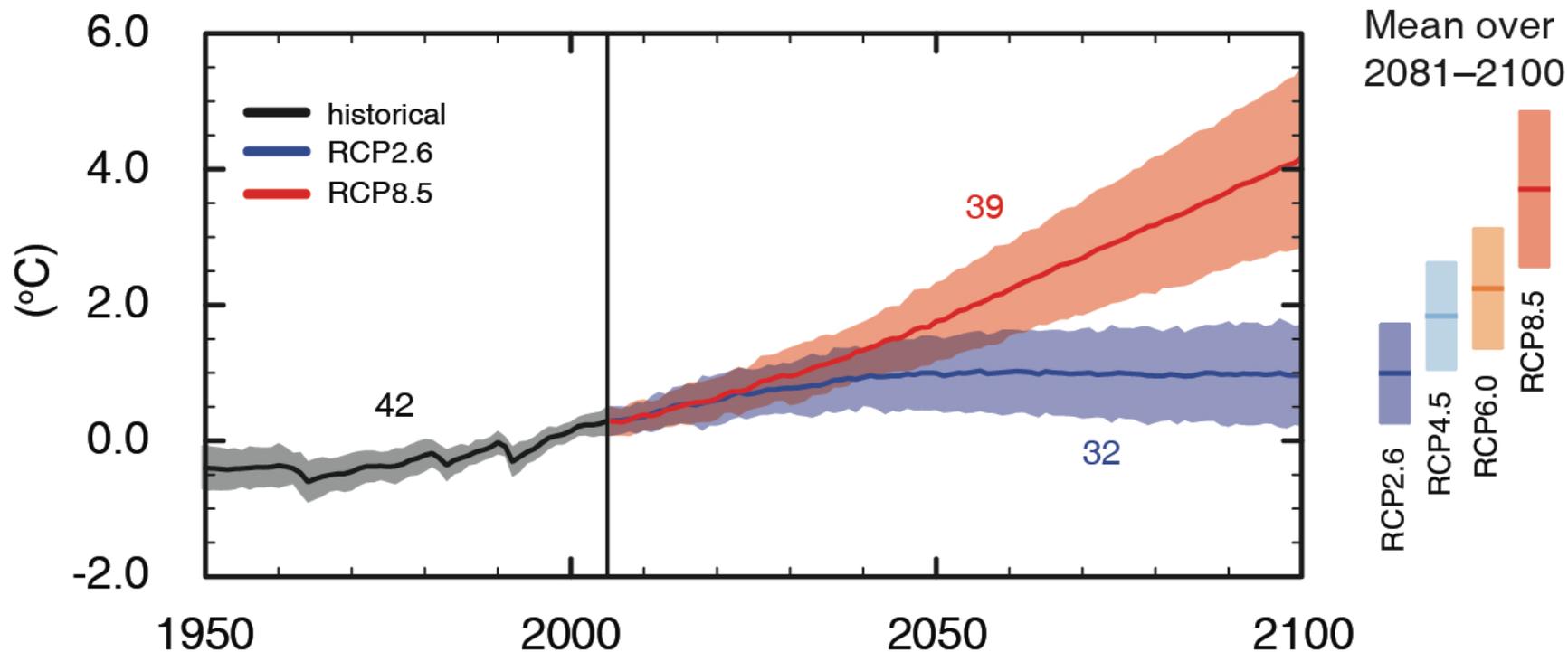




(IPCC 2013, Fig. SPM.9)

Le niveau moyen des mers continuera à s'élever au cours du XXIe siècle

Global average surface temperature change (Ref: 1986-2005)



(IPCC 2013, Fig. SPM.7a)

Seul le scénario d'émissions le plus bas (RCP2.6) permet de maintenir l'augmentation de la température moyenne du globe en surface en-dessous de 2°C (relativement à 1850-1900) avec une probabilité d'au moins 66%.

Résumé (1)

- **C + O₂ = chaleur + CO₂ (inévitabile)**
- **80% de d' énergie mondiale viennent des combustibles fossiles, contenant du "C" (carbone); le déboisement contribue aussi à l' émission de CO₂**
- **Ce gaz "à effet de serre" piège la chaleur**
- **40% du CO₂ émis seront encore présents dans l' atmosphère dans 1000 ans ; il s' y accumule: [CO₂] +40% depuis 1750**

Jean-Pascal van Ypersele

(vanyp@climate.be)

Résumé (2)

- **La température globale augmente (déjà 0.7°C depuis 1900) & augmentera (+0.3 à +4.8°C entre 1986-2005 et 2081-2100, suivant les scénarios)**
- **Niveau des mers: 26 à 82 cm (même période)**
- **Des impacts importants sont attendus**
- **Stabiliser la température requiert de réduire les émissions nettes de CO₂ à zéro dans les décennies à venir**

Pourquoi le GIEC (Groupe d'experts

Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat) ?

Etabli par l'OMM et le PNUE en 1988

Mandat: fournir aux décideurs une **source objective d'information** à propos:

- des causes des changements climatiques
- des scénarios possibles d'évolution
- des conséquences observées ou futures pour l'environnement et les activités humaines
- les options de réponse possibles (adaptation & atténuation = réduction des émissions).

OMM = Organisation Météorologique Mondiale
PNUE = Programme des Nations Unies pour l'Environnement



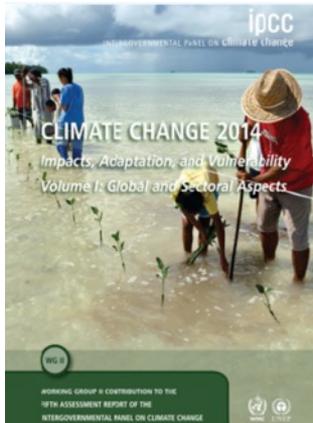
Structure du GIEC



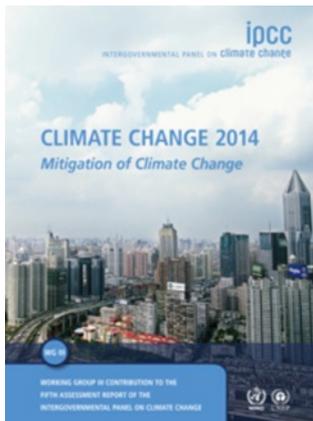
- **3 Groupes de travail, 1 Task Force**
- GT1: Science des changements climatiques
- GT2: Impacts, adaptation & vulnérabilité
- GT3: Atténuation (« Mitigation »)
- TF: Inventaires d'émissions (méthodologies)



Que se passe-t-il dans le système climatique ?



Quels sont les risques ?



Que peut-on faire ?

Messages clés

- **L'influence humaine sur le système climatique est claire**
- **La poursuite des émissions de gaz à effet de serre augmentera le risque d'impacts graves, répandus et irréversibles pour les populations et les écosystèmes**
- **Alors que les changements climatiques représentent une menace pour le développement durable, il existe de nombreuses opportunités pour intégrer l'atténuation, l'adaptation, et la poursuite d'autres objectifs sociétaux**
- **L'Humanité a les moyens de limiter les changements climatiques et de construire un avenir plus durable et plus résilient**

AR5 WGI SPM, AR5 WGII SPM, AR5 WGIII SPM

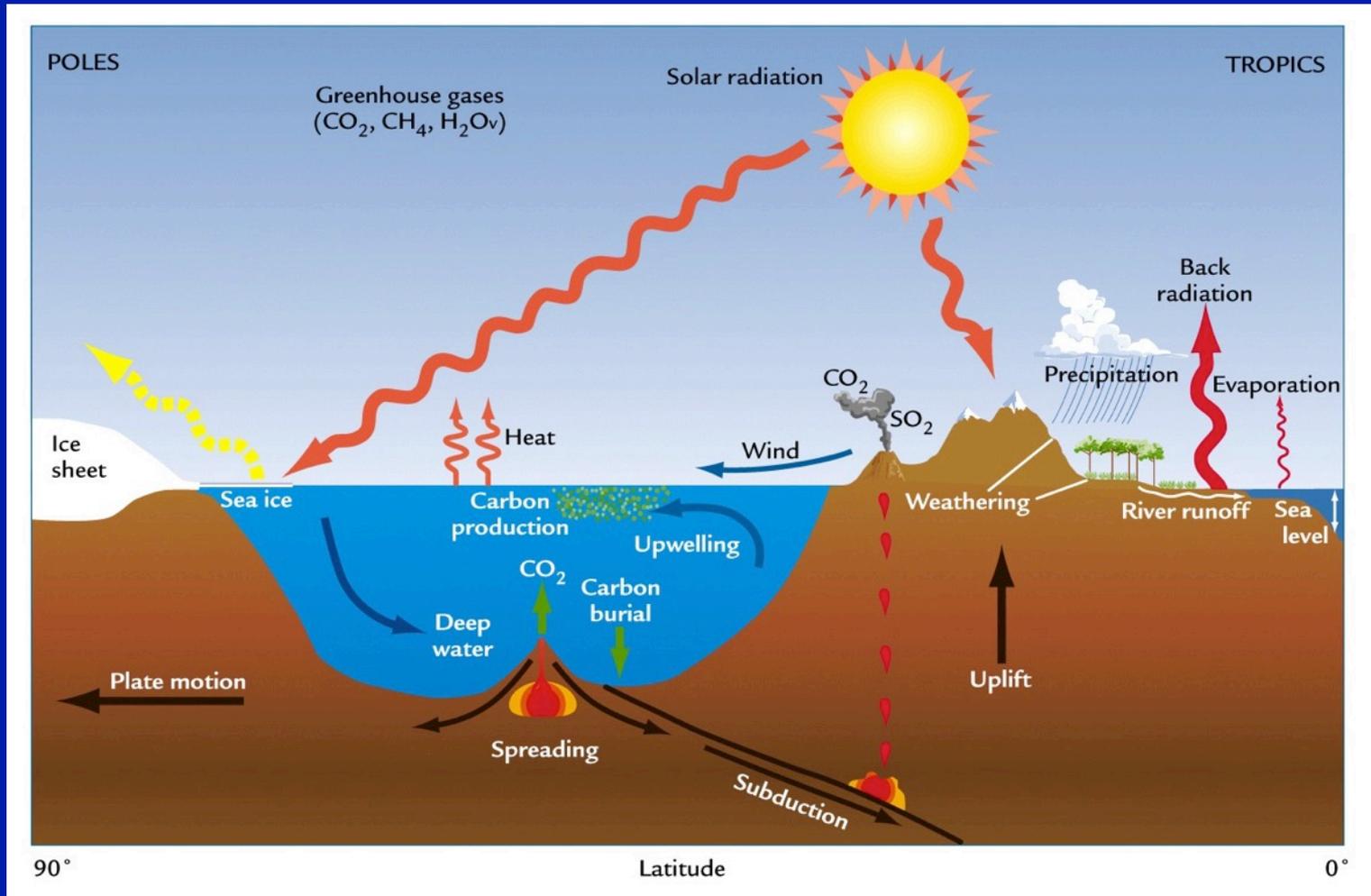
Définitions



- **Systeme climatique: constitué par l'atmosphère, les océans, la cryosphère (glace), la surface des continents, la biosphère...**
- **Le climat = *moyenne* de l'état de ce système, en particulier du *temps* sur 30 ans, + *variabilité* autour de cette moyenne**

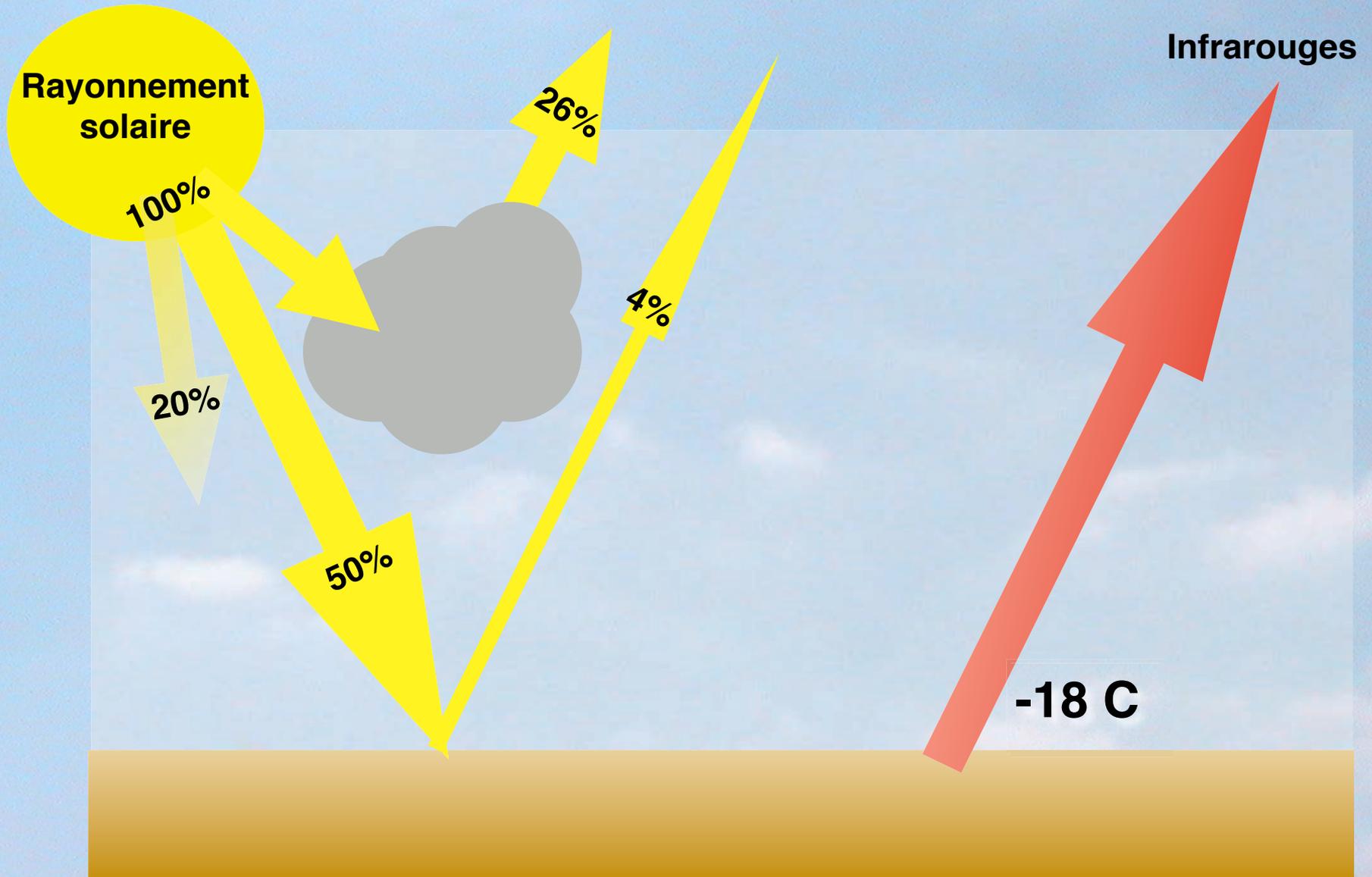
Le système climatique terrestre

- | **Machine thermique alimentée en énergie par le Soleil (1400 Wm^{-2} au sommet de l'atmosphère)**
- | **« Sphère » en rotation → dynamique des fluides complexe**
- | **Océan = 70% de la surface,**
- | **Très fine atmosphère (N_2 , O_2 , H_2O , CO_2 , ...)**
- | **Effet de serre**
- | **Cycles bio-géo-chimiques**

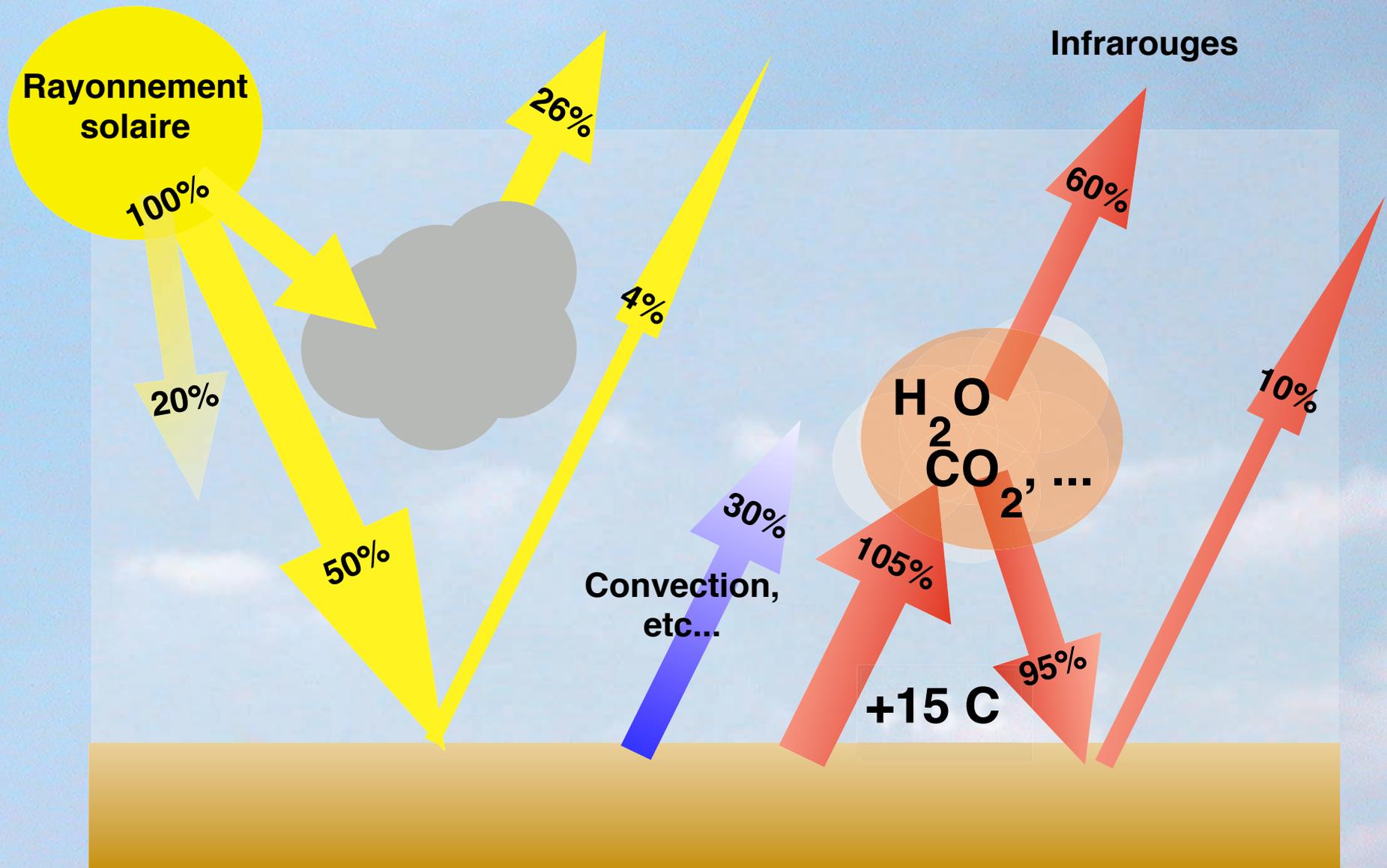


Components of the climate system
 [From Ruddiman (2001)]

