

Éléments de base sur l'énergie au 21^e siècle



**Jean-Marc Jancovici - Mines Paris Tech 2010
Partie 4 - Quel climat pour demain (bis) ?**

Quels seront les impacts du changement climatique ?

Avec une amplitude **qui dépendra de nos émissions** :

Impacts sur les écosystèmes (affaiblissements, disparitions, déplacements)

Augmentation du niveau des océans

Impacts sur les courants marins et donc sur les climats régionaux

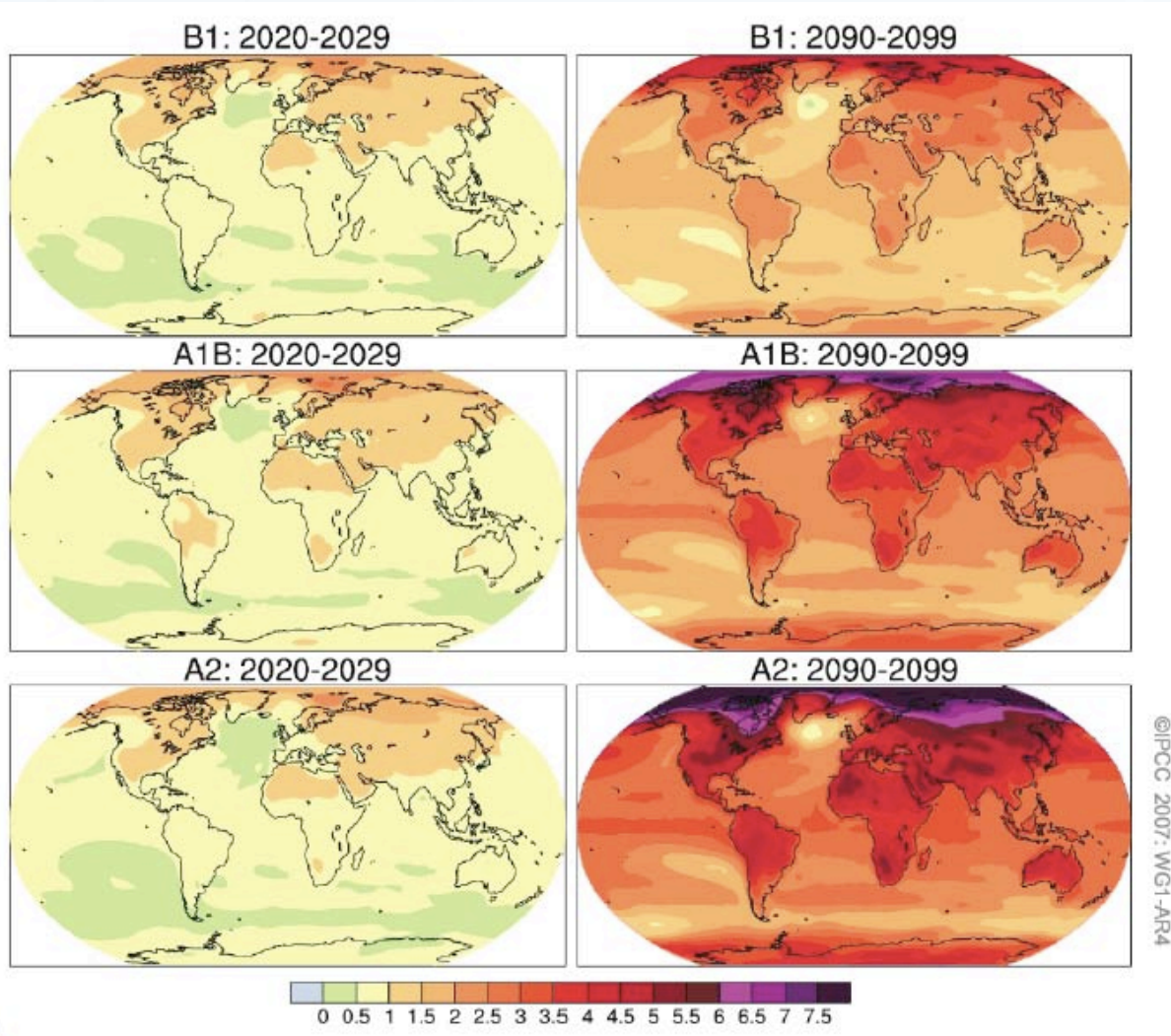
Modification des phénomènes extrêmes (dont pics de chaleur, précipitations intenses, sécheresses, etc)

Augmentation du « trou d'ozone »

Impacts directs sur la santé humaine (déplacement des zones endémiques pour les maladies, conséquences des phénomènes brusques, etc).

Et encore acidification de l'océan, risques géopolitiques, etc...

Et nous ne ferons jamais le tour de toutes les mauvaises surprises possibles à l'avance, puisque la situation est inédite



B1 \approx émissions quasi constantes

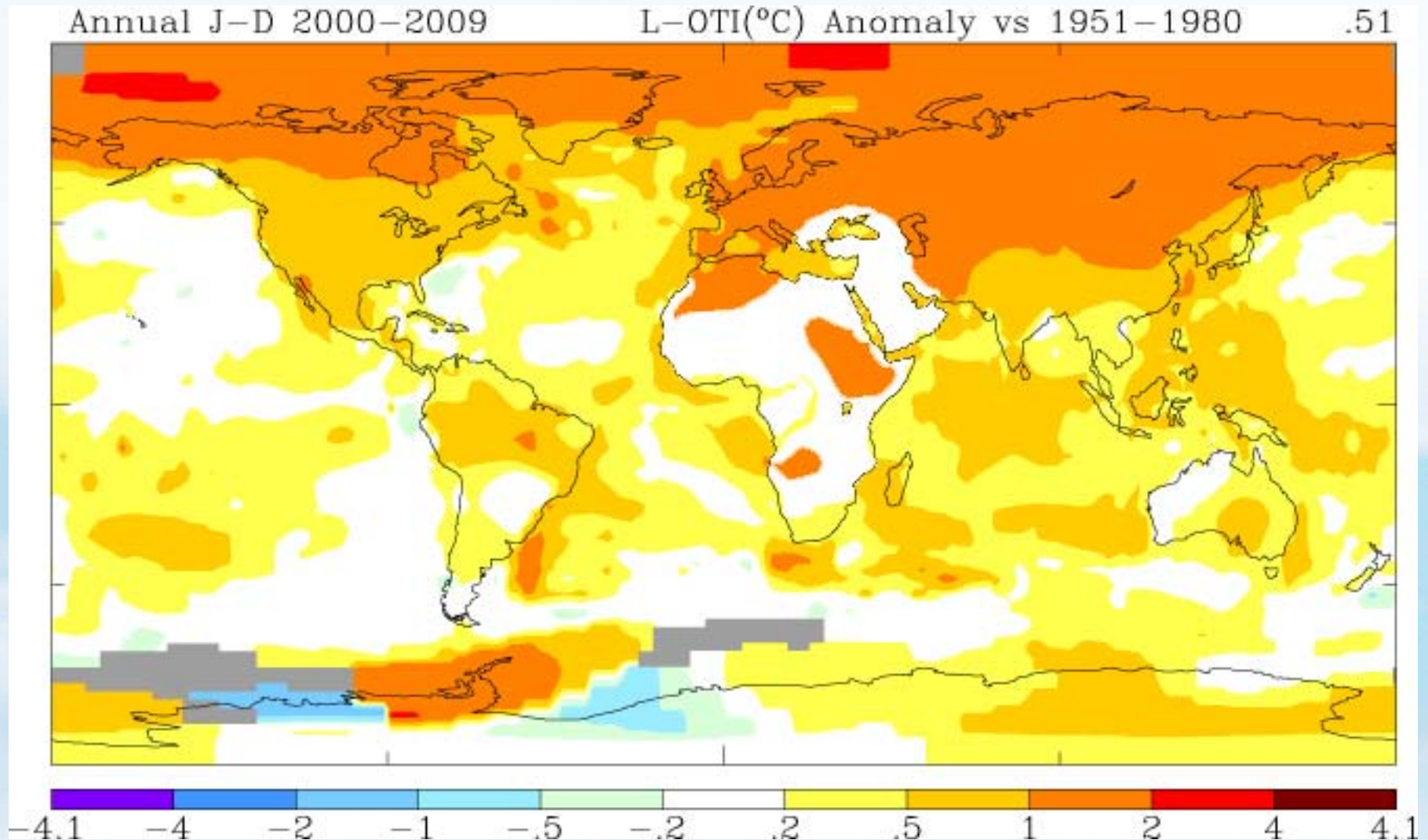
A1B \approx émissions qui doublent d'ici 2050 \approx scénario « charbon haut »