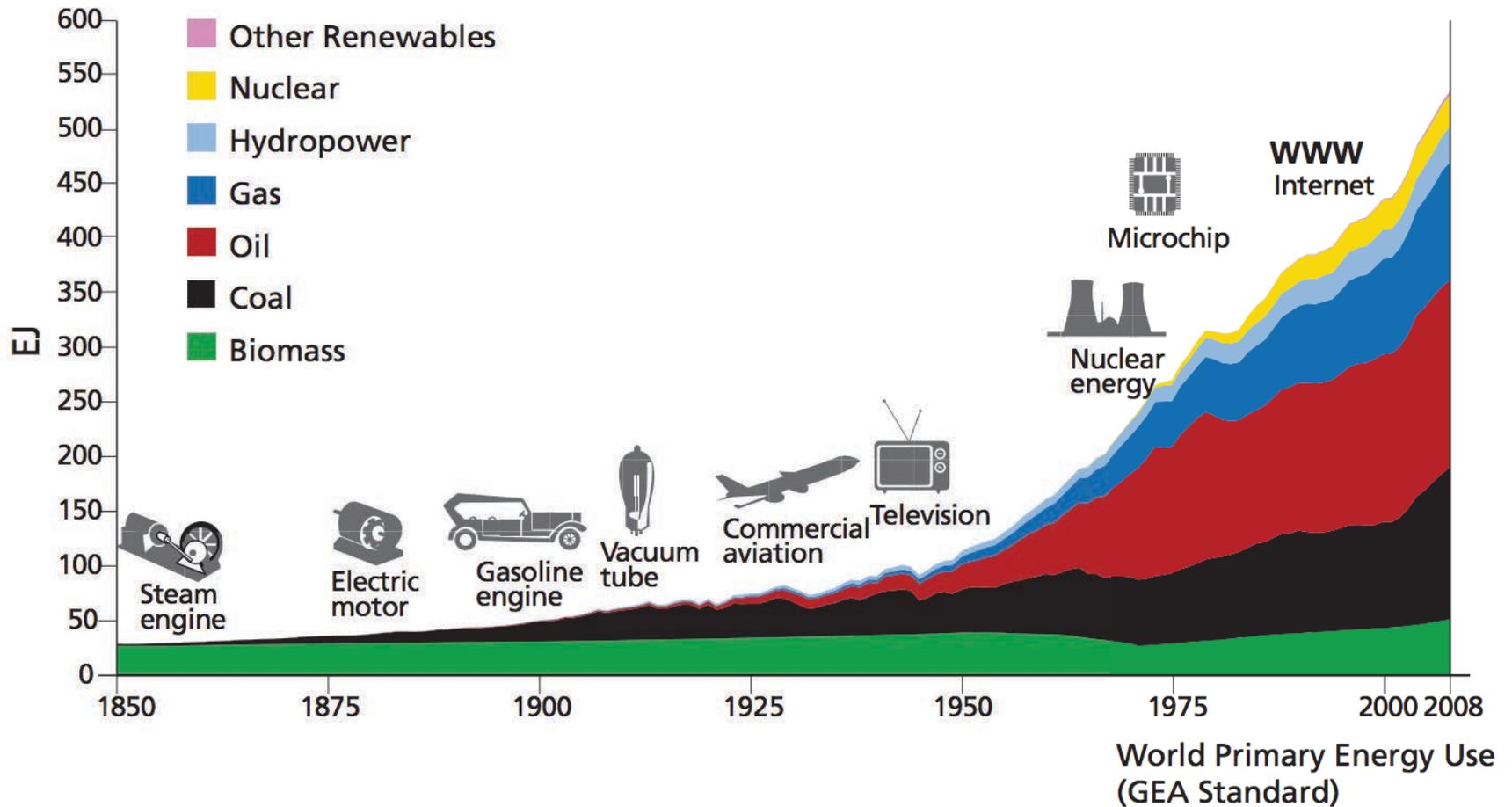
Cycle de l'énergie et effet de serre



Cycle de l'énergie et effet de serre



Energie primaire



Source: Global Energy Assessment (2012)

REPARTITION DES SOURCES D'ENERGIE (MONDE)

2005:

Biomasse : 9.4%

Hydroélec : 5.3%

Nucléaire : 5.3%

Combust. fossiles { **Charbon : 25%**
Pétrole : 21%
Gaz naturel : 33.6% } **79.6%**

Autres : 0.4%

100%

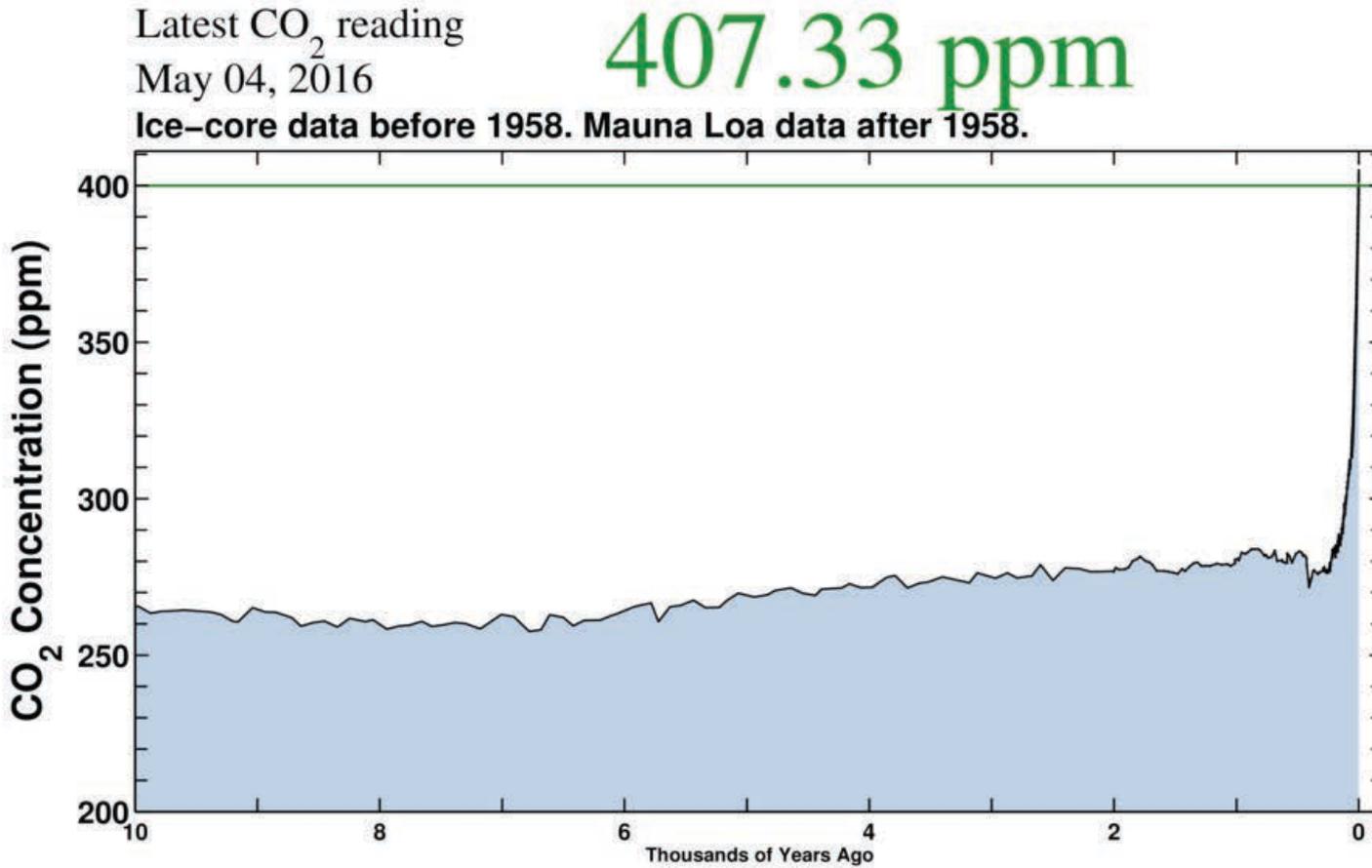


Quantité de CO₂ émise par unité d'énergie consommée

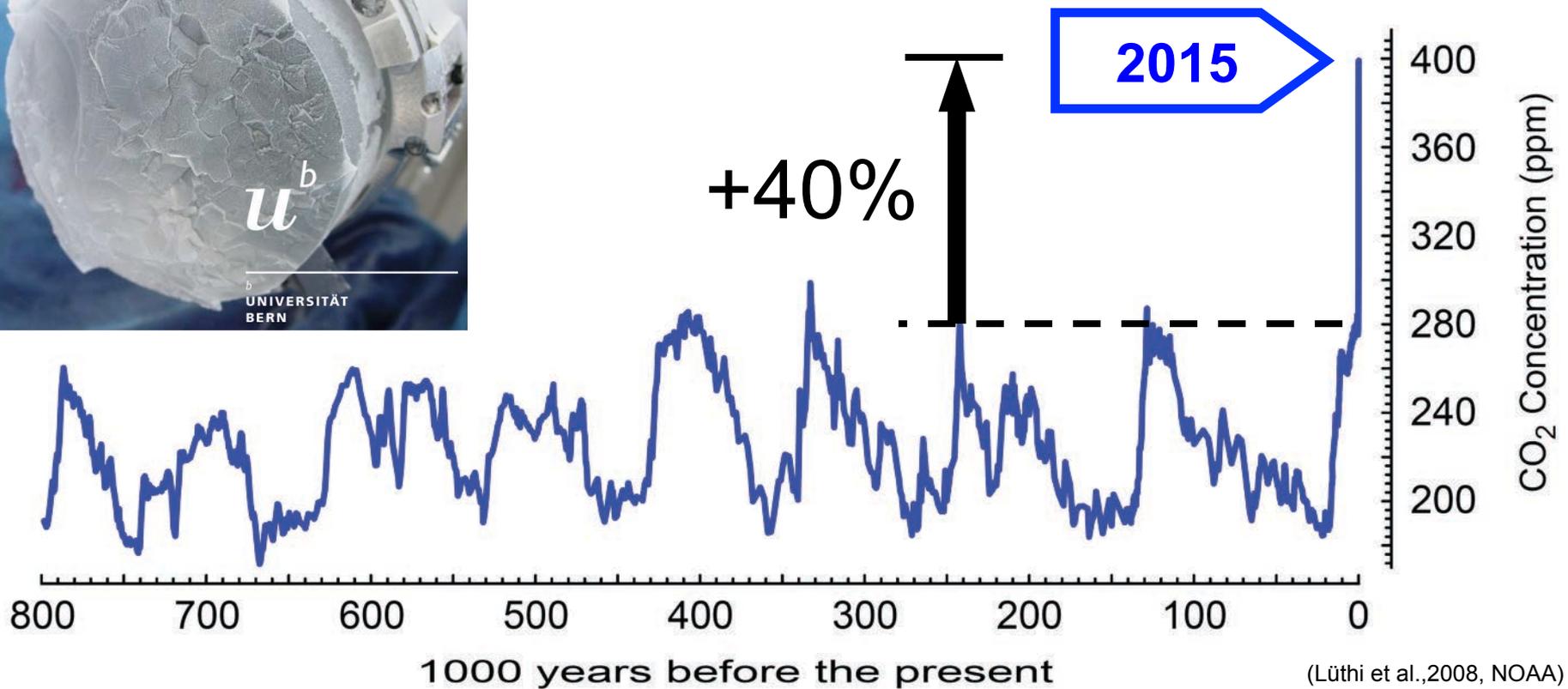
Combustibles	kg CO₂ / Gigajoule
Charbon	95
Gasoil	74
Essence	69
LPG	63
Gaz naturel	56

Source : VITO (1991)

Concentration en CO₂, le 4 mai 2016 (Courbe de Keeling)

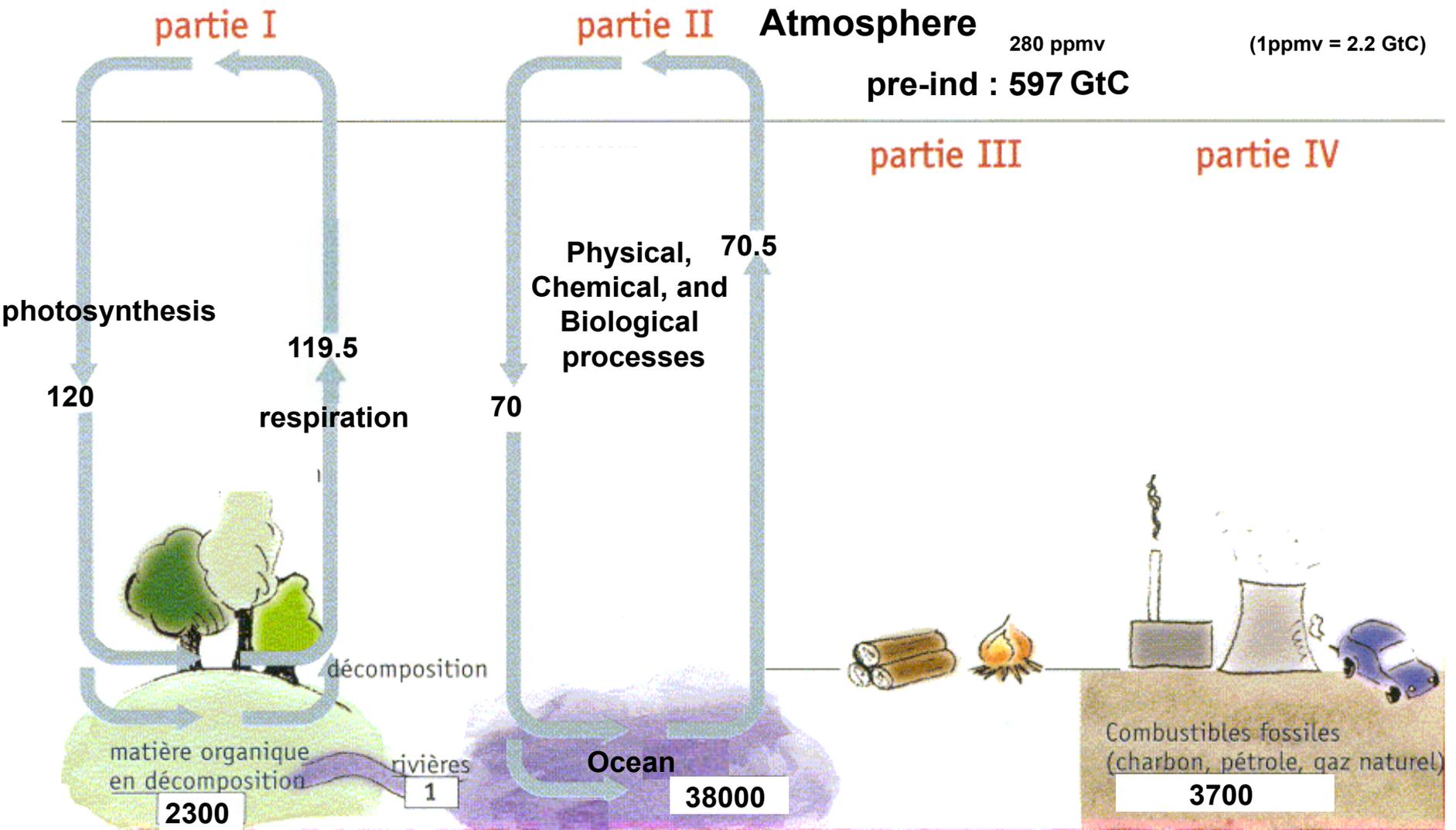


Source: scripps.ucsd.edu/programs/keelingcurve/



Les concentrations atmosphériques en dioxyde de carbone (CO₂) ont augmenté jusqu'à des niveaux sans précédent au cours des 800 000 dernières années

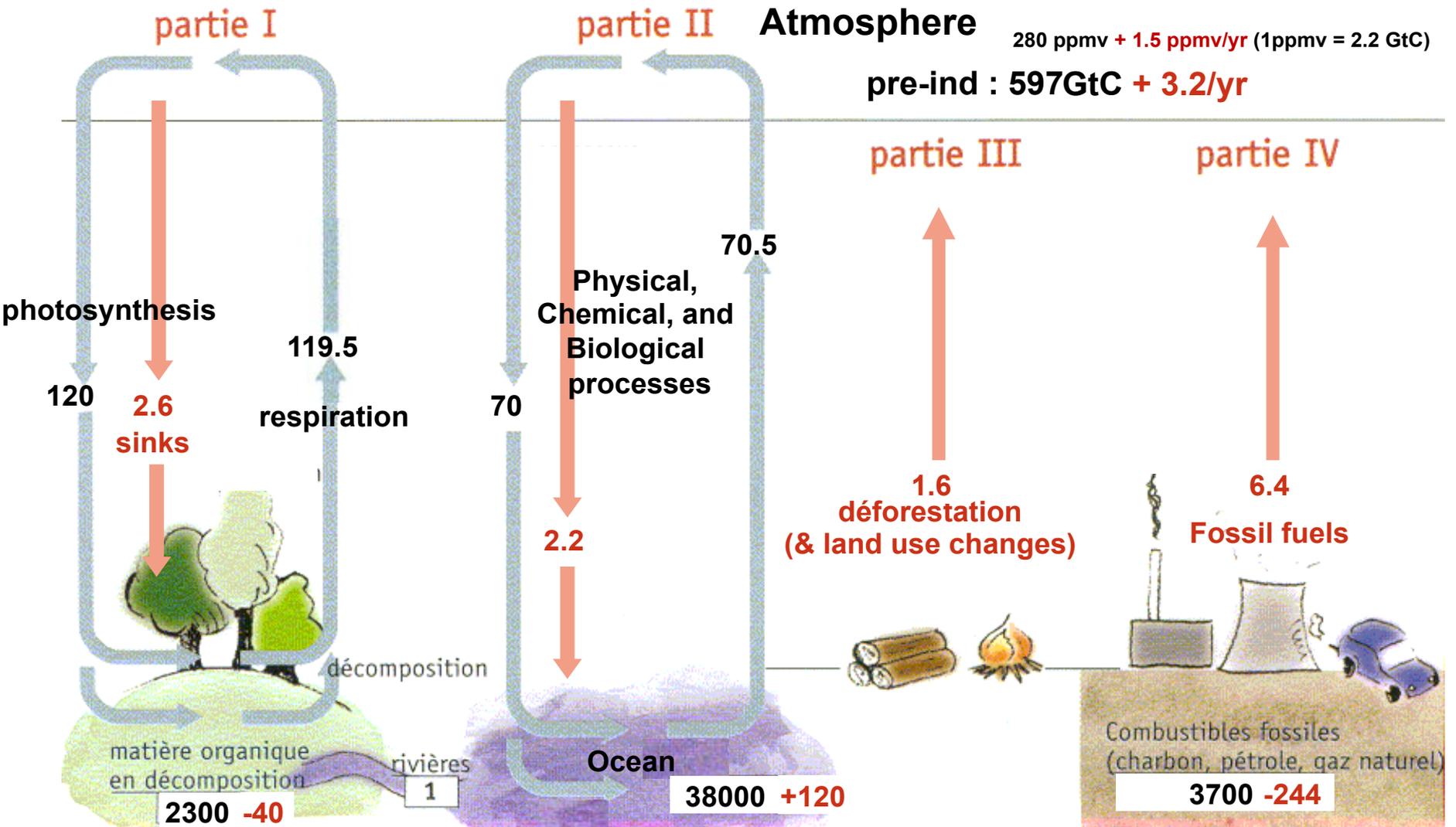
Carbon cycle: unperturbed fluxes



Units: GtC (billions tons of carbon) or GtC/year (multiply by 3.7 to get GtCO₂)

Carbon cycle: perturbed by human activities

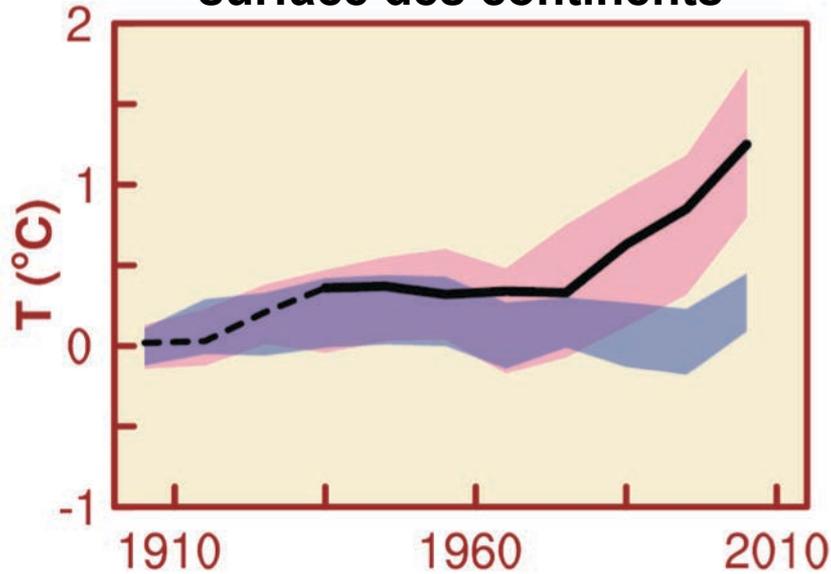
(numbers for the decade 1990-1999s, based on IPCC AR4)



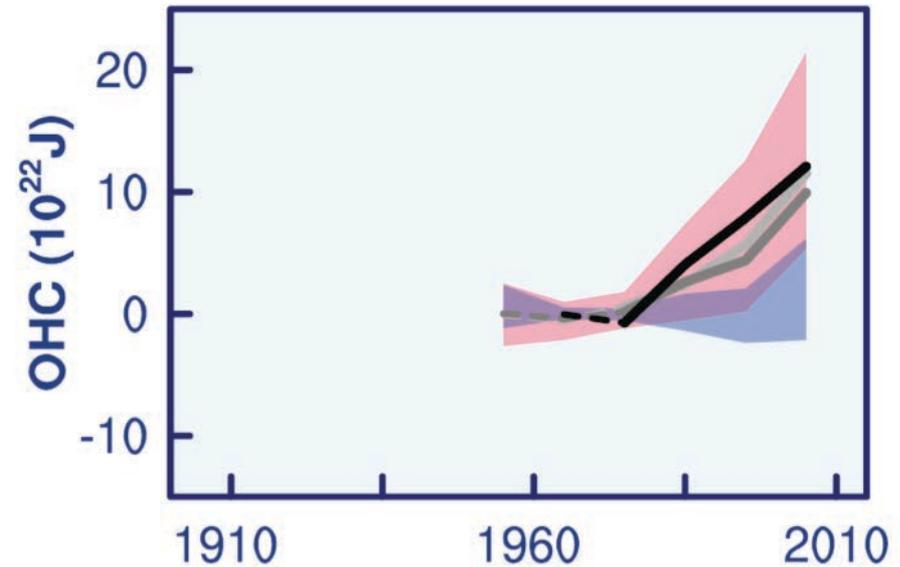
Units: GtC (billions tons of carbon) or GtC/year

Stocks!

Température moyenne surface des continents



Contenu thermique des océans



(IPCC 2013, Fig. SPM.6)

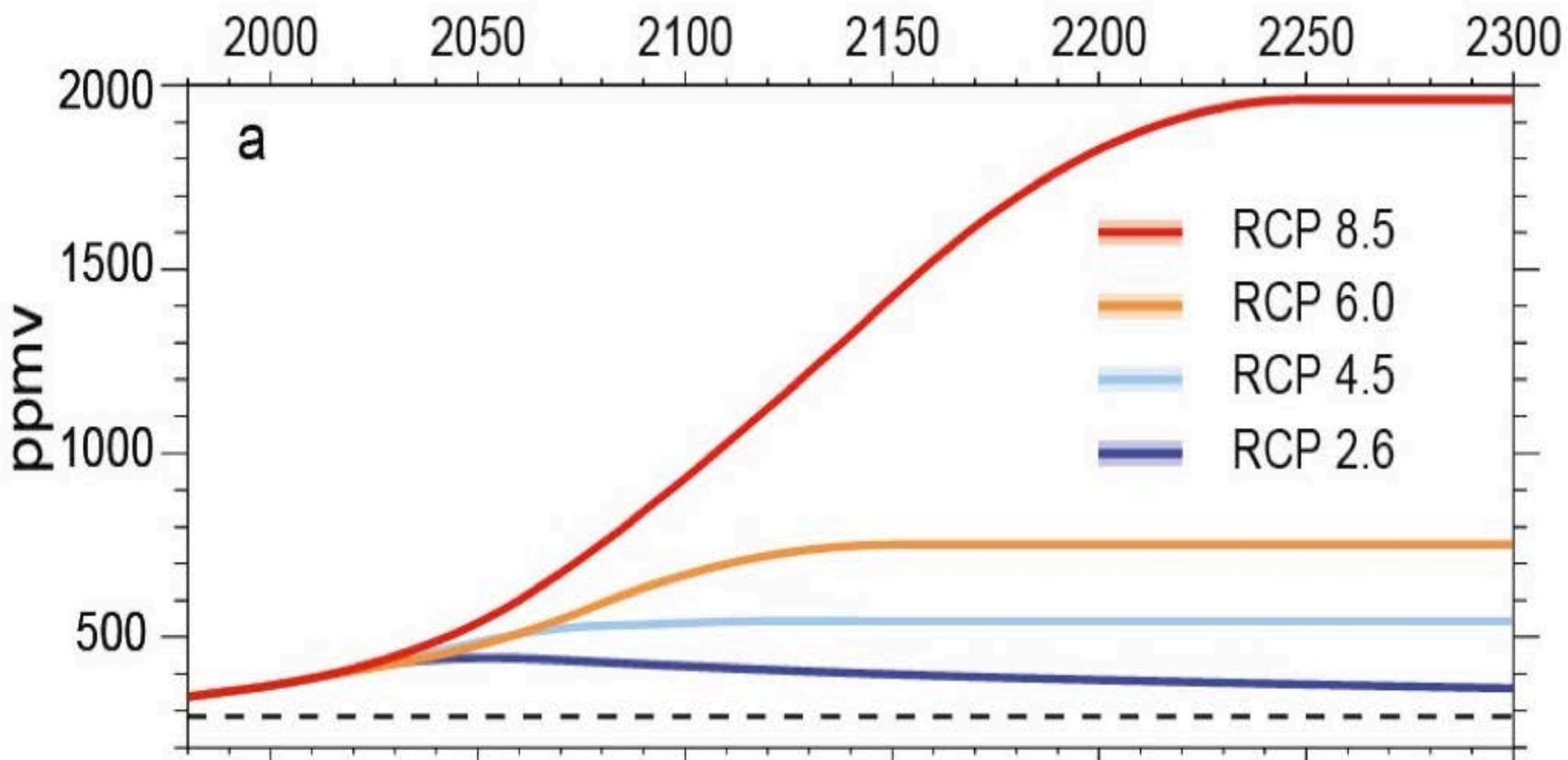
Noir: observations

Bleu: simulations avec seuls facteurs naturels

Rose: simulations avec facteurs naturels & humains

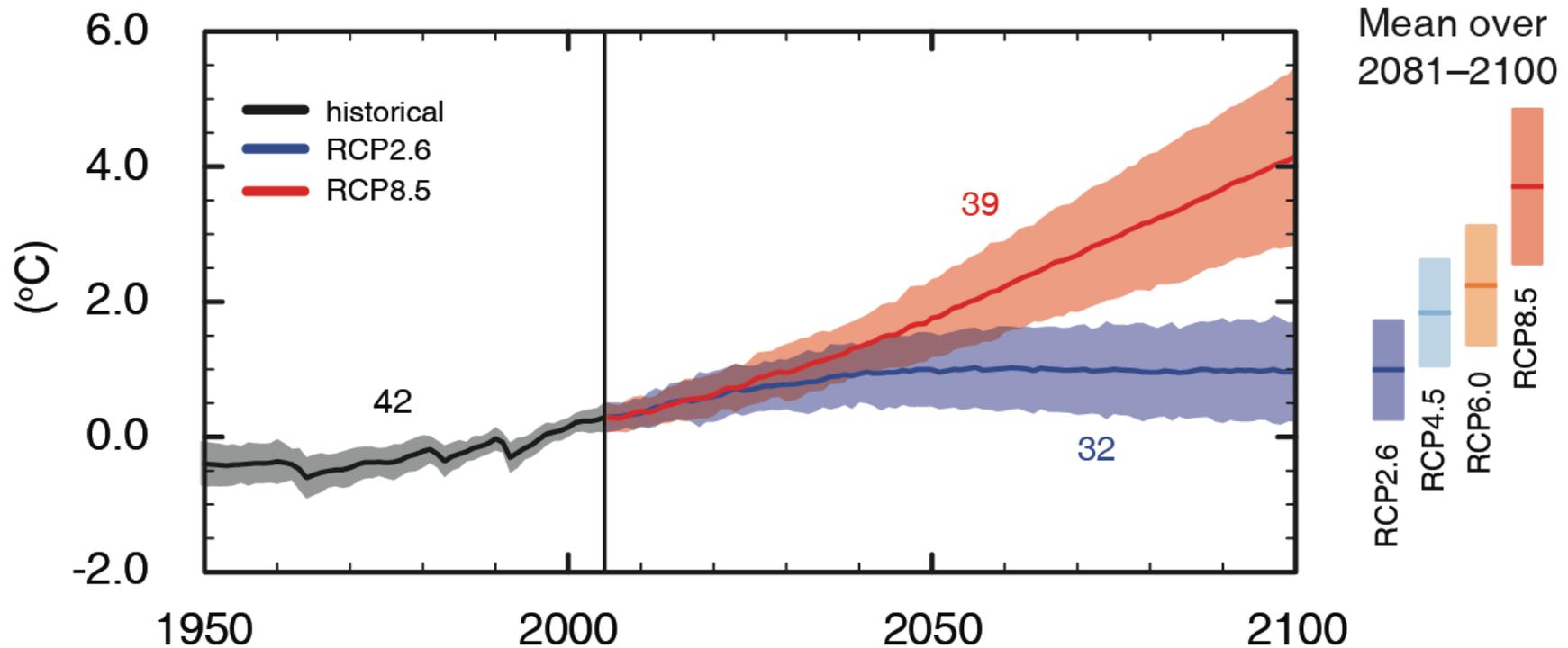
L'influence humaine sur le système climatique est sans équivoque; Il est *extrêmement probable* (95%) que l'influence humaine a été la cause principale du réchauffement depuis le milieu du 20^{ème} siècle

RCP Scenarios: Atmospheric CO₂ concentration



Three stabilisation scenarios: RCP 2.6 to 6
One Business-as-usual scenario: RCP 8.5

Global average surface temperature change (Ref: 1986-2005)

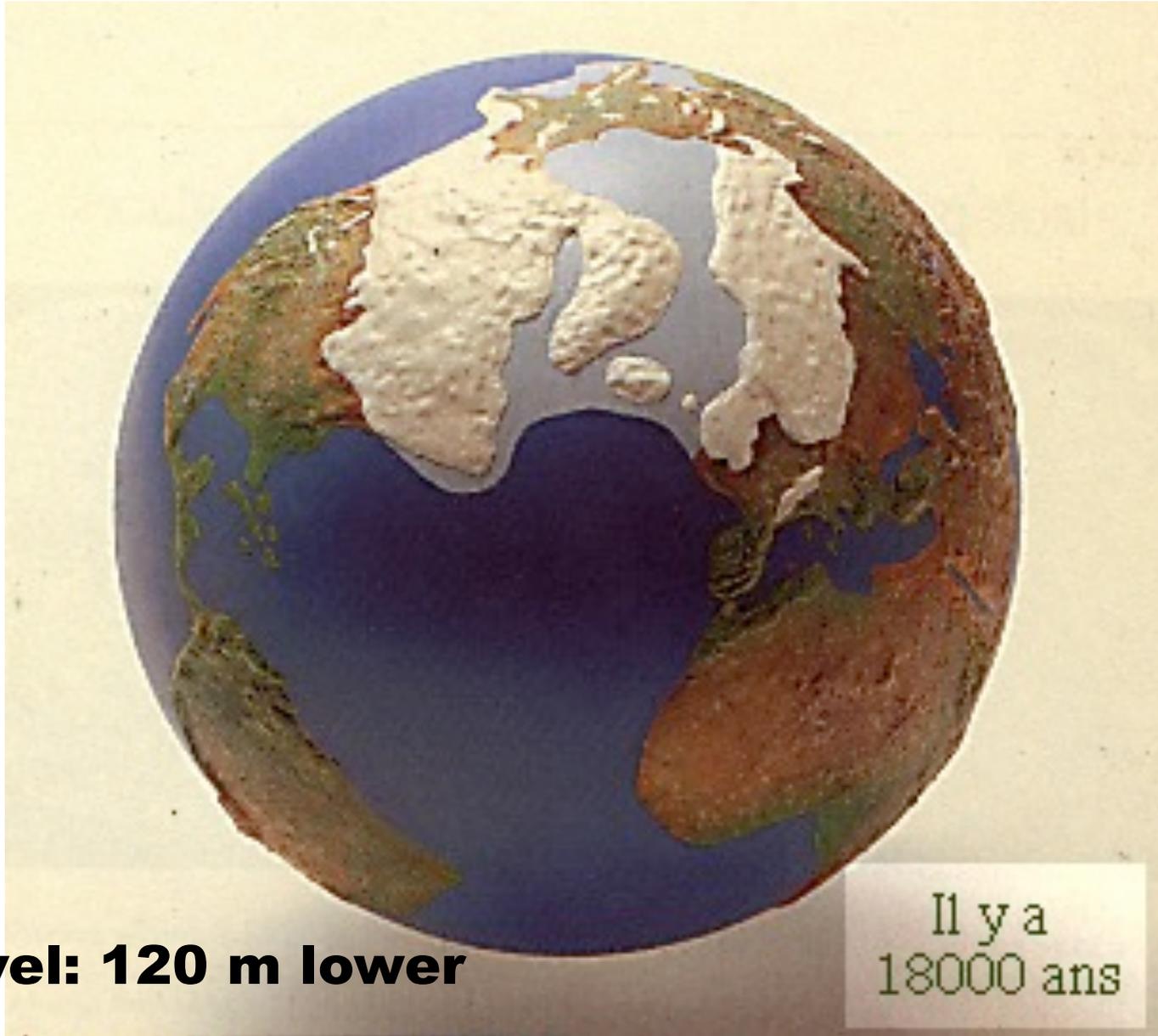


(IPCC 2013, Fig. SPM.7a)

Seul le scénario d'émissions le plus bas (RCP2.6) permet de maintenir l'augmentation de la température moyenne du globe en surface en-dessous de 2°C (relativement à 1850-1900) avec une probabilité d'au moins 66%.

18-20000 years ago (Last Glacial Maximum)

With permission from Dr. S. Joussaume, in « Climat d'hier à demain », CNRS éditions.