A2 \approx émissions x 4 d'ici 2100 \approx scénario charbon haut + hydrates + tout ce que l'on trouve + ... pas de guerre nucléaire avant 2100 !

Évolution régionale de la température ($^{\circ}\text{C}$) en 2100 par rapport à la moyenne 1980-1999 pour 3 scénarii. Notez que 2020 est indépendant du scénario.

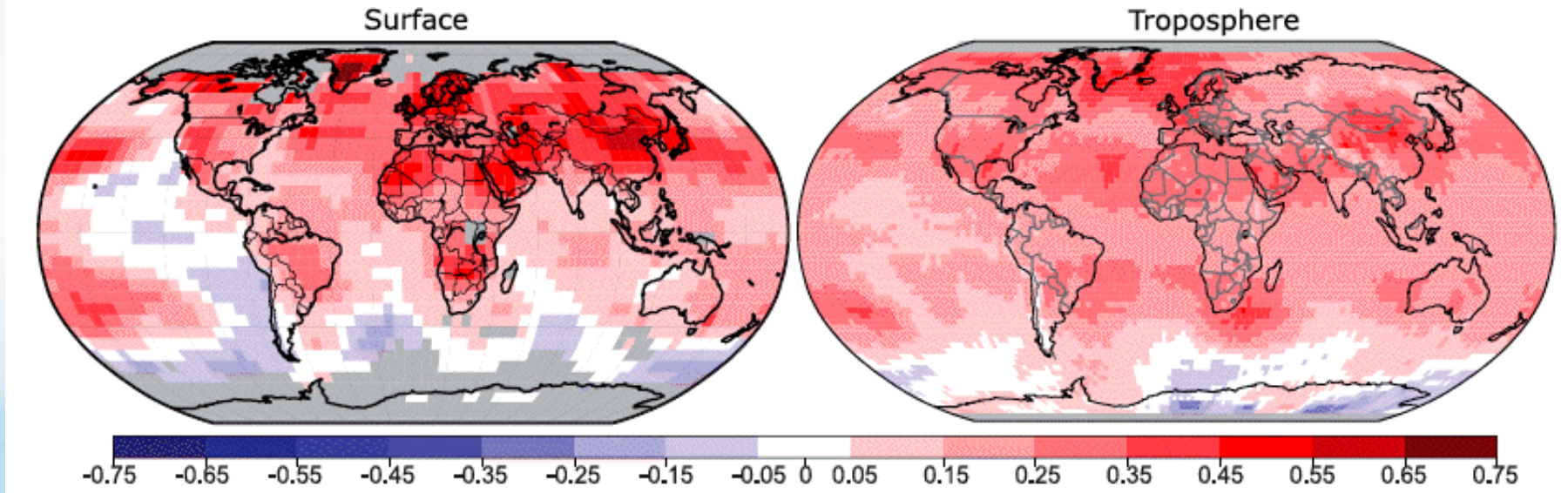
Summary for Policymakers, 4th Assessment Report, IPCC, 2007

Notre affaire a déjà commencé ?



10-year average (2000-2009) temperature anomaly relative to the 1951-1980 mean Source : GISS/NASA

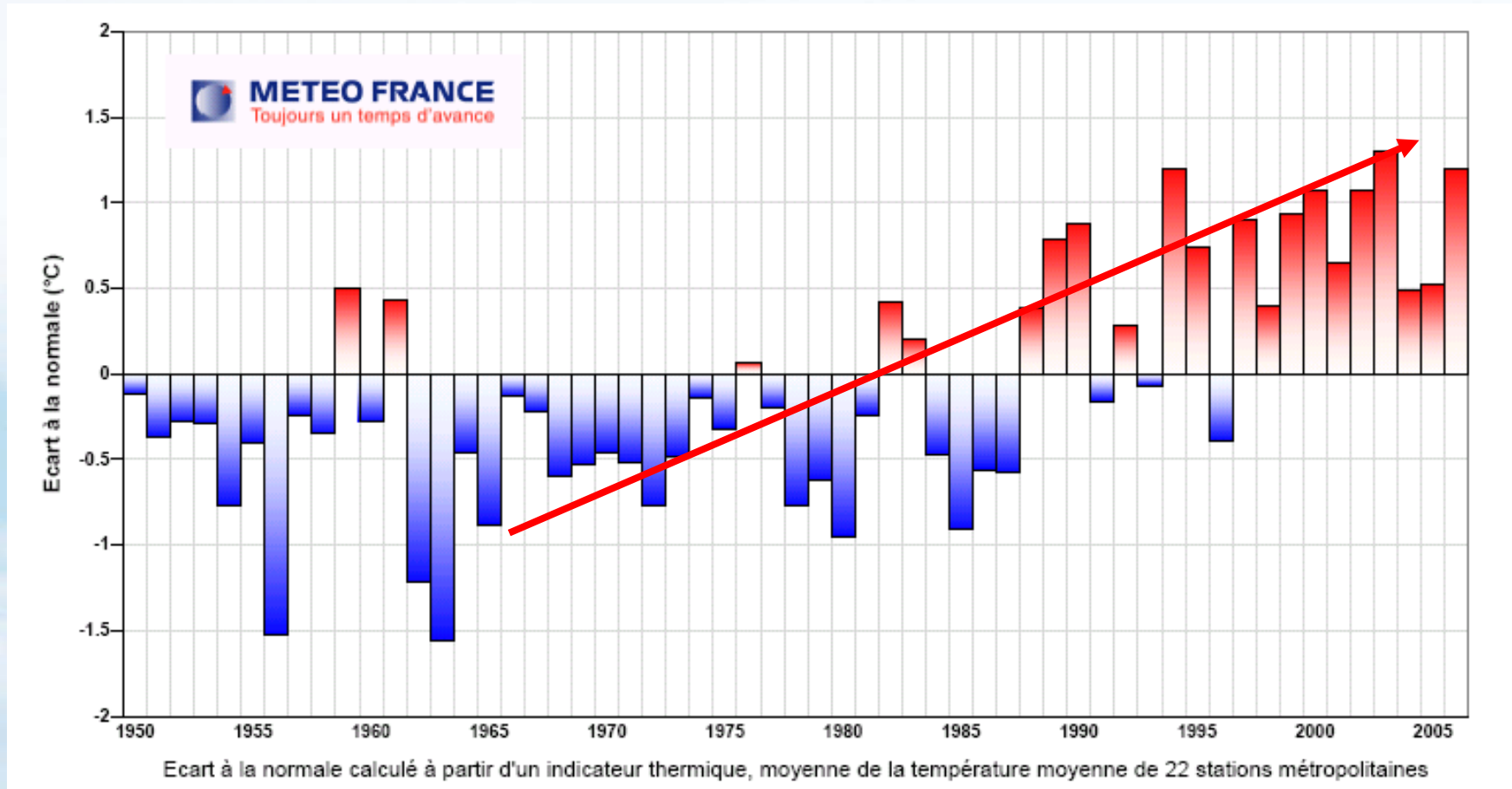
Un changement déjà décelable ?