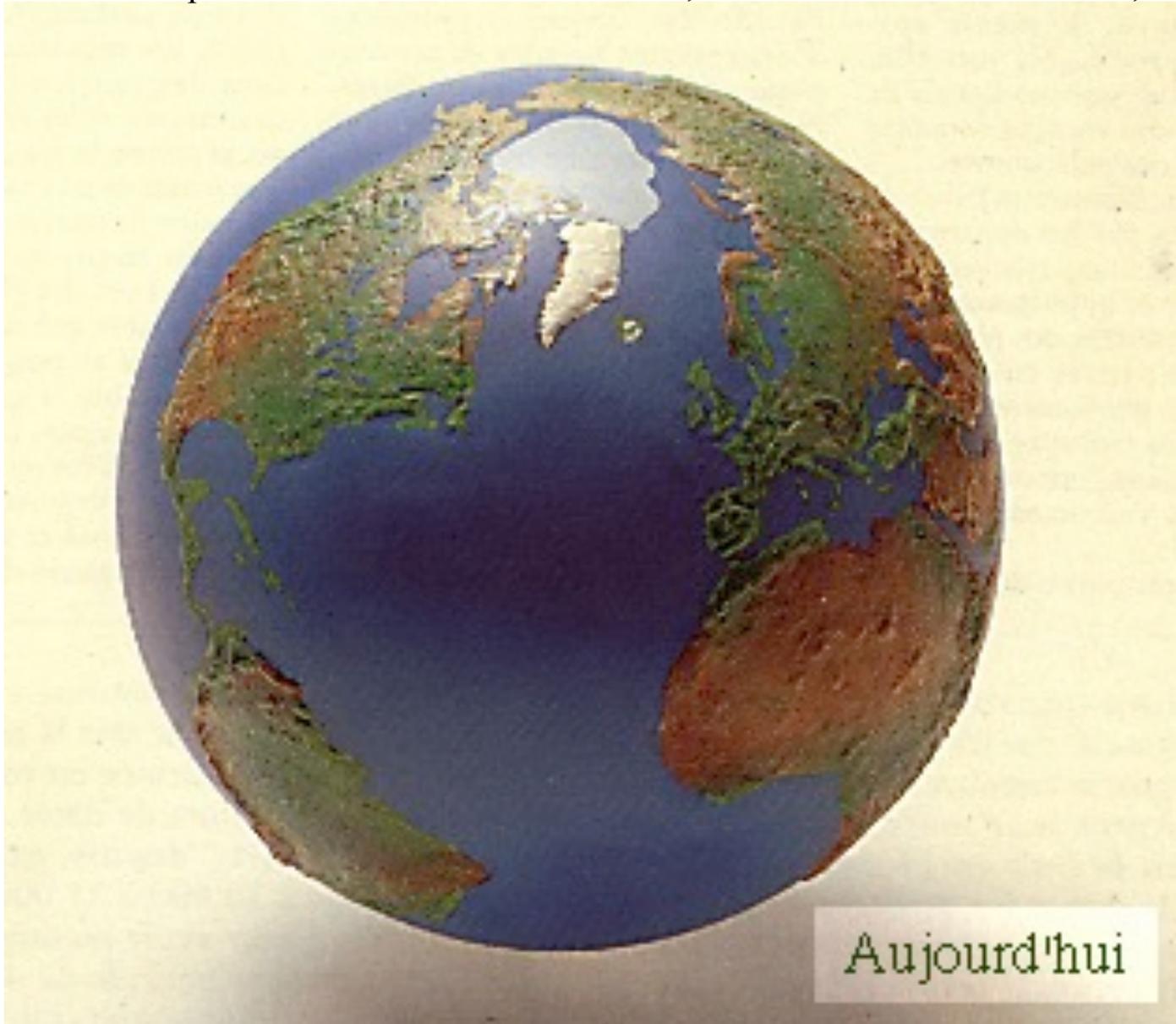


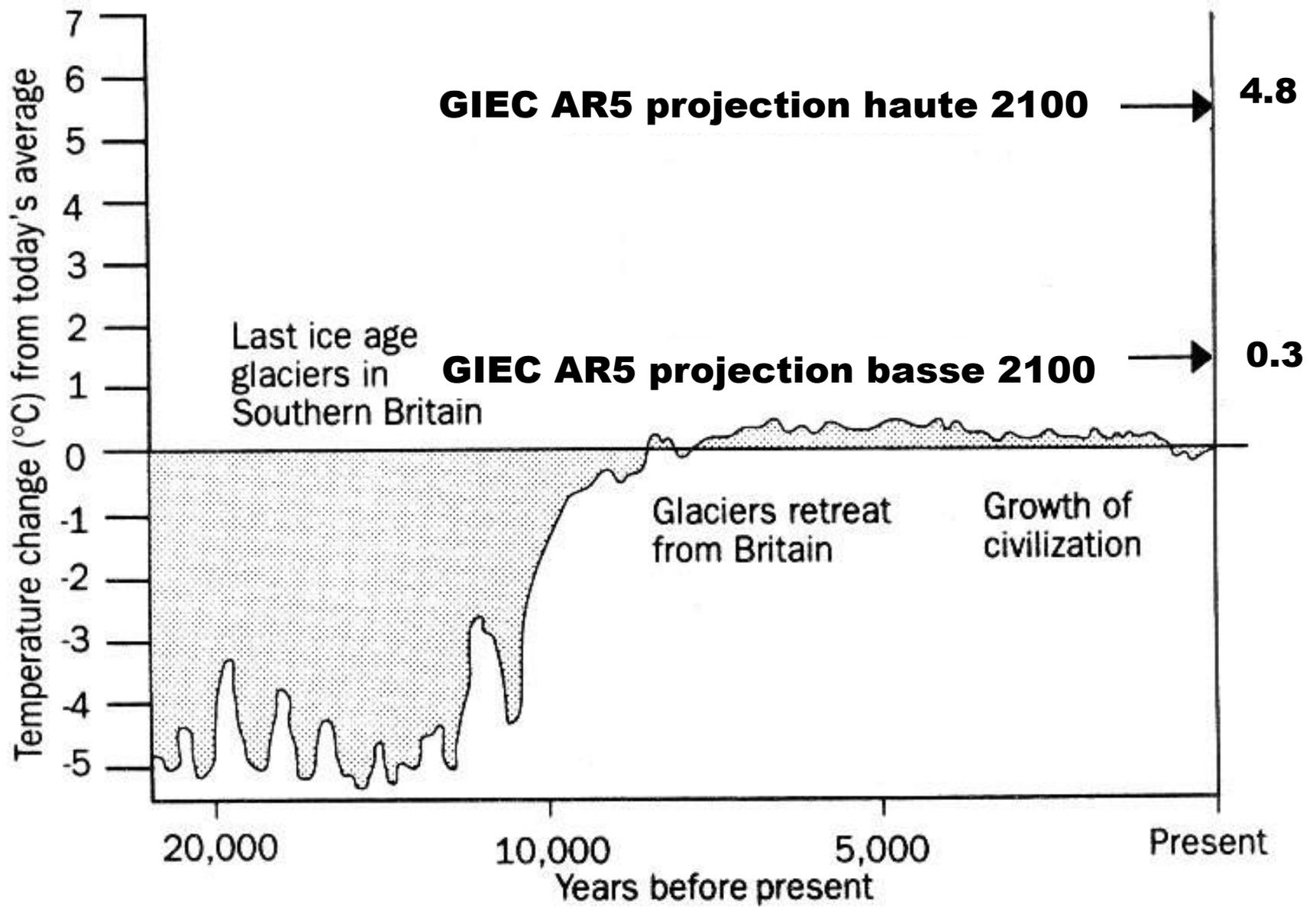
Sea level: 120 m lower

Il y a
18000 ans

Today, with +4-5°C globally

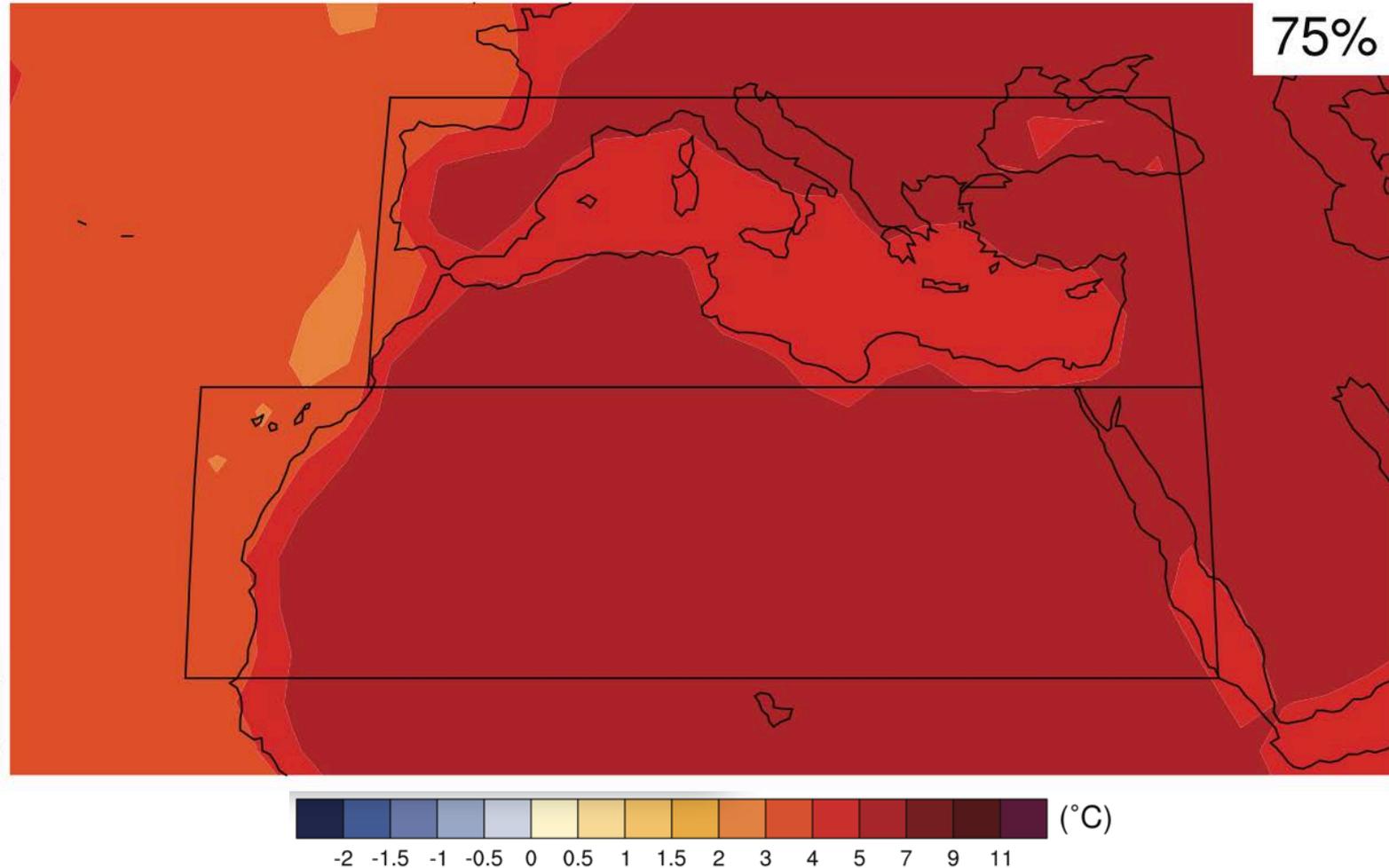
With permission from Dr. S. Joussaume, in « Climat d'hier à demain », CNRS éditions.



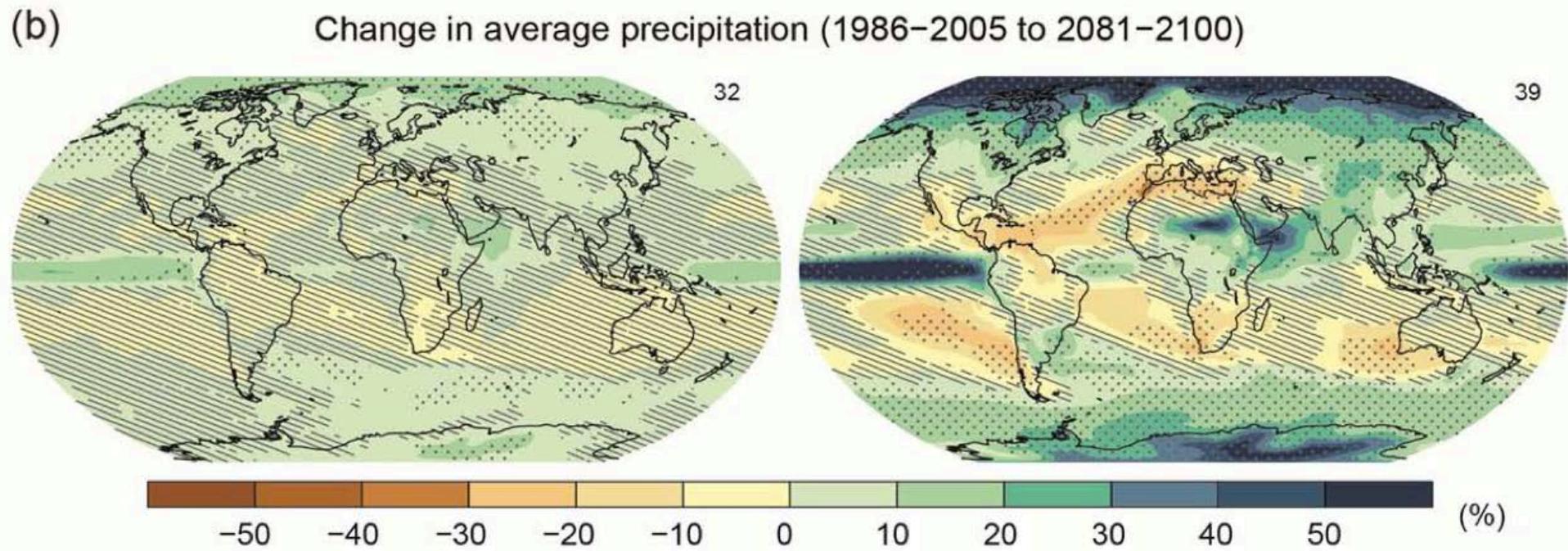


Adapted from: International Geosphere Biosphere Programme Report no.6, Global Changes of the Past, July 1988

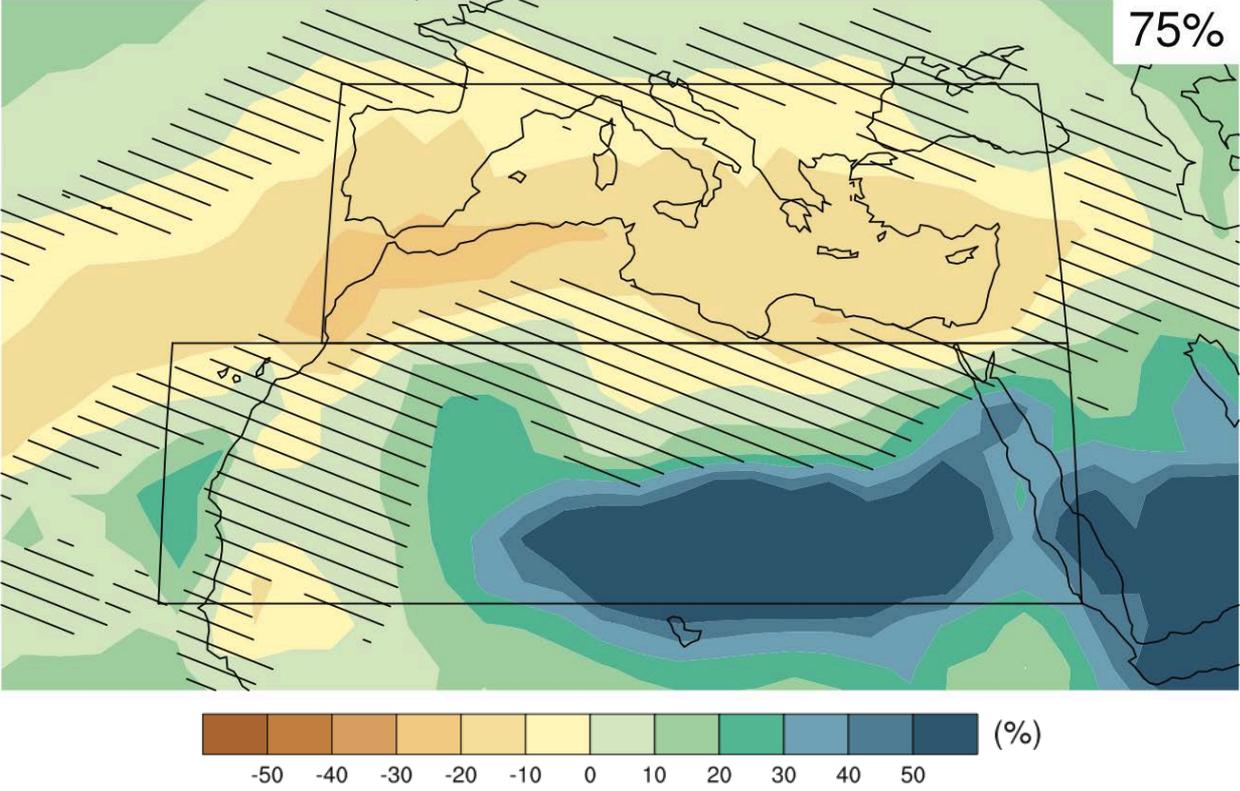
Maps of temperature changes in 2081–2100 with respect to 1986–2005 in the RCP8.5 scenario



Projections de l'évolution du total des pluies



Map of precipitation changes in 2081–2100 with respect to 1986–2005 in the RCP8.5 scenario



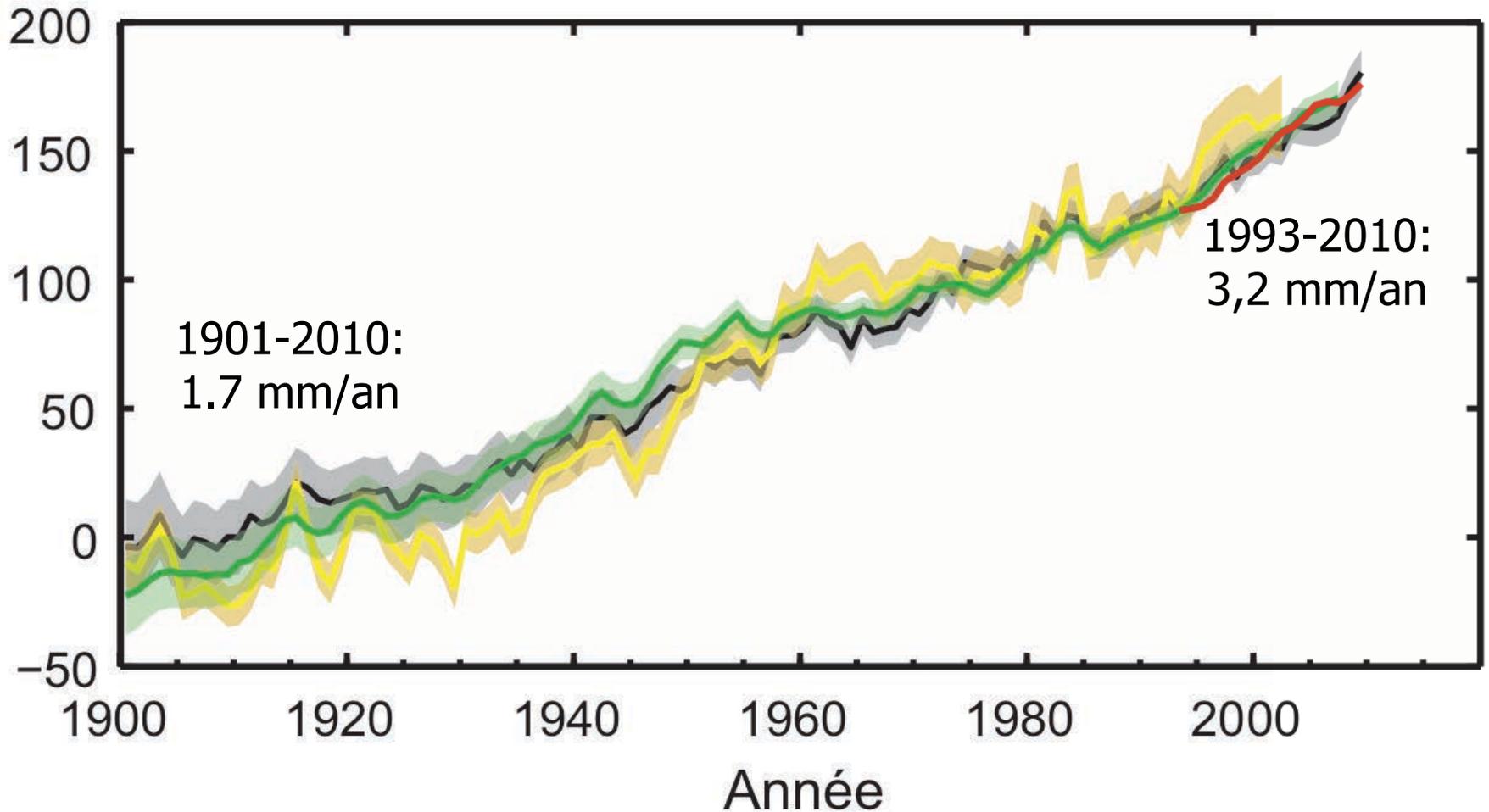
Regions where the projected change is less than one standard deviation of the natural internal variability



Regions where the projected change is large compared to natural internal variability, and where at least 90% of models agree on a sign of change

Niveau des mers moyen - 20e siècle

Évolution du niveau moyen des mers



Niveau moyen des mers

Entre 1901 et 2010, le niveau moyen des mers à l'échelle du globe s'est élevé de 0,19 m [de 0,17 à 0,21 m]. Depuis le milieu du XIXe siècle, le rythme d'élévation du niveau moyen des mers est supérieur au rythme moyen des deux derniers millénaires (*degré de confiance élevé*)

Contributions observées

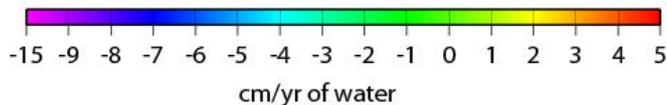
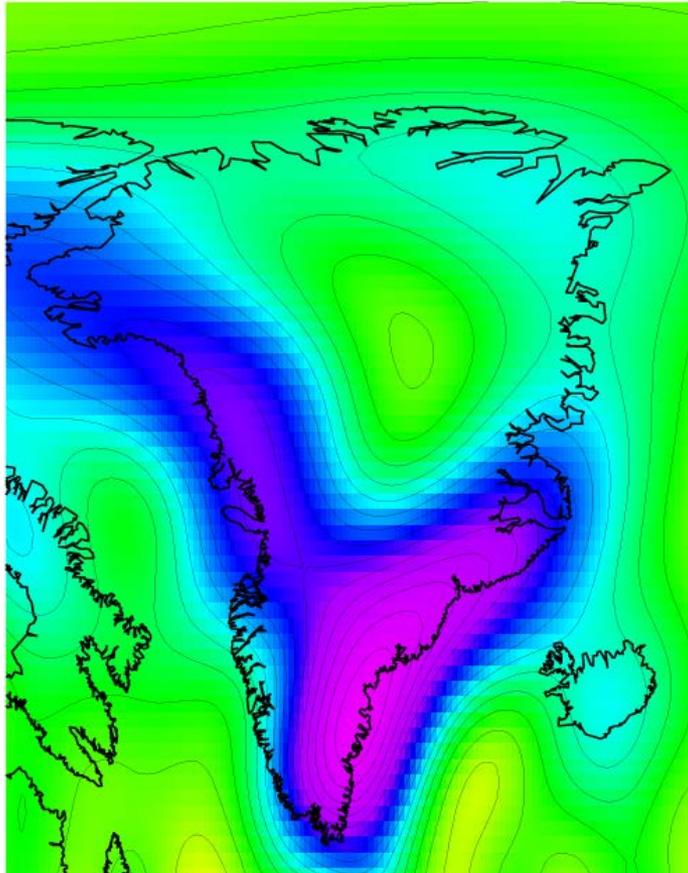
- Elevation du niveau moyen des mers, 1993-2010

Expansion thermique	1,1	[0,8 à 1,4] mm/an	(x10: cm/siècle)
Fonte des glaciers	0,76	[0,39 à 1,13]	
Groenland	0,33	[0,25 à 0,41]	
Antarctique	0,27	[0,16 à 0,38]	
Eaux continentales	0,38	[0,26 à 0,49]	
Total	2,8	[2,3 à 3,4]	

Greenland Ice Mass Loss 2002-2009

Derived From NASA GRACE Gravity Mission

Greenland

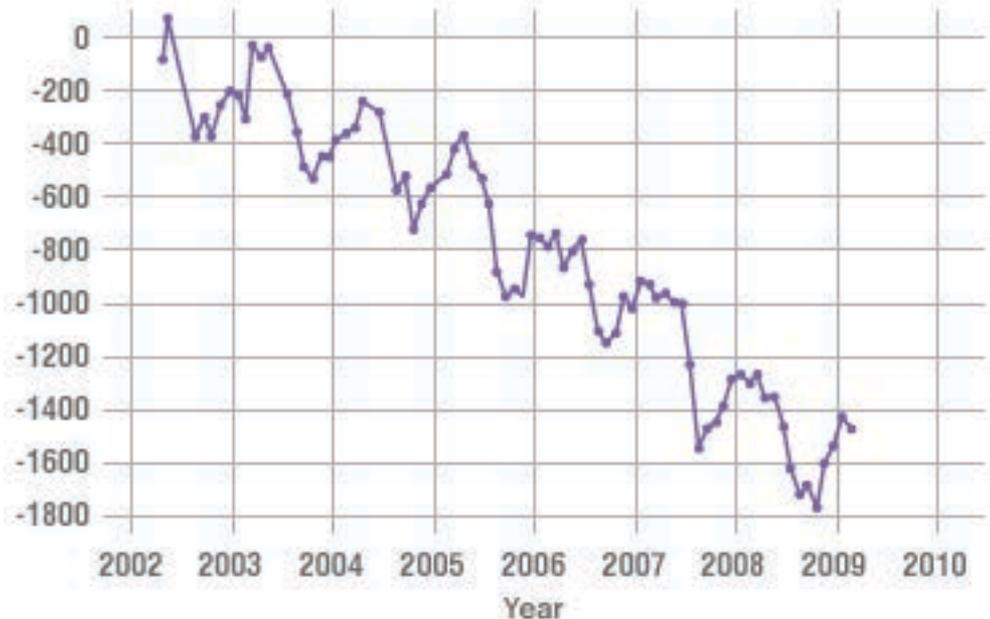


J. Wahr, U. Colorado

GREENLAND MASS VARIATION SINCE 2002

Data source: Ice mass measurement by NASA's Grace satellites.