Augmentations moyennes de température par décennie de 1979 à 2005, en fonction de la région, pour la surface terrestre (à gauche) et l'ensemble de la troposphère, c'est-à-dire en gros les 10 premiers km de l'atmosphère à partir du sol (à droite). Les zones grisées correspondent à des endroits où il n'y a pas assez de données.

Source : 4th Assessment Report, IPCC, 2007

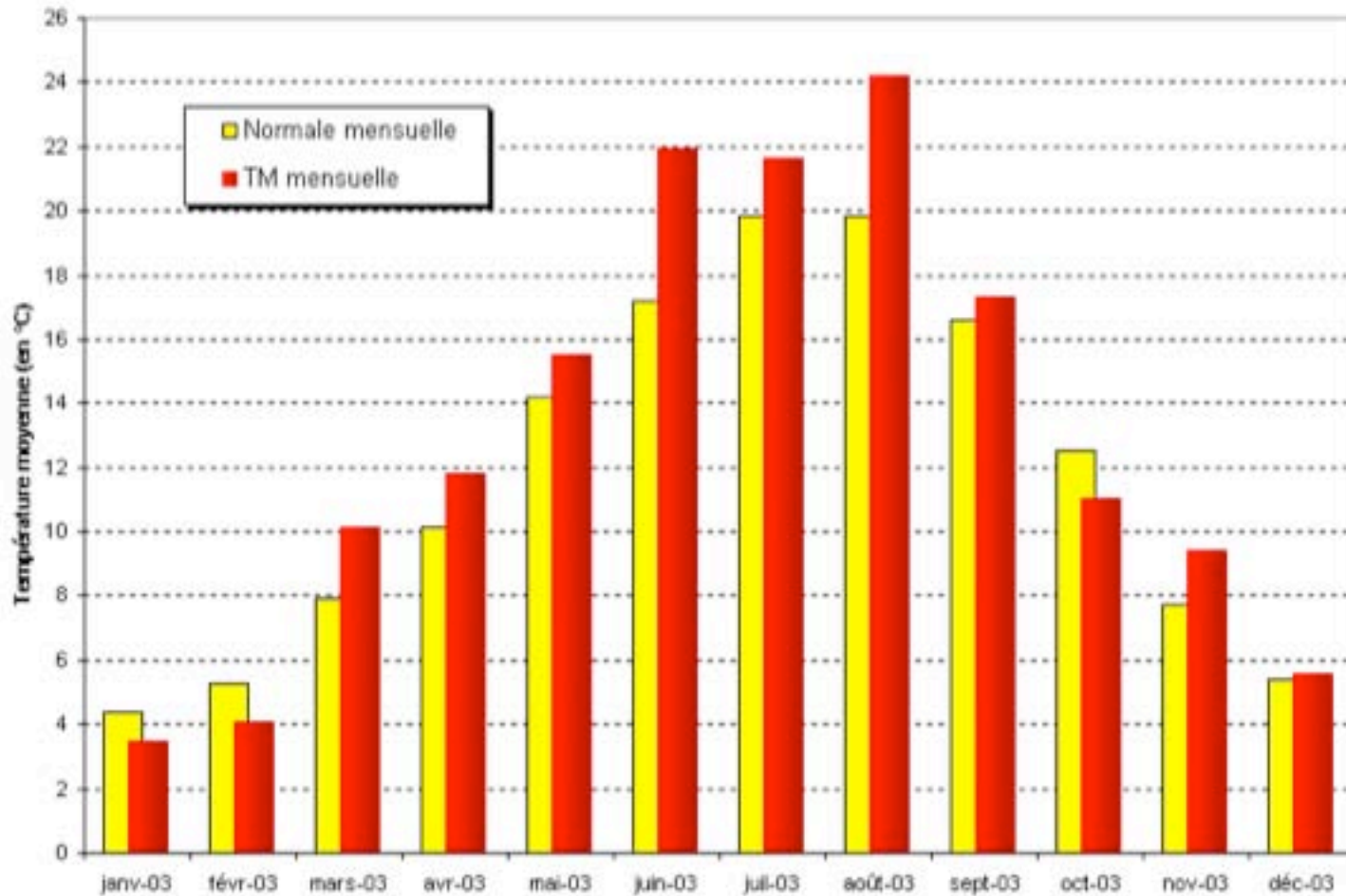
La France ne fait preuve d'aucune originalité



Evolution de la température moyenne en France depuis 50 ans. Le zéro est la moyenne 1971-2000. La tendance est claire, et l'année 2003 est « seulement » 1,3 °C au-dessus de la moyenne. Source Météo France

Un dépassement de moyenne peut en masquer un autre

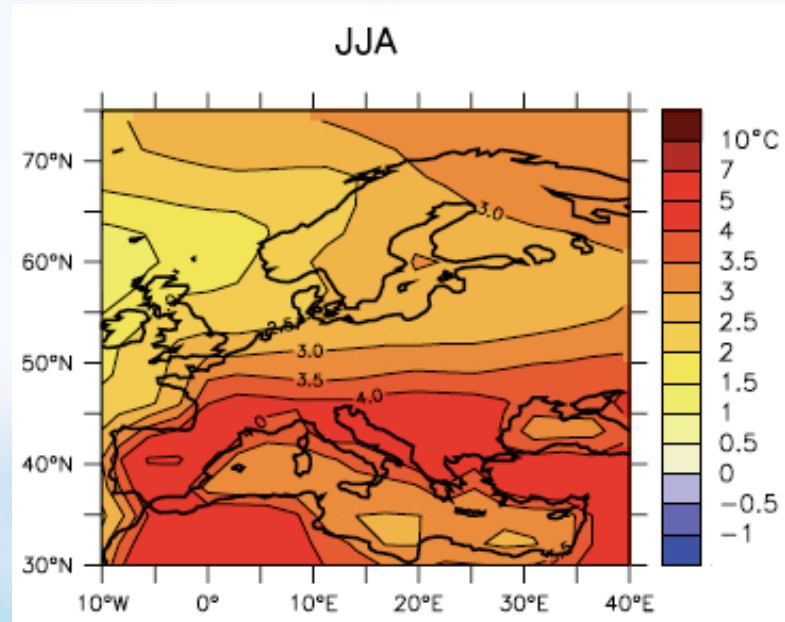
Température moyenne de l'année 2003
(calculée à partir des stations représentatives des 22 régions économiques)



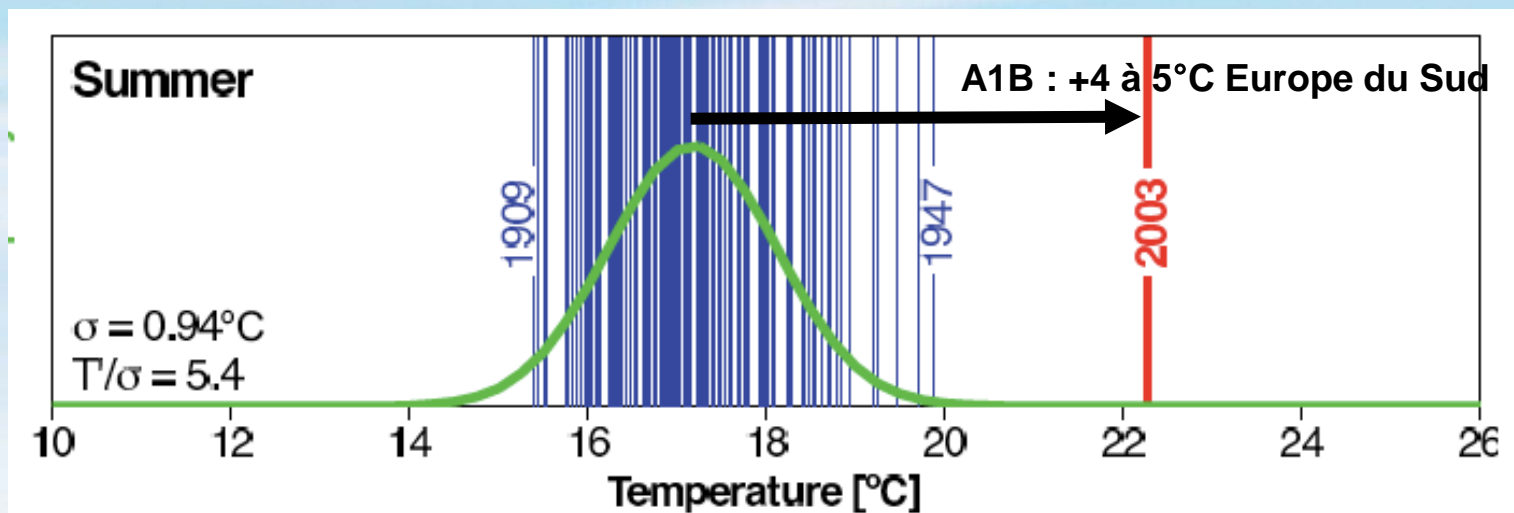
L'écart à la moyenne a pu atteindre 5°C en juin, soit 3 fois plus que l'écart entre la température moyenne de l'année et la moyenne annuelle « normale ».

Source Meteo France

L'été 2003 deviendra-t-il la norme ?