Change in Ice Mass Loss Gigatons

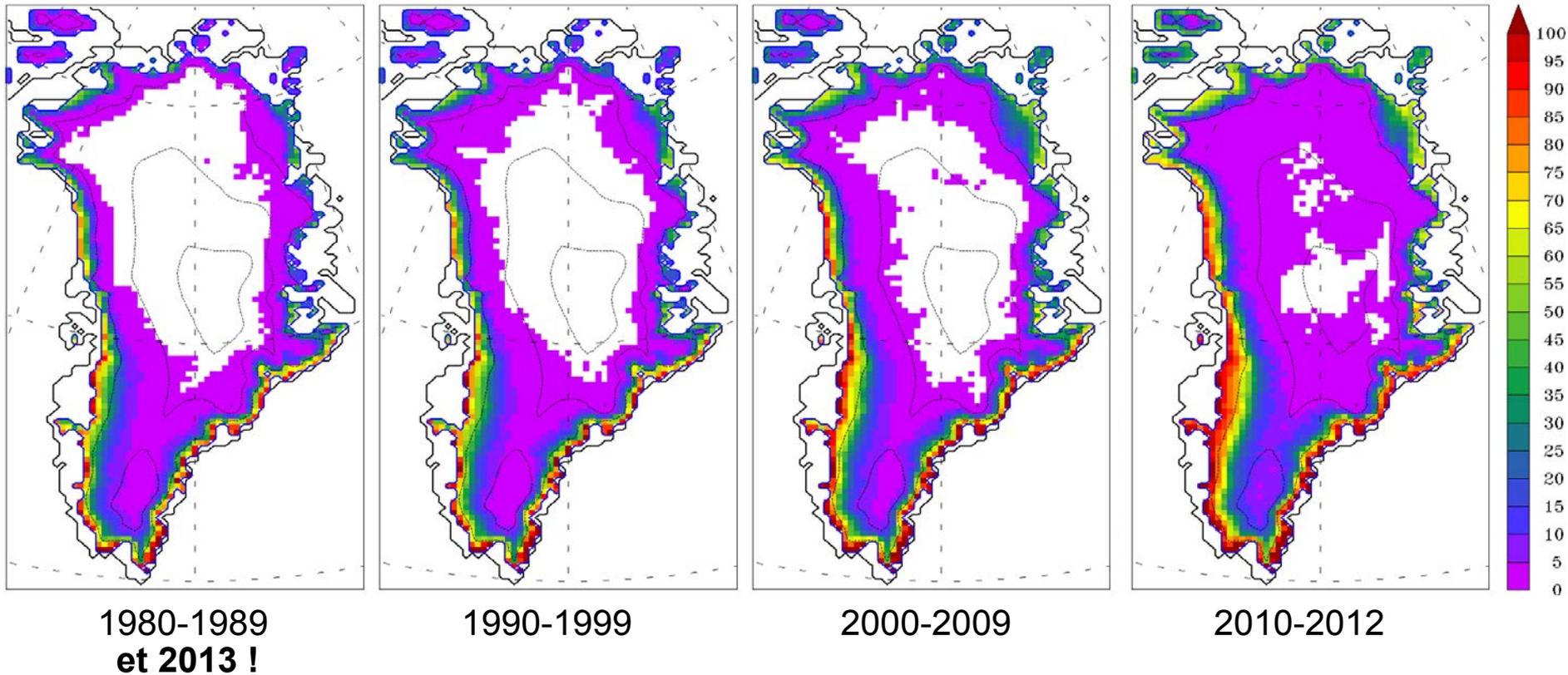


Velicogna, Geophysical Research Letters, 2009

•Contributes to sea level rise

Groenland - climat présent

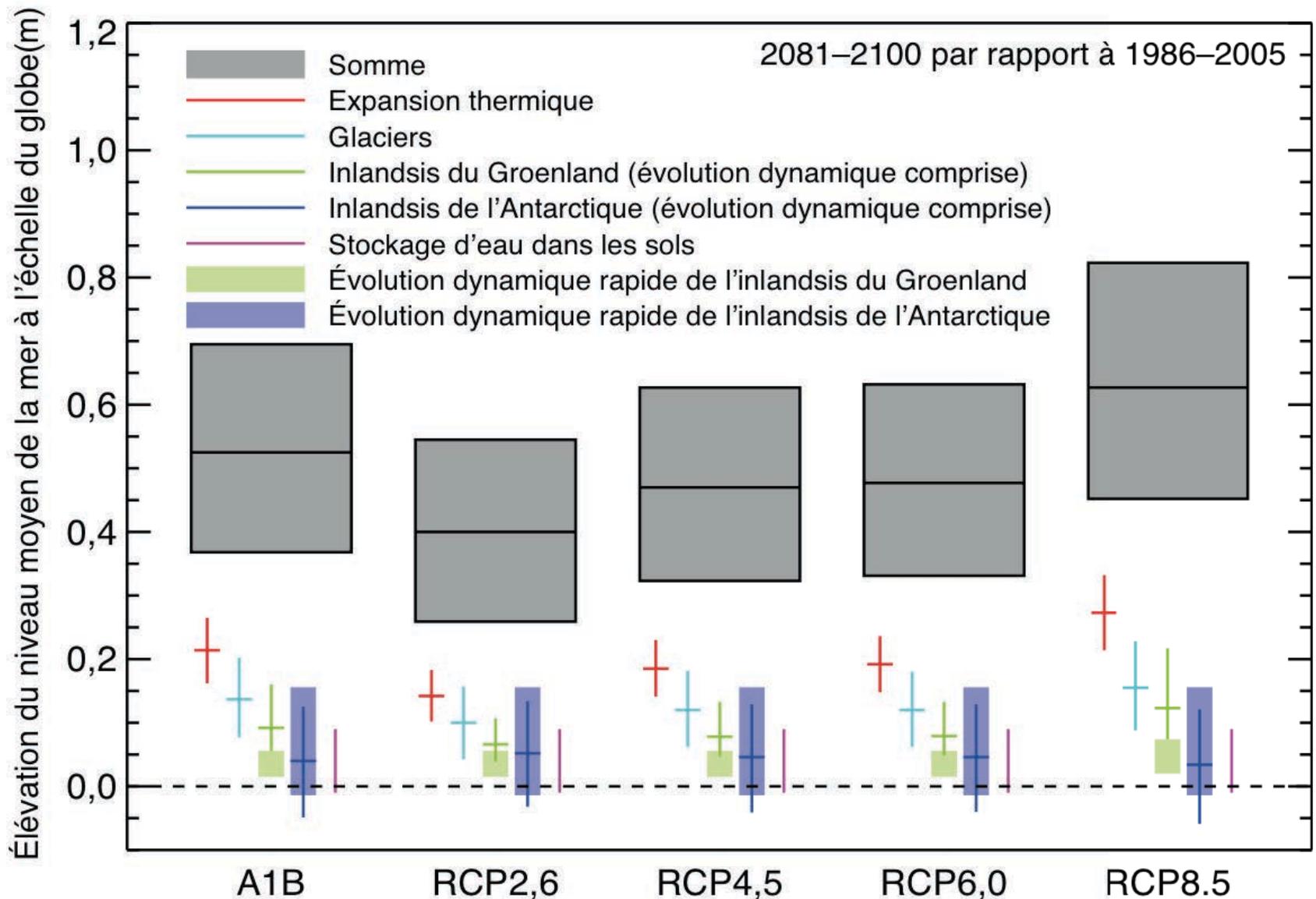
Augmentation de l'étendue et de la durée de la saison de fonte



Nbr de jours de fonte par an détecté par les satellites

© Fettweis et al. (TC, 2011)

Elevation du niveau des mers : fin 21e siècle



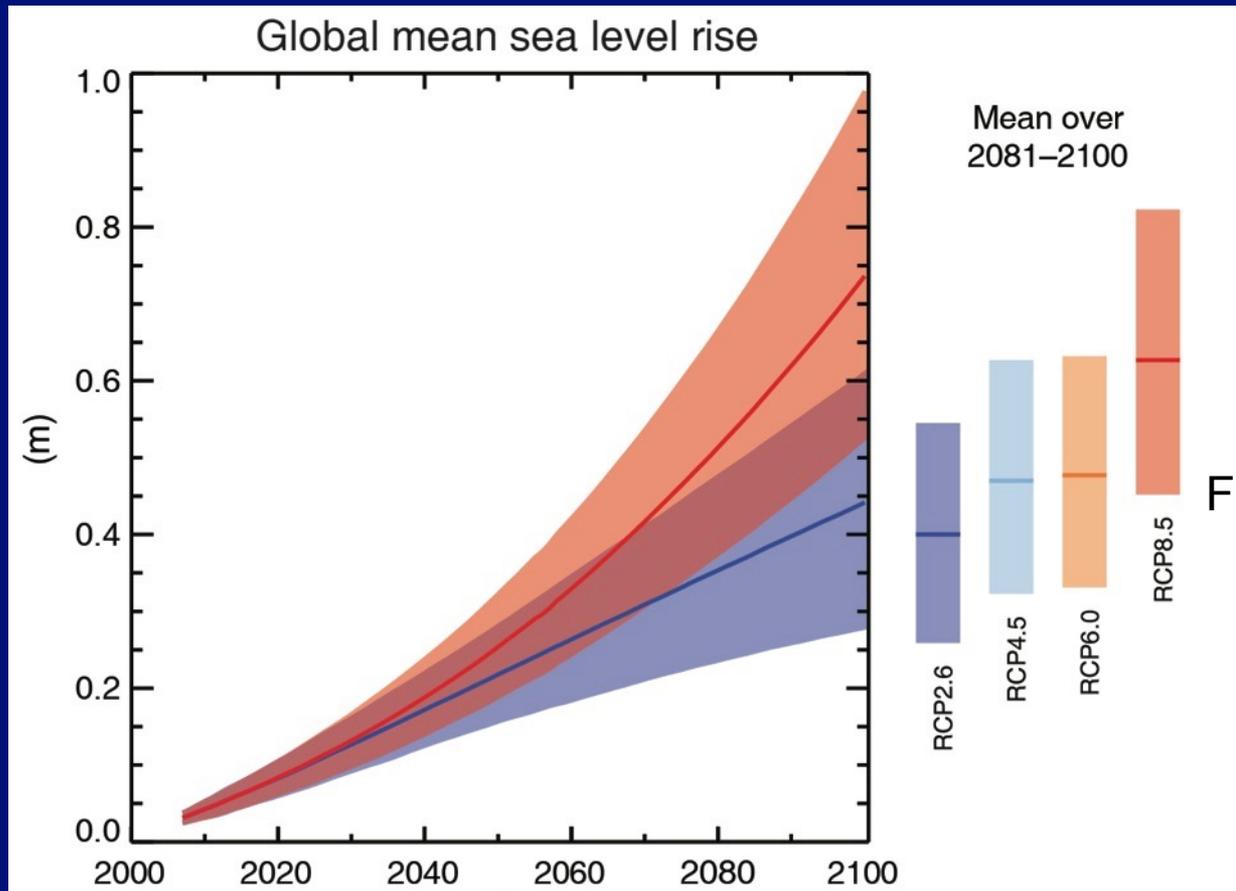


Fig. SPM.9

RCP2.6 (2081-2100), *likely* range: 26 to 55 cm

RCP8.5 (in 2100), *likely* range: 52 to 98 cm

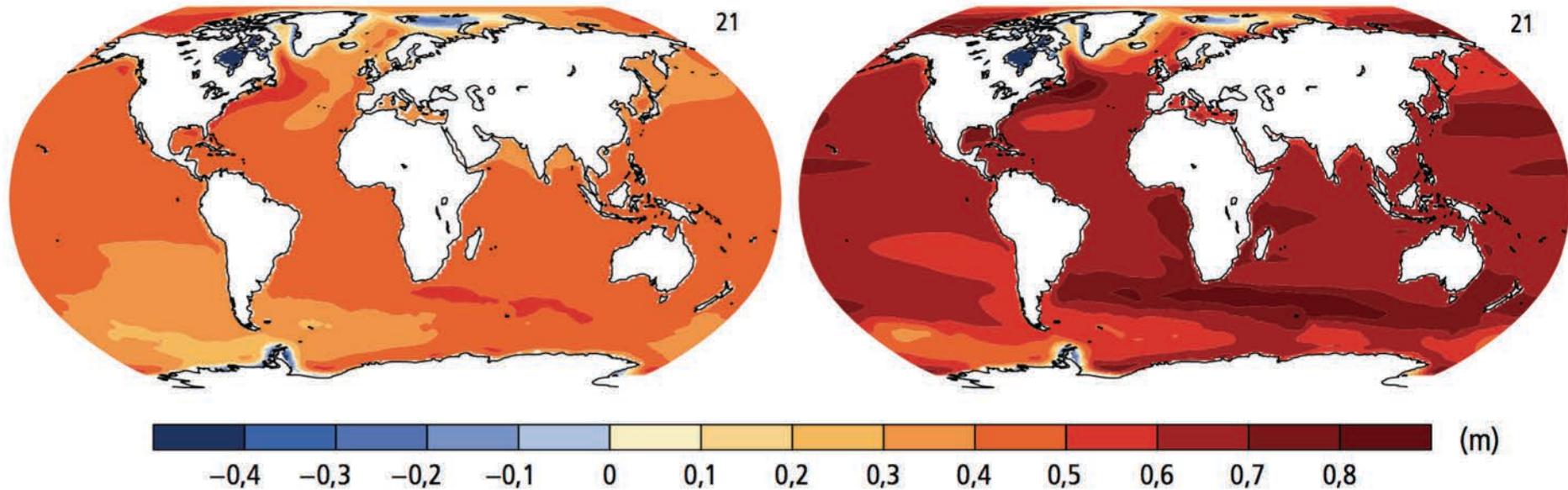
Élévation du niveau moyen de la mer à l'échelle mondiale (m)

Scénario	2046–2065		2081–2100	
	Moyenne	Plage probable ^d	Moyenne	Plage probable ^d
RCP2,6	0,24	0,17 à 0,32	0,40	0,26 à 0,55
RCP4,5	0,26	0,19 à 0,33	0,47	0,32 à 0,63
RCP6,0	0,25	0,18 à 0,32	0,48	0,33 à 0,63
RCP8,5	0,30	0,22 à 0,38	0,63	0,45 à 0,82

Projection de l'évolution du niveau de la mer

L'élévation du niveau des mers ne sera pas uniforme entre les différentes régions. À la fin du XXI^e siècle, il est *très probable* que le niveau des mers augmentera sur plus de 95 % environ de la surface des océans. Selon les projections, environ 70 % des littoraux du monde vont connaître un changement du niveau des mers proche de l'élévation moyenne, à plus ou moins 20 % près.