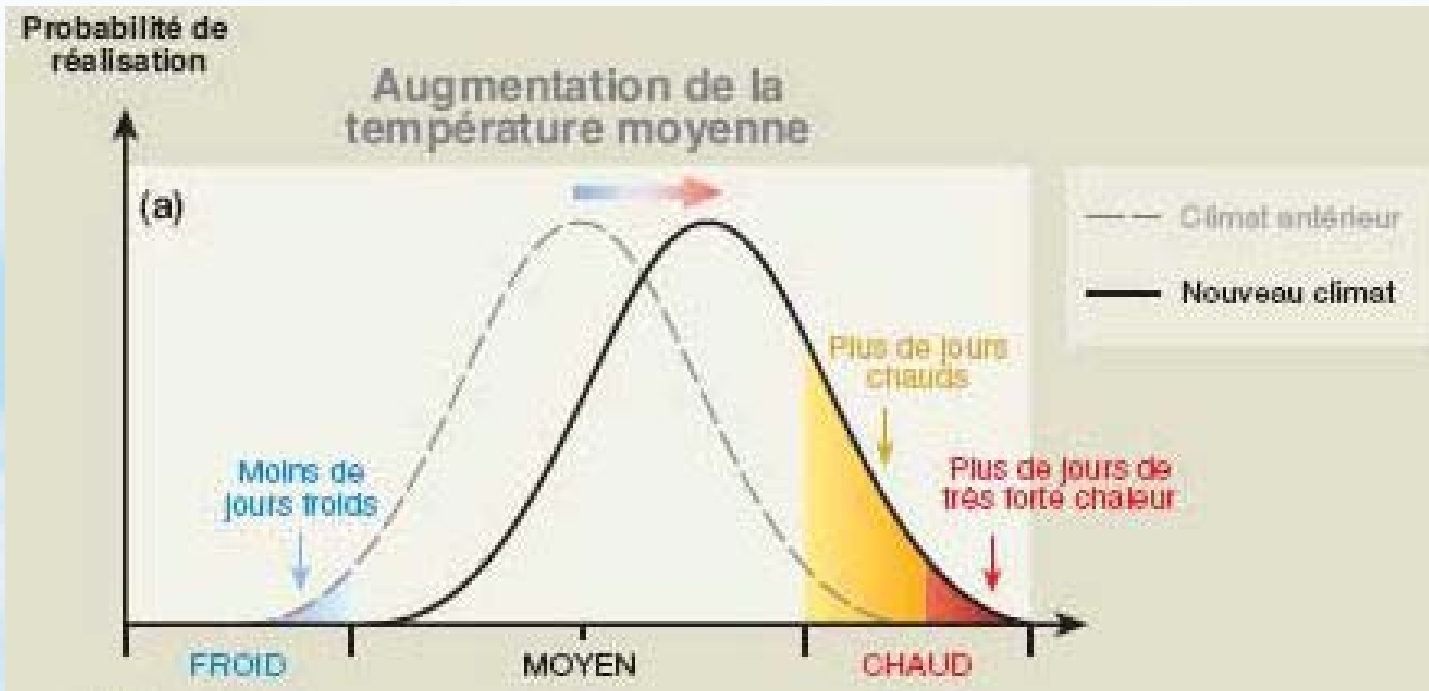


<- A1B (émissions x2 d'ici 2050 puis déclin) : +3°C monde



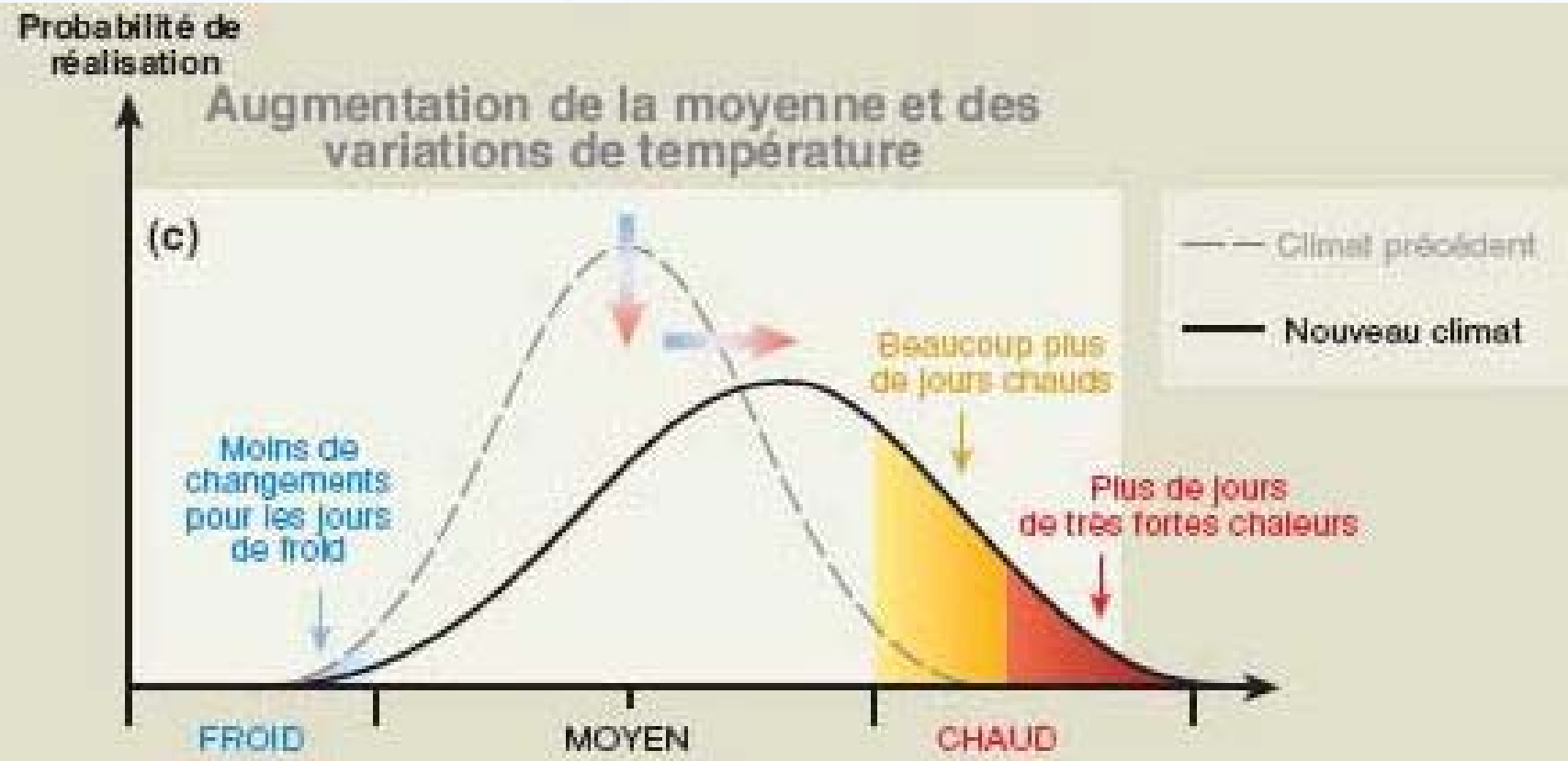
Distribution des températures moyennes des étés en Suisse entre 1864 et 2003.
Source GIEC, 4^e rapport d'évaluation, 2007

Un simple déplacement de moyenne sera déjà un problème



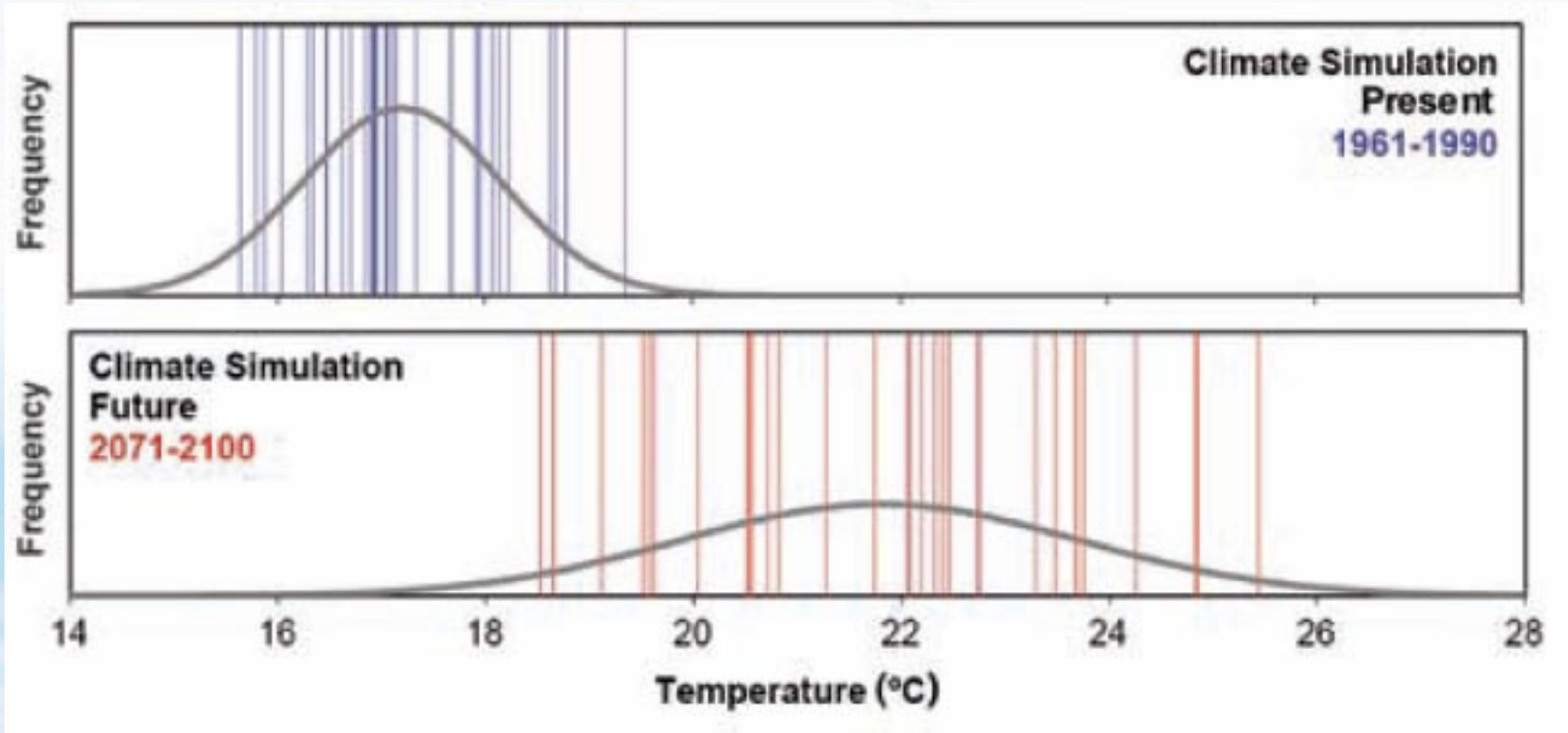
Elevation probable des épisodes de canicule. Source : Climate Change 2001, the scientific Basis, GIEC

Et en plus la variabilité peut s'en mêler !



Forte élévation possible des épisodes de canicule. Source : Climate Change Source GIEC, 4è rapport d'évaluation, 2007