Évolution du niveau moyen de la mer (entre 1986-2005 et 2081-2100)

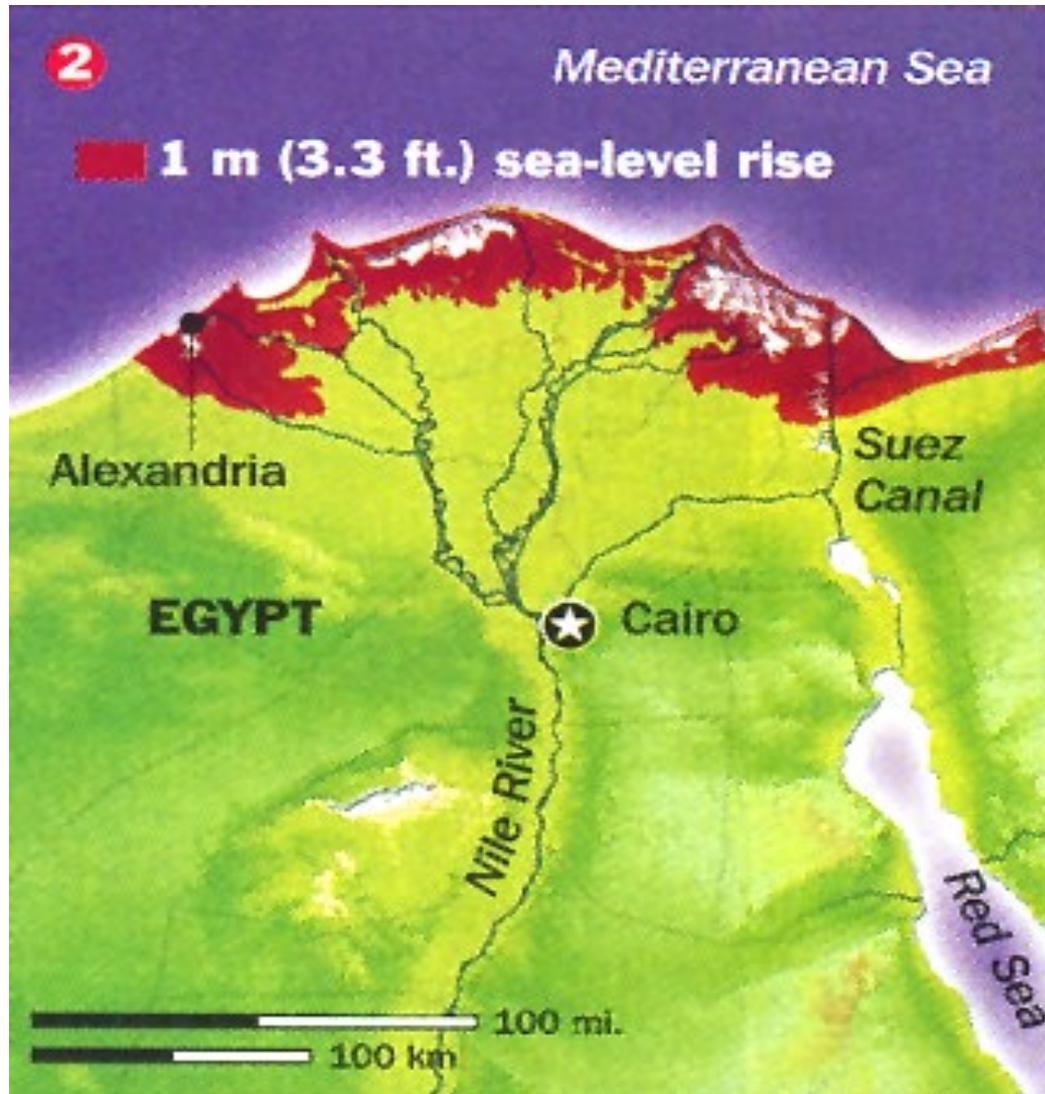


**With 1 metre sea-level rise: 63000 ha below sea-level in Belgium (likely in 22nd century, not impossible in 21st century)
(NB: flooded area depends on protection)**



Source: N. Dendoncker (Dépt de Géographie, UCL), J.P. van Ypersele et P. Marbaix (Dépt de Physique, UCL)

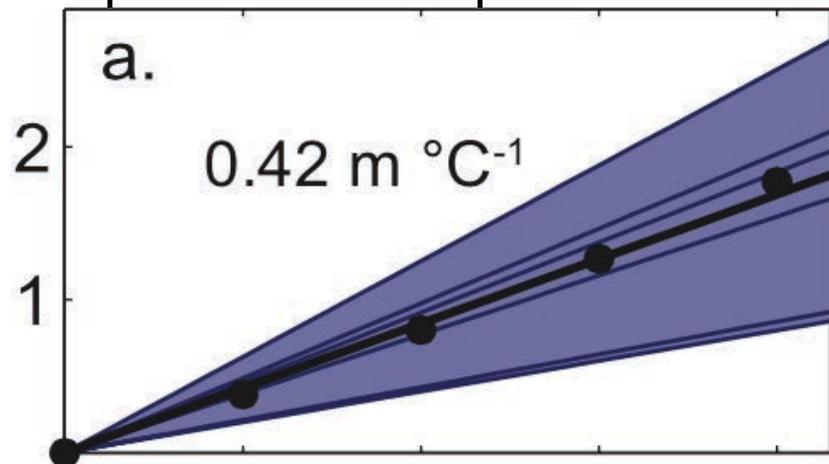
Effets sur le Delta du Nil, où vivent plus de 10 millions de personnes à moins d'1 m d'altitude



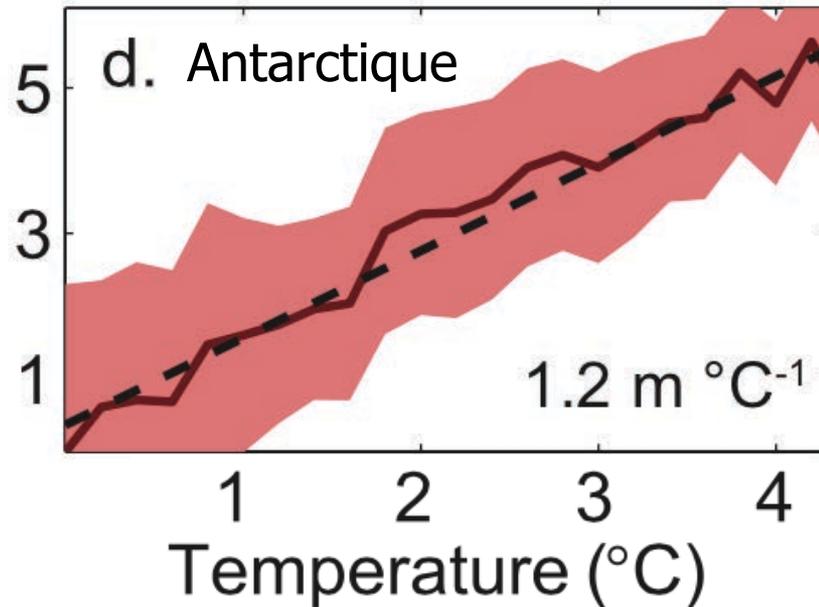
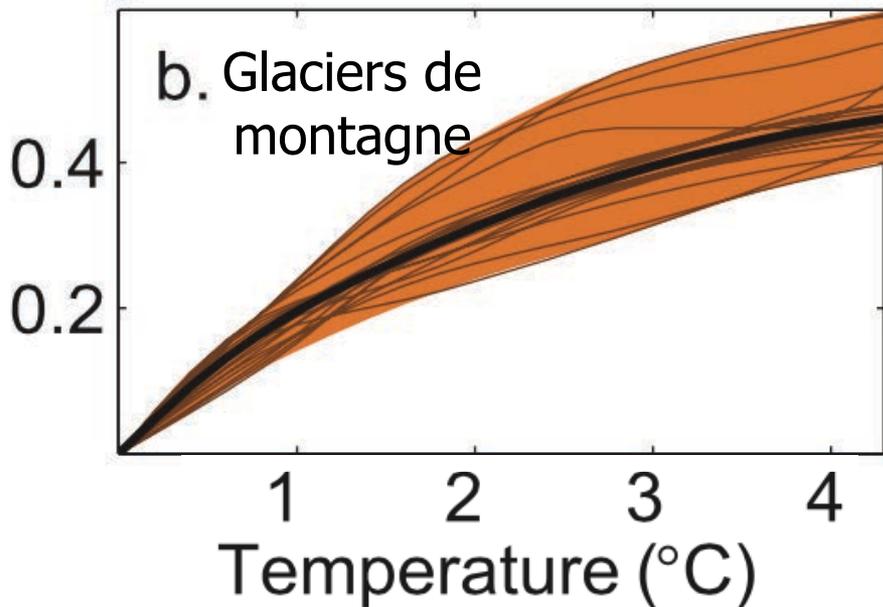
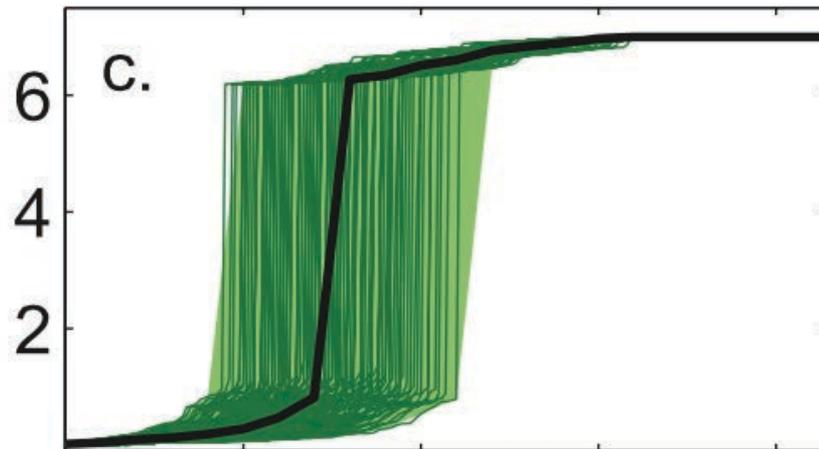
(Time 2001)

Futur à très long terme pour un réchauffement donné

Expansion thermique



Groenland



Elevation future : total après 2000 ans

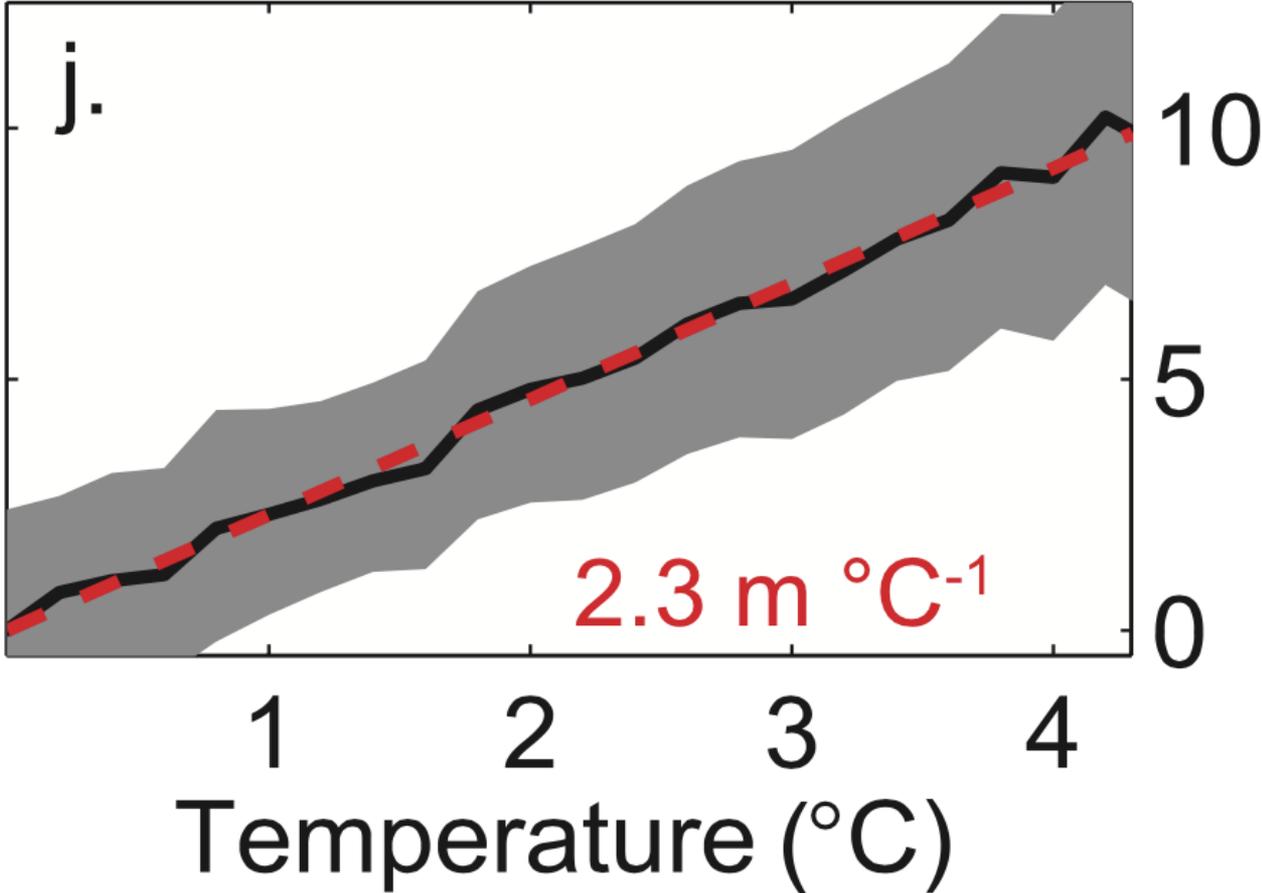
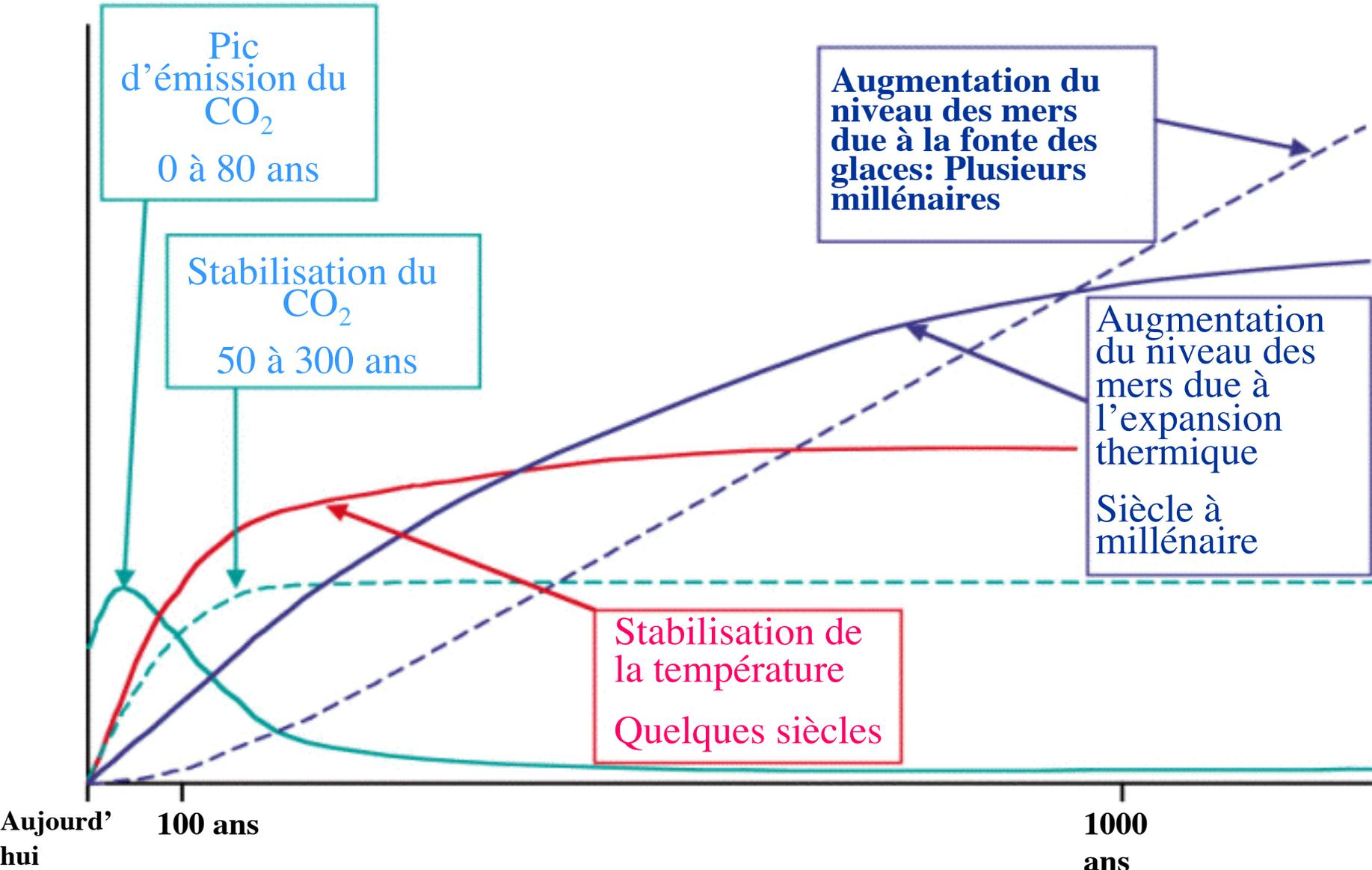


Figure 14 : Il existe une inertie significative dans le système climatique



Impacts Potentiels des Changements Climatiques



Pénurie de nourriture
et d'eau



Migrations humaines
accrues



Pauvreté accrue



Inondations régions
côtières

AR5 WGII SPM

Risque = Aléa x Vulnérabilité x Exposition (Victimes des inondations après Katrina)

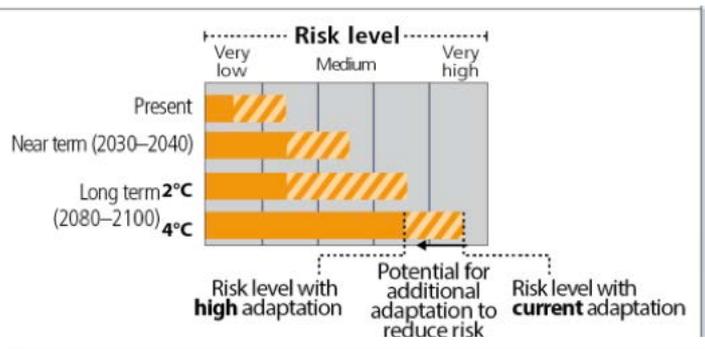
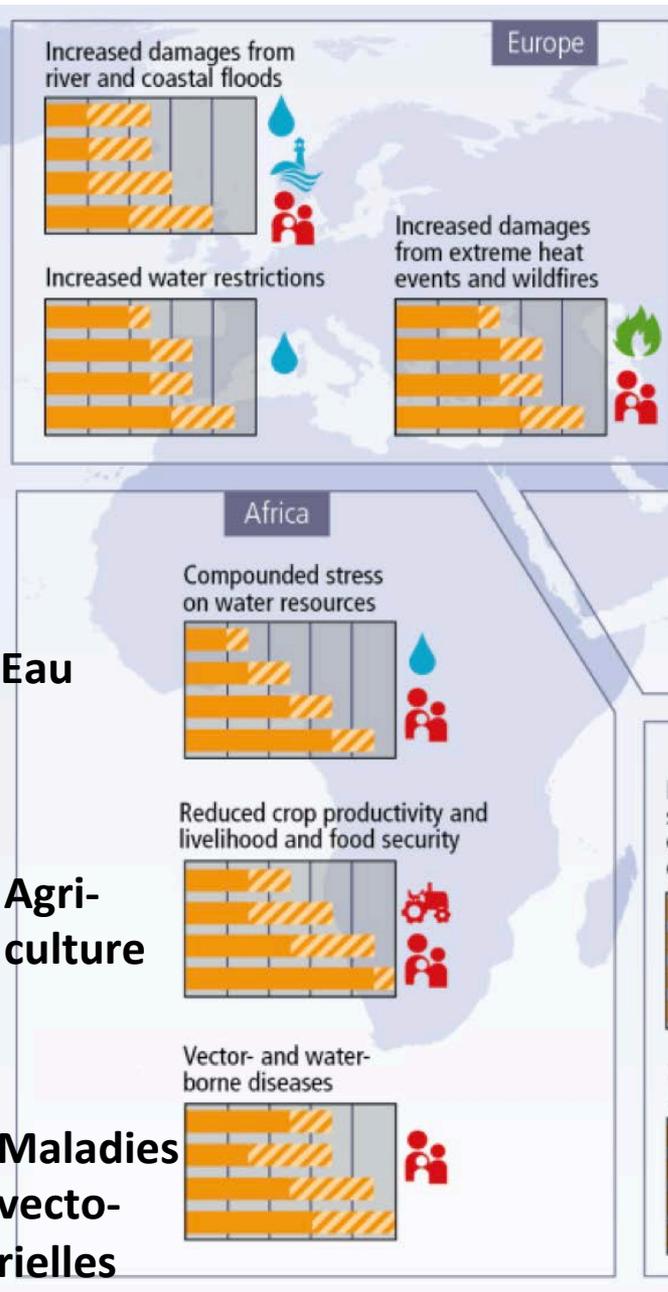




VULNERABILITE ET EXPOSITION

DANS LE MONDE ENTIER

Risques clés à l'échelle régionale et potentiel de réduction du risque par l'adaptation: Afrique



Risque majeur pour l'Afrique: eau

Aggravation des pressions exercées sur les ressources hydriques déjà lourdement sollicitées par la surexploitation et la dégradation, et qui feront face à l'avenir à une demande accrue. Stress dû à la sécheresse exacerbé dans les régions africaines déjà exposées à ce fléau (*degré de confiance élevé*).