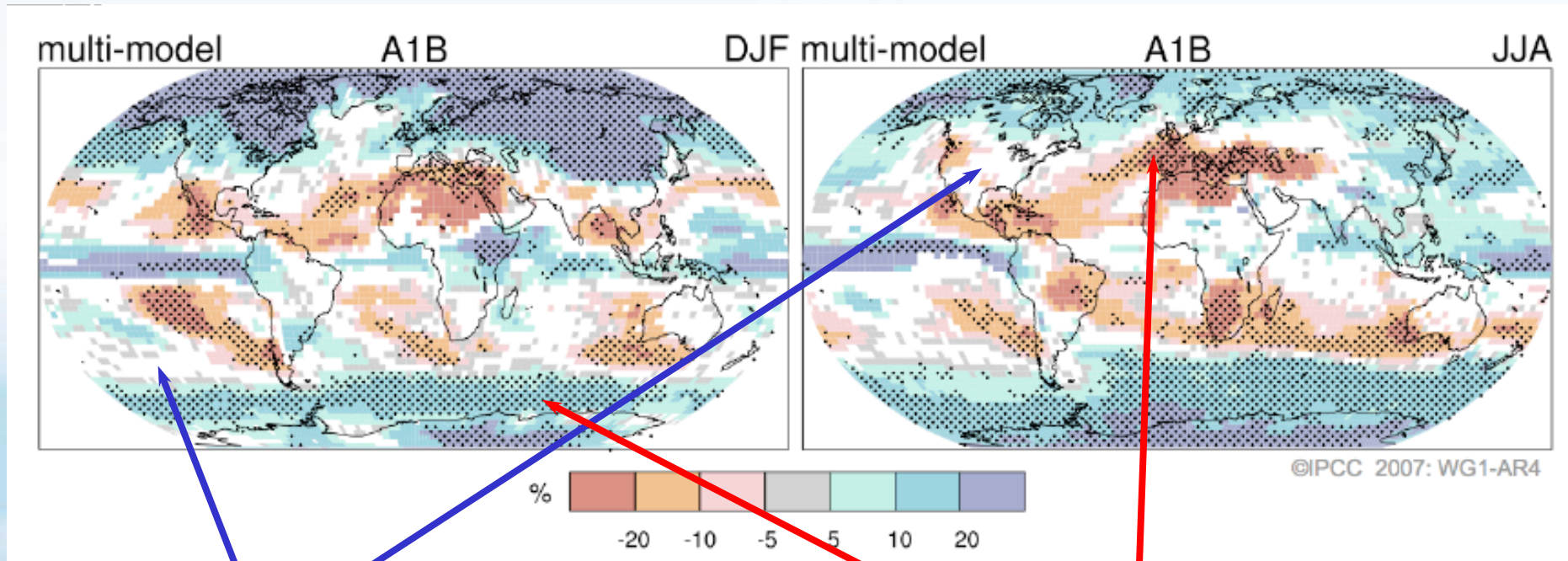
Et de fait la variabilité devrait s'en mêler...



Modification de la distribution des températures en Suisse avec un scénario intensif (A2) en 2100. On note une très forte augmentation de la variabilité : les épisodes de canicules sont encore plus intenses qu'avec un simple déplacement de moyenne.

Source : 4th assessment report, 2007, GIEC

Un climat, ce n'est pas juste une température moyenne



Zone blanche = pas de consensus entre modèles

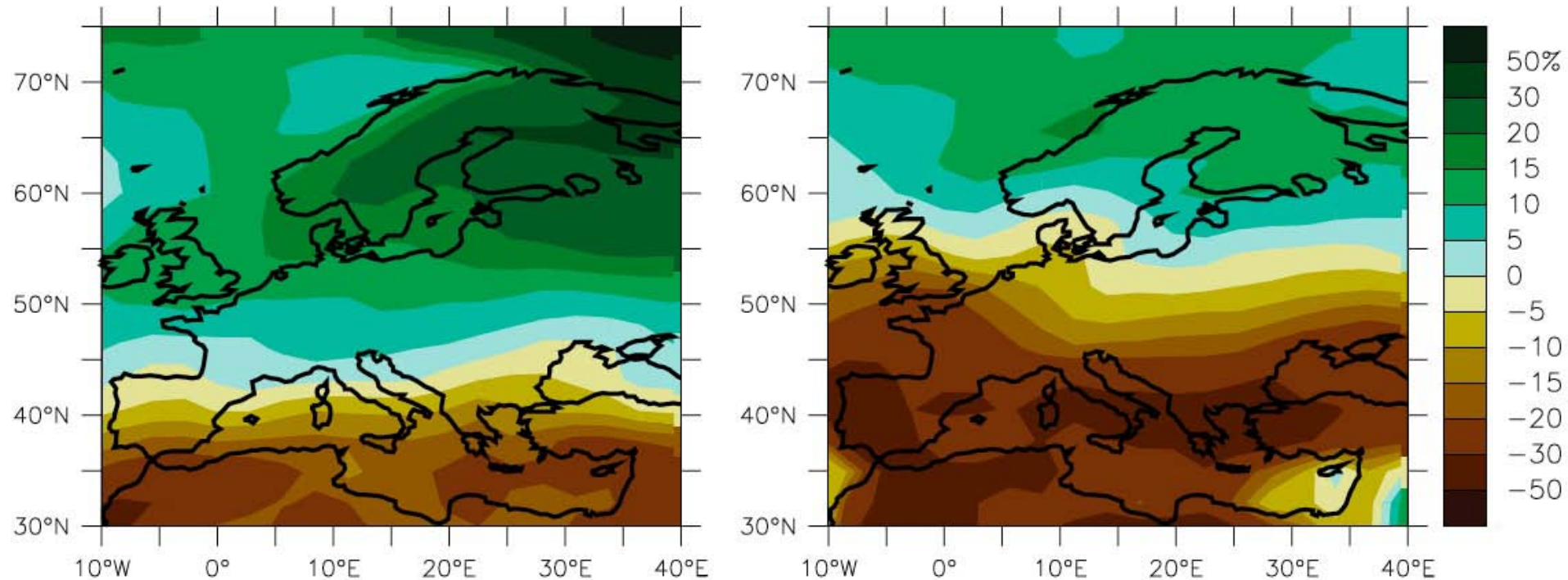
Pointillés = plus de 90% des modèles d'accord sur le sens de l'évolution

Moyenne inter-modèles de l'évolution des précipitations en 2090-2099 par rapport à la moyenne 1980-1999, pour deux saisons et un scénario « charbon haut » (pas de couplage avec le cycle du carbone). Source : GIEC, 4^e rapport d'évaluation, 2007

Un climat, c'est plus qu'une température moyenne (bis)

Dec-Jan-Feb

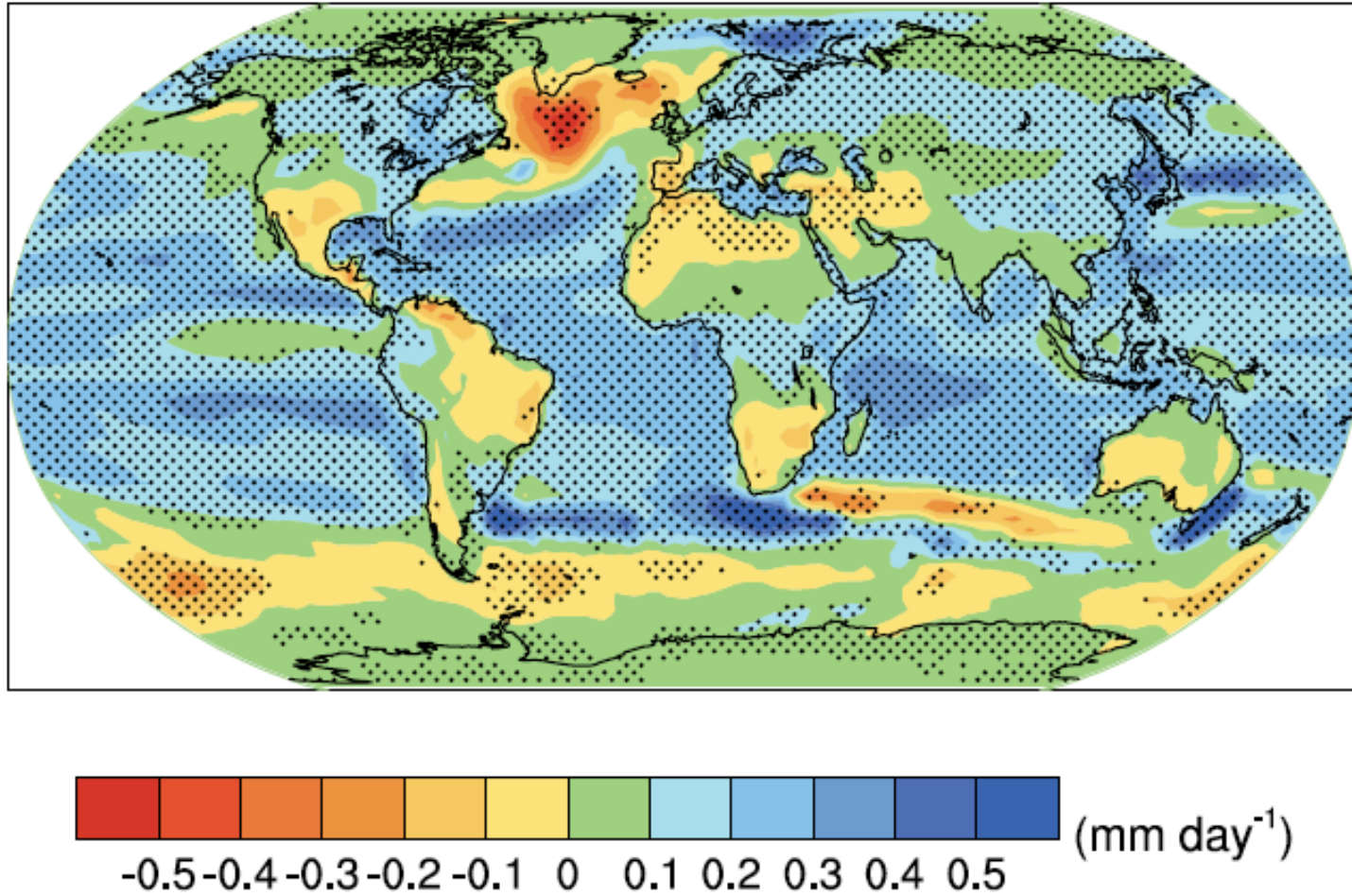
Jun-Jul-Aug



Moyenne inter-modèles de l'évolution des précipitations en Europe en 2090-2099 par rapport à la moyenne 1980-1999, et un scénario « charbon haut ». A gauche, en hiver, à droite, en été.

Source : GIEC, 4^e rapport d'évaluation, 2007

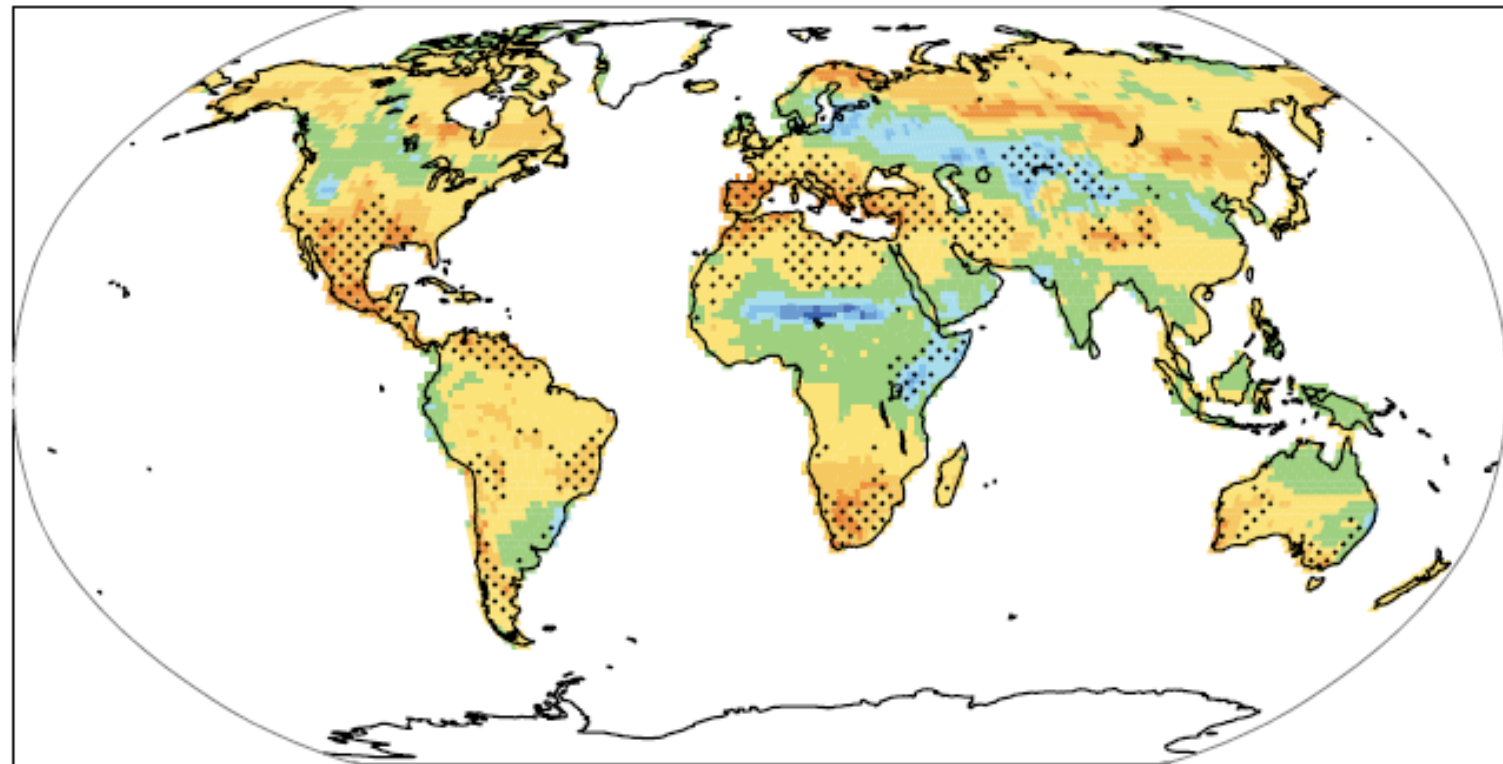
Un climat, c'est plus qu'une température moyenne (ter)



Moyenne inter-modèles de l'évolution de l'évaporation en 2090-2099 par rapport à la moyenne 1980-1999, pour deux saisons et un scénario « charbon haut » (pas de couplage avec le cycle du carbone). Attention ! La couleur bleue signifie une augmentation de l'évaporation, donc un assèchement toutes choses égales par ailleurs