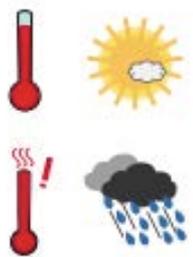
Facteurs climatiques	Échéancier	Risques et possibilités d'adaptation		
		Très faibles	Modérés	Très élevés
 	Moment présent	[Barre orange à 25%]		
	Court terme (2030–2040)	[Barre orange à 50%]		
	Long terme 2°C (2080–2100) 4°C	[Barre orange à 75%]		



Facteurs déterminants des incidences liées au climat										
										<p>Tendance au réchauffement</p> <p>Température extrême</p> <p>Tendance à l'assèchement</p> <p>Précipitations extrêmes</p> <p>Précipitations</p> <p>Enneigement</p> <p>Cyclones destructeurs</p> <p>Niveau de la mer</p> <p>Acidification des océans</p> <p>Fertilisation par le dioxyde de carbone</p>

Risque majeur pour l'Afrique: agriculture

Baisse de la productivité des cultures due à la chaleur et à la sécheresse — dont les conséquences sur les moyens de subsistance et la sécurité alimentaire des pays, des régions et des ménages pourraient être graves — ainsi qu'aux dommages causés par les ravageurs, les maladies et les inondations sur l'infrastructure des systèmes alimentaires (degré de confiance élevé)

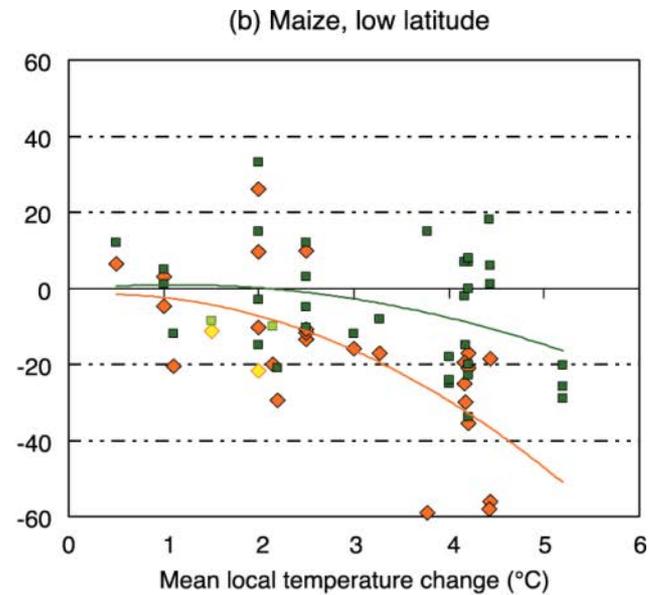
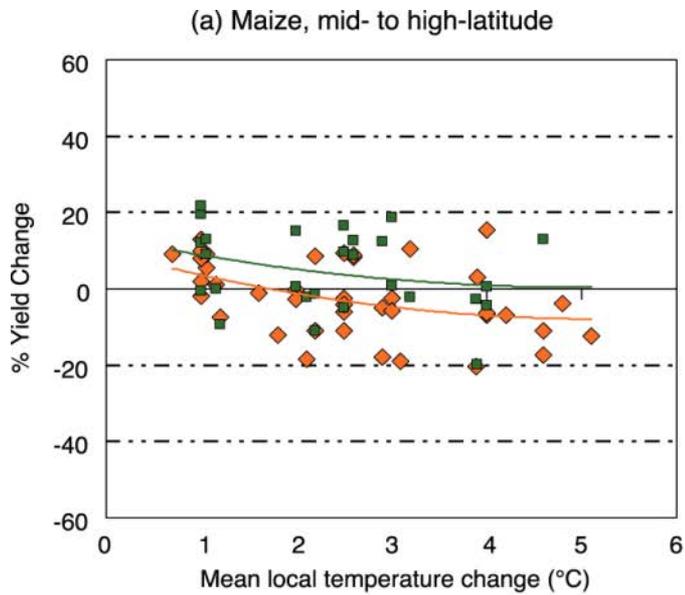
Facteurs climatiques	Échéancier	Risques et possibilités d'adaptation		
		Très faibles	Modérés	Très élevés
	Moment présent	[Bar chart showing low risk]		
	Court terme (2030–2040)	[Bar chart showing moderate risk]		
	Long terme 2°C (2080–2100) 4°C	[Bar chart showing high risk]		



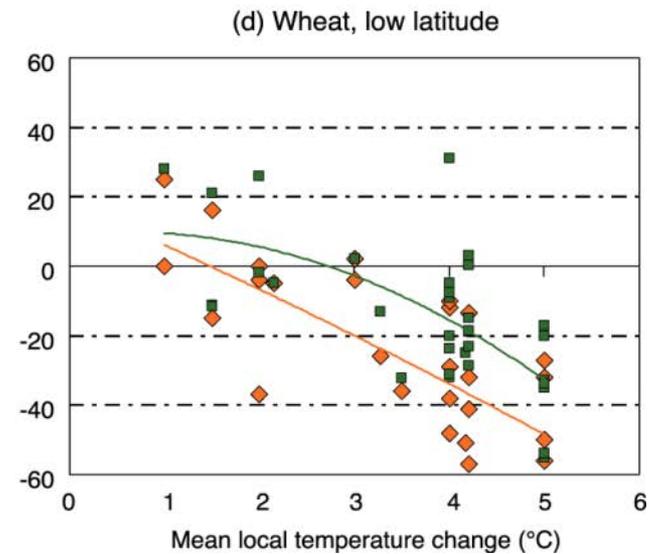
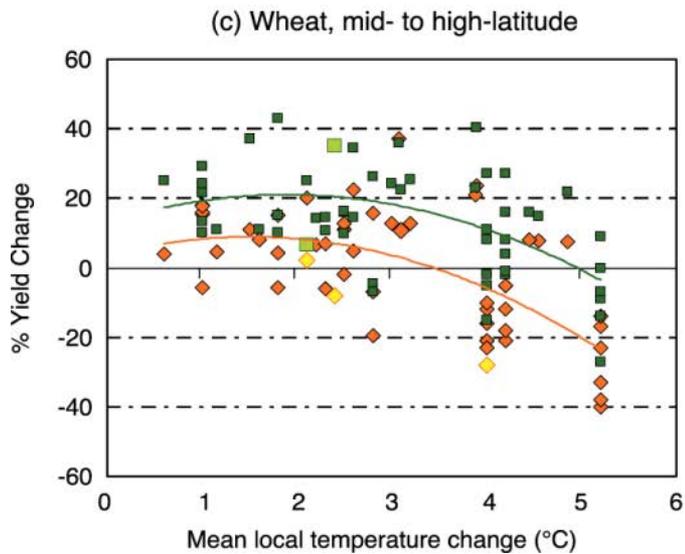
Facteurs déterminants des incidences liées au climat									
									
Tendance au réchauffement	Température extrême	Tendance à l'assèchement	Précipitations extrêmes	Précipitations	Enneigement	Cyclones destructeurs	Niveau de la mer	Acidification des océans	Fertilisation par le dioxyde de carbone

Figure TS.7. Sensitivity of cereal yield to climate change

Mais



Blé



Risque majeur pour l'Afrique: santé

Variations de l'incidence et de l'extension géographique des maladies à transmission vectorielle ou d'origine hydrique dues à l'évolution des températures et des précipitations moyennes et de leur variabilité, en particulier aux limites de leurs aires de répartition (*degré de confiance moyen*)

Facteurs climatiques	Échéancier	Risques et possibilités d'adaptation		
		Très faibles	Modérés	Très élevés
	Moment présent		Modérés	
	Court terme (2030–2040)		Modérés	
	Long terme 2°C (2080–2100)		Modérés	
	4°C		Modérés	



Facteurs déterminants des incidences liées au climat									
Tendance au réchauffement	Température extrême	Tendance à l'assèchement	Précipitations extrêmes	Précipitations	Enneigement	Cyclones destructeurs	Niveau de la mer	Acidification des océans	Fertilisation par le dioxyde de carbone

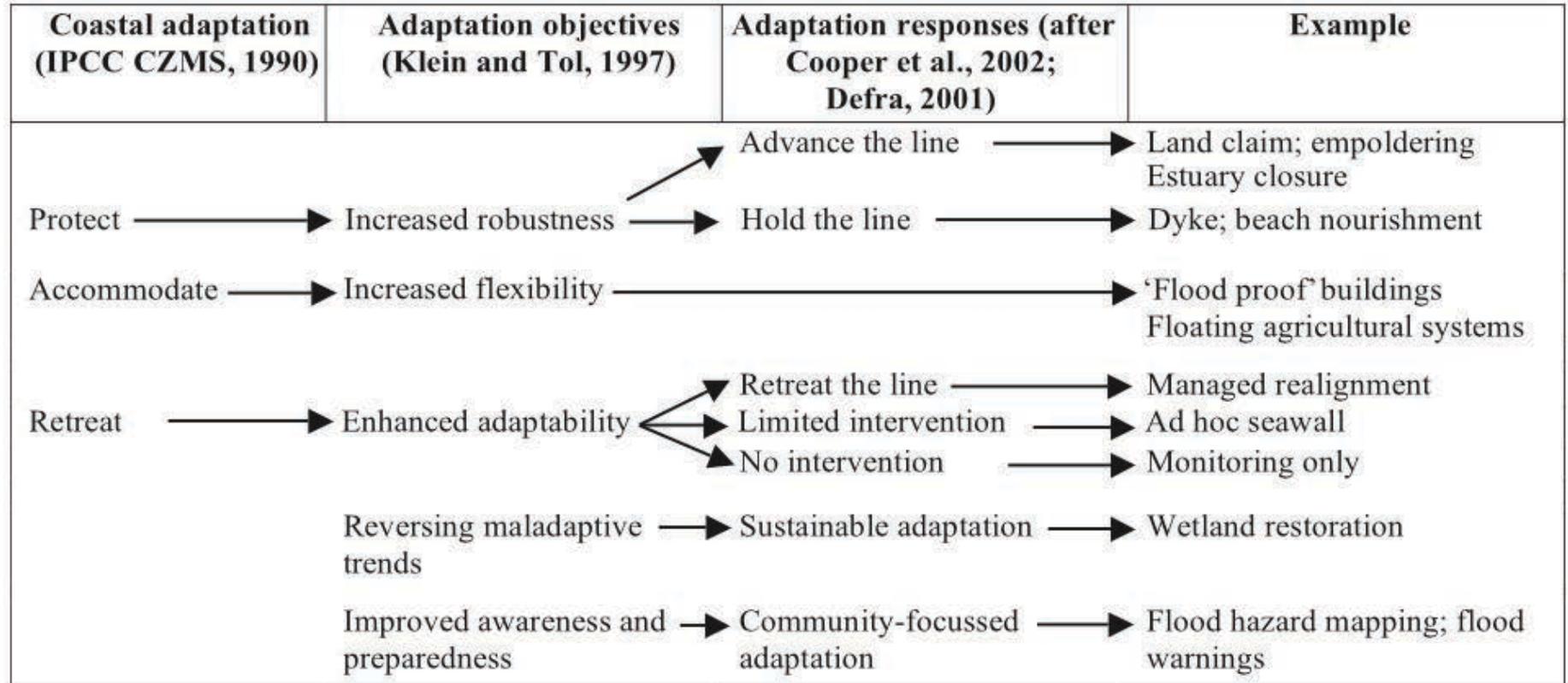
Systemes côtiers

Les systemes côtiers et les basses terres littorales sont menacés par l'élévation du niveau de la mer qui, même si la température moyenne de la planète est stabilisée, se poursuivra sur plusieurs siècles (*degré de confiance élevé*).

Systemes côtiers

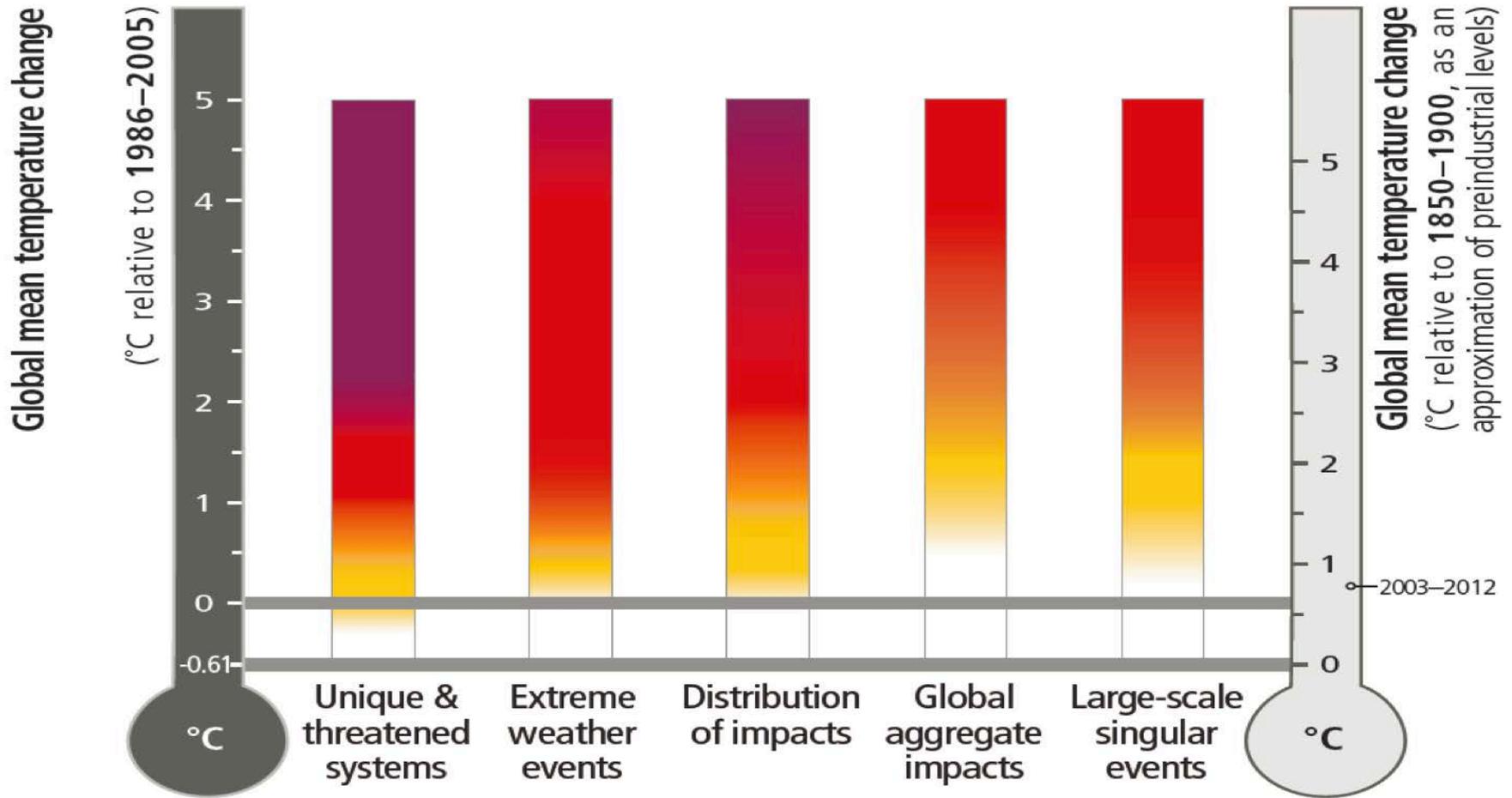
Il est *probable* que les niveaux extrêmes des mers (comme en provoquent les ondes de tempête, par exemple) ont augmenté depuis 1970, en raison essentiellement de l'élévation du niveau moyen des mers.

Pratiques d'adaptation : GIEC AR4 (figure 6.11)



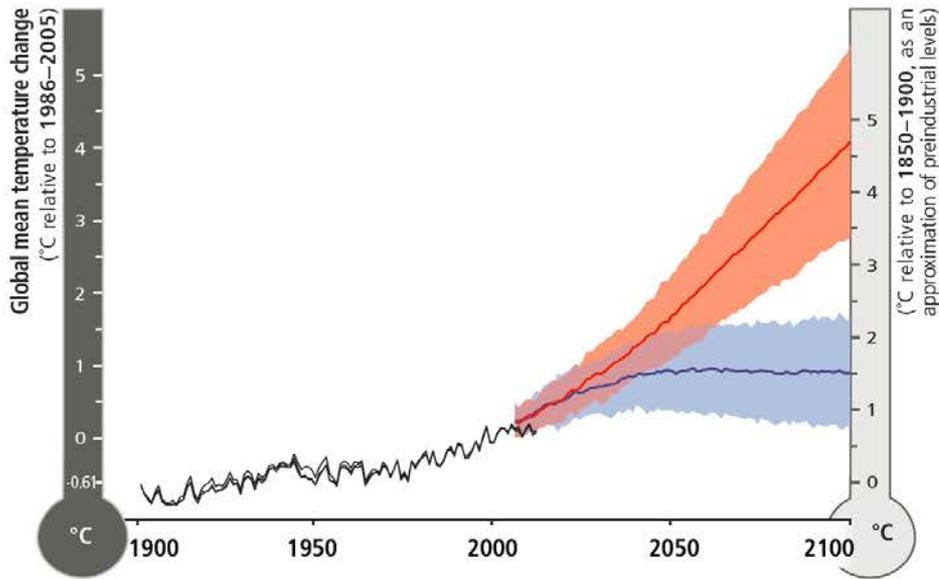
Niveaux des mers : coûts et adaptation

- Au cours du 21^e siècle : très variable en fonction des régions/pays
- Pour le 21^e siècle, les bénéfices de la protection contre les inondations côtières, la perte de territoires due à l'inondation et l'érosion, sont supérieurs aux coûts sociaux et économiques qu'engendrerait l'inaction.
- Certains pays proches du niveau de la mer et petites îles doivent s'attendre à des impacts très sévères qui, dans certains cas, peuvent engendrer des coûts de dommages et d'adaptation équivalents à plusieurs points de PIB.

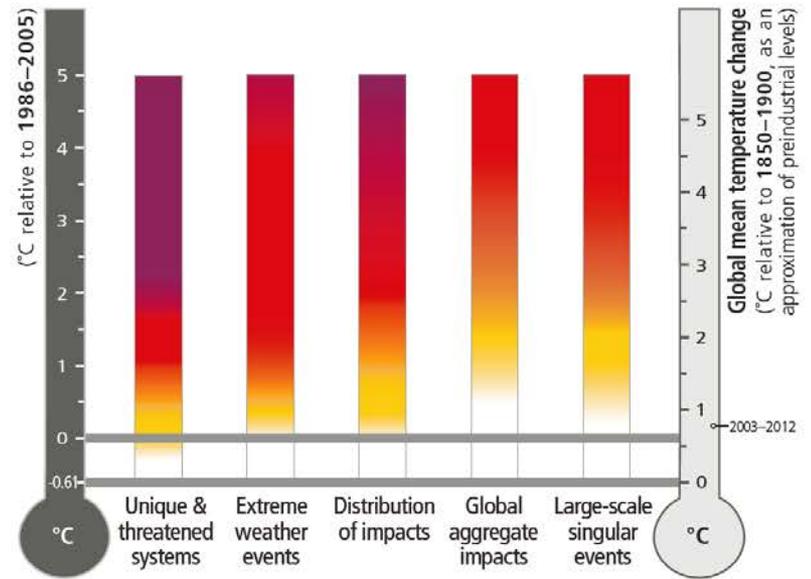


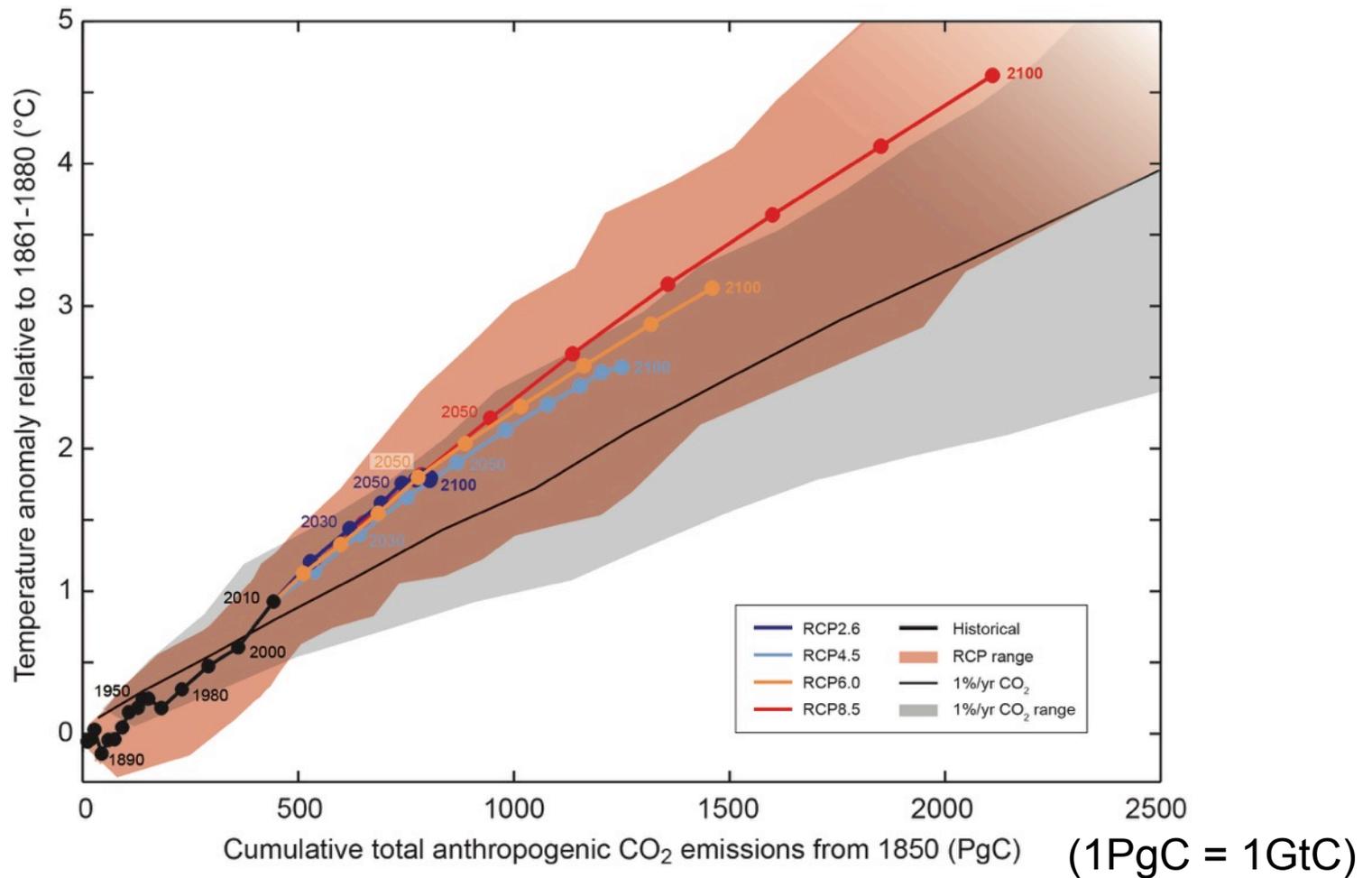
Level of additional risk due to climate change





- Observed
- RCP8.5 (a high-emission scenario)
- Overlap
- RCP2.6 (a low-emission mitigation scenario)





(IPCC 2013, Fig. SPM.10)

Le total des émissions de CO₂ cumulées détermine dans une large mesure la moyenne globale du réchauffement en surface vers la fin du XXI^{ème} siècle et au delà

Le fenêtre pour l'action se ferme rapidement

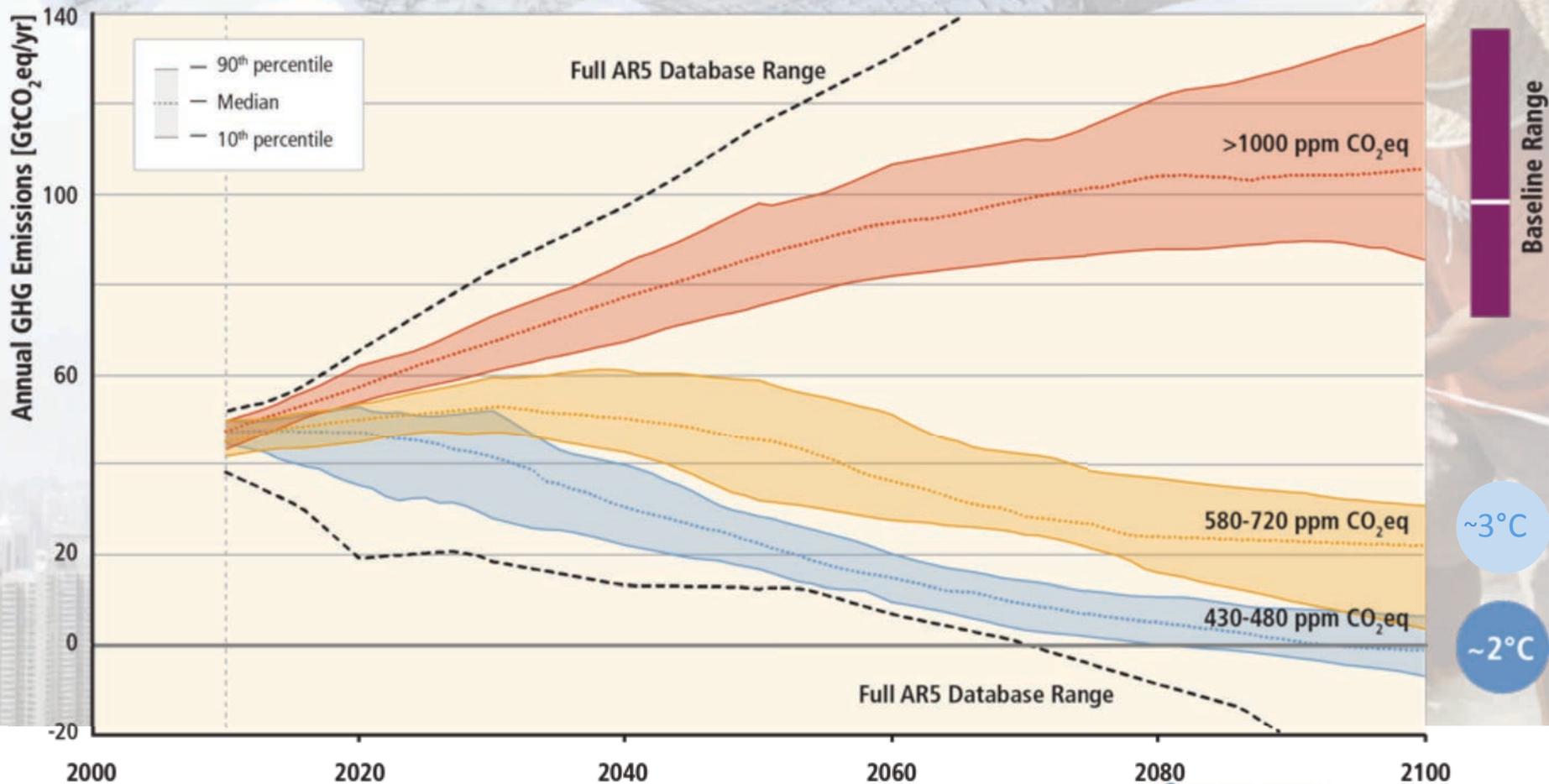
65% du budget carbone "compatible" avec un objectif de 2°C a déjà été utilisé. Il faut noter que ce budget offre une probabilité d'au moins 66% de rester sous un réchauffement de 2°C



NB: Emissions en 2011: 38 GtCO₂/an

AR5 WGI SPM

La stabilisation des concentrations atmosphériques requiert de s'écarter des scénarios de référence („baseline“) – quel que soit l'objectif de stabilisation



Based on Figure 6.7



L'élévation de température peut-elle encore être limitée à 1.5 ou 2°C (au cours du 21ème siècle) comparée au niveau pré-industriel ?

- De nombreuses études basées sur des scénarios confirment qu'il est techniquement et économiquement faisable de garder le réchauffement sous la barre des 2°C, avec une probabilité supérieure à 66%. Ceci impliquerait de limiter la concentration atmosphérique à moins de 450 ppm CO₂-eq d'ici 2100.**
- De tels scénarios impliquent de réduire de 40 to 70% les émissions globales de GES de 2010 à 2050, et d'atteindre des émissions globales nulles ou négatives avant 2100.**

L'élévation de température peut-elle encore être limitée à 1.5 ou 2°C (au cours du 21ème siècle) comparée au niveau pré-industriel ?

- Ces scénarios sont caractérisés par une amélioration rapide de l'efficacité énergétique et un quasi-quadruplement de la part des sources d'énergie bas-carbone (renouvelables, nucléaire, capture et stockage du carbone provenant de combustibles fossiles ou de bio-énergie), pour que cette part atteigne 60% en 2050.**
- Maintenir le réchauffement global sous la limite de 1.5°C demanderait de rester sous des concentrations encore plus basses, et des réductions d'émissions encore plus rapides [...]**

L'élévation de température peut-elle encore être limitée à 1.5 ou 2°C (au cours du 21ème siècle) comparée au niveau pré-industriel ?

- Il y a aussi des bénéfices qui viennent des impacts évités des changements climatiques, et des co-bénéfices dans d'autres domaines, comme une réduction des dommages (santé, écosystèmes) dus à la pollution atmosphérique, une sécurité énergétique et alimentaire améliorée, ou une amélioration de l'emploi.**

Mesures d'atténuation



Efficacité énergétique



Augmentation de la part des énergies à bas carbone ou sans carbone



Amélioration des puits de carbone

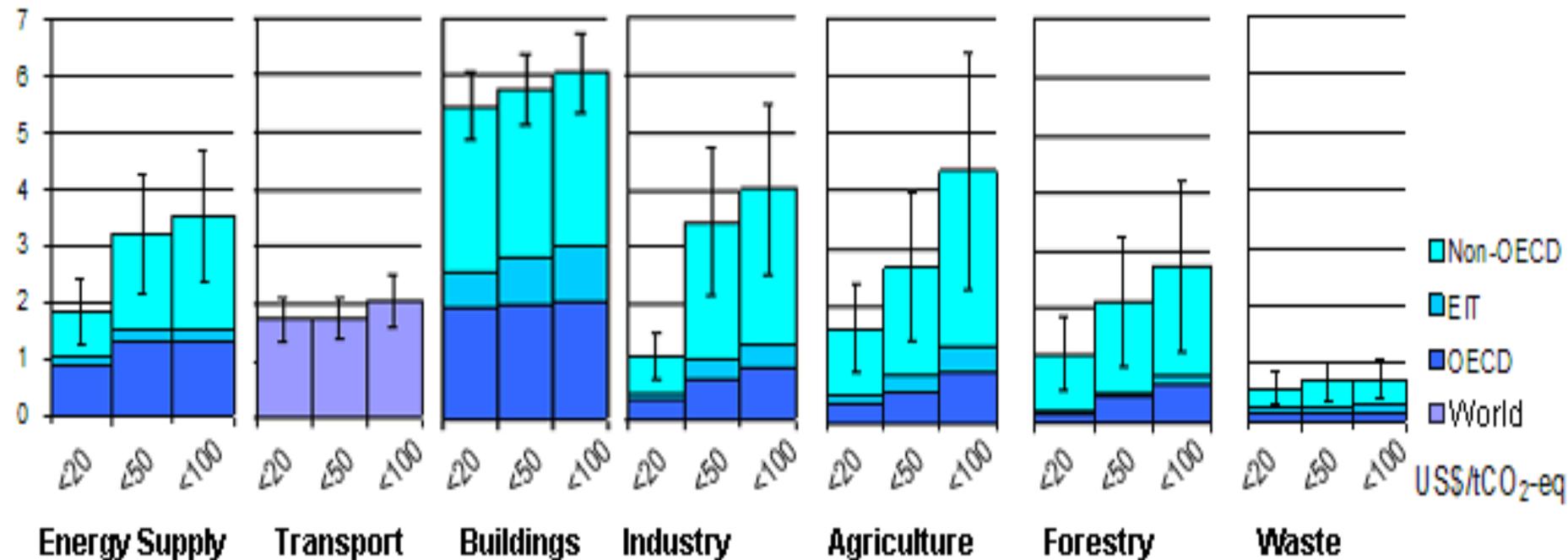


Changements de style de vie et de comportement

AR5 WGIII SPM

Tous les secteurs et toutes les régions offrent un potentiel de contribution à la réduction des émissions (horizon 2030)

GtCO₂-eq / year (émissions évitées)



IPCC AR4 (2007)

Note: estimates do not include non-technical options, such as lifestyle changes.

- **Des réductions substantielles d'émissions requièrent des changements importants des flux d'investissement; ex: de 2010 à 2029, en milliards de dollars US par an**

(chiffres moyens arrondis, IPCC AR5 WGIII Fig SPM 9)

- **efficacité énergétique: +330**
- **renouvelables: + 90**
- **centrales électr. avec CCS: + 40**
- **nucléaire: + 40**
- **centrales électr. sans CCS: - 60**
- **extraction de comb. fossiles: - 120**

RCP2.6

RCP8.5

Change in average surface temperature (1986–2005 to 2081–2100)

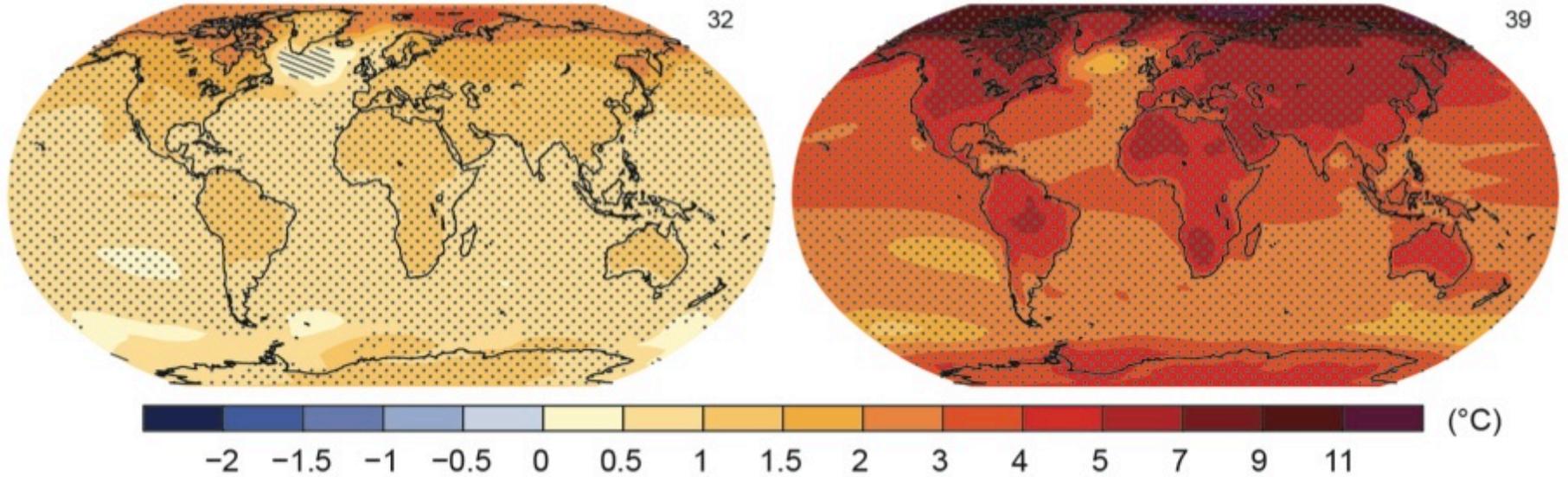


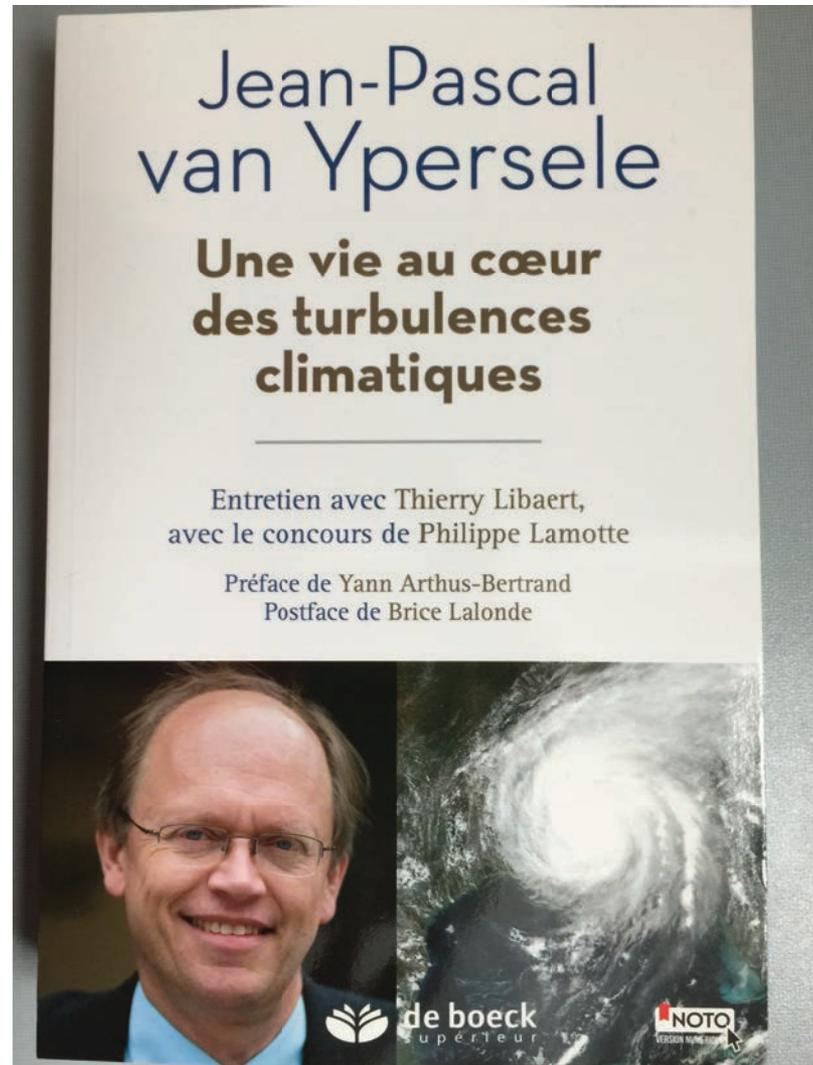
Fig. SPM.8

L'Humanité a le choix



Isaac Cordal

**Publié chez De Boeck
supérieur,
octobre 2015
Broché: 16 euros
E-book: 13 euros**



Pour en savoir plus :

- www.ipcc.ch : GIEC ou IPCC
- www.climate.be/vanyp : beaucoup de mes dias

Sur Twitter: @JPvanYpersele

— **@IPCC_CH**