Source : GIEC, 4^e rapport d'évaluation, 2007

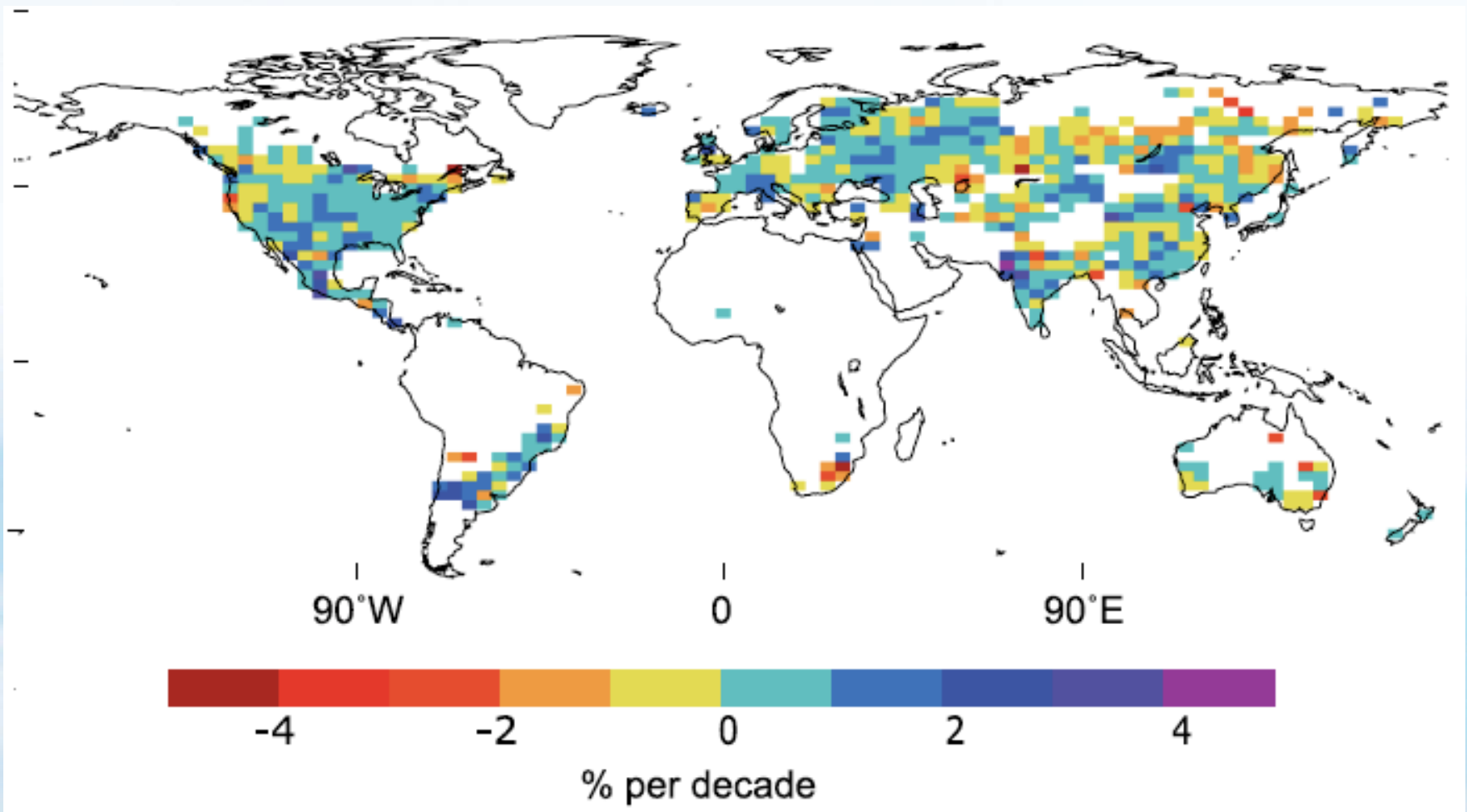
Un climat, c'est plus qu'une température moyenne (quater)



Moyenne inter-modèles de l'évolution de l'humidité des sols en 2090-2099 par rapport à la moyenne 1980-1999, pour deux saisons et un scénario « charbon haut » (AIB, pas de couplage avec le cycle du carbone).

Source : GIEC, 4^e rapport d'évaluation, 2007

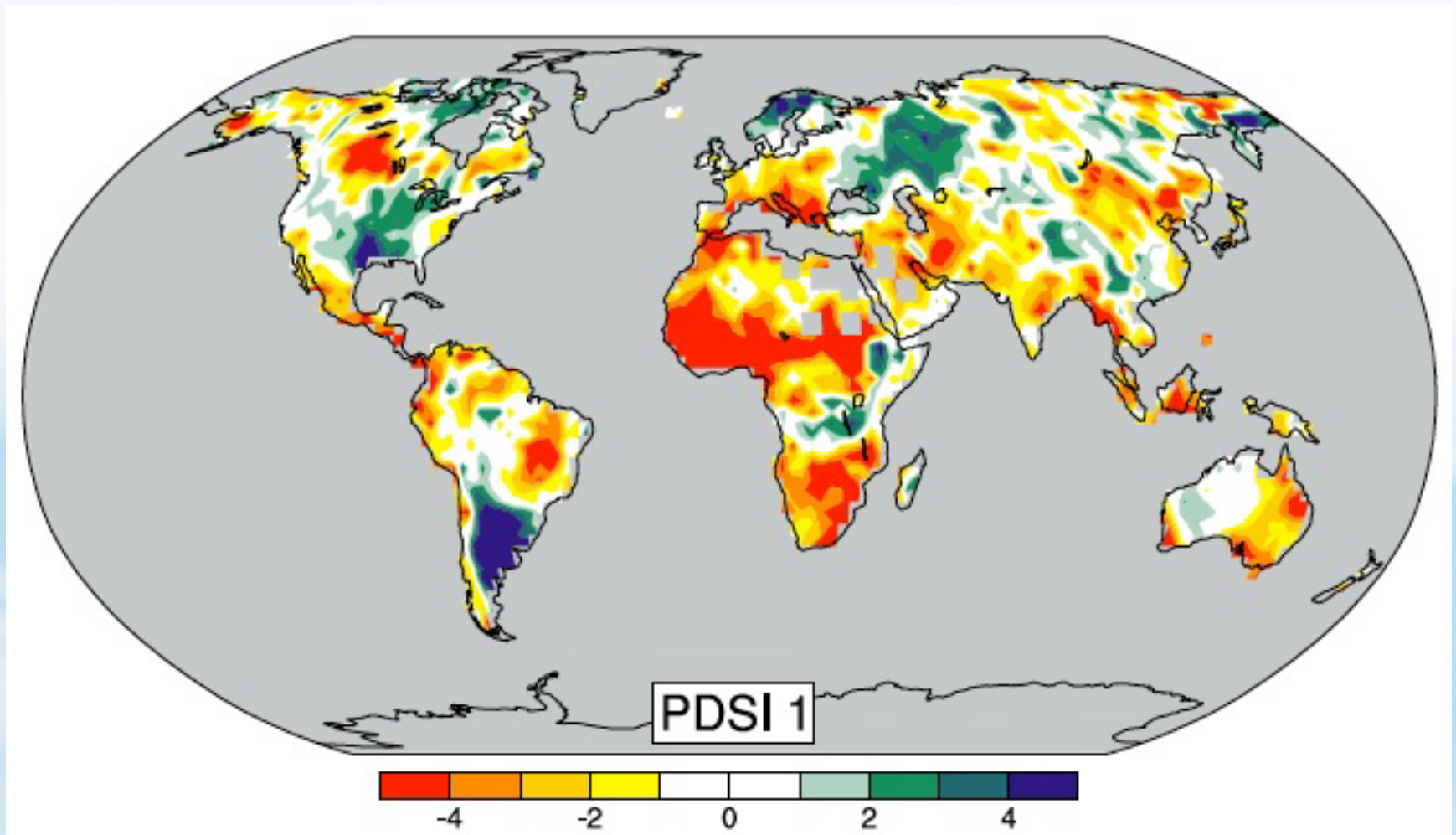
Déjà plus d'épisodes pluvieux intenses ?



Variation décennale moyenne, sur la période 1951 - 2003, des épisodes pluvieux intenses dans le monde (seules les zones colorées sont suffisamment documentées pour permettre l'établissement d'une série longue).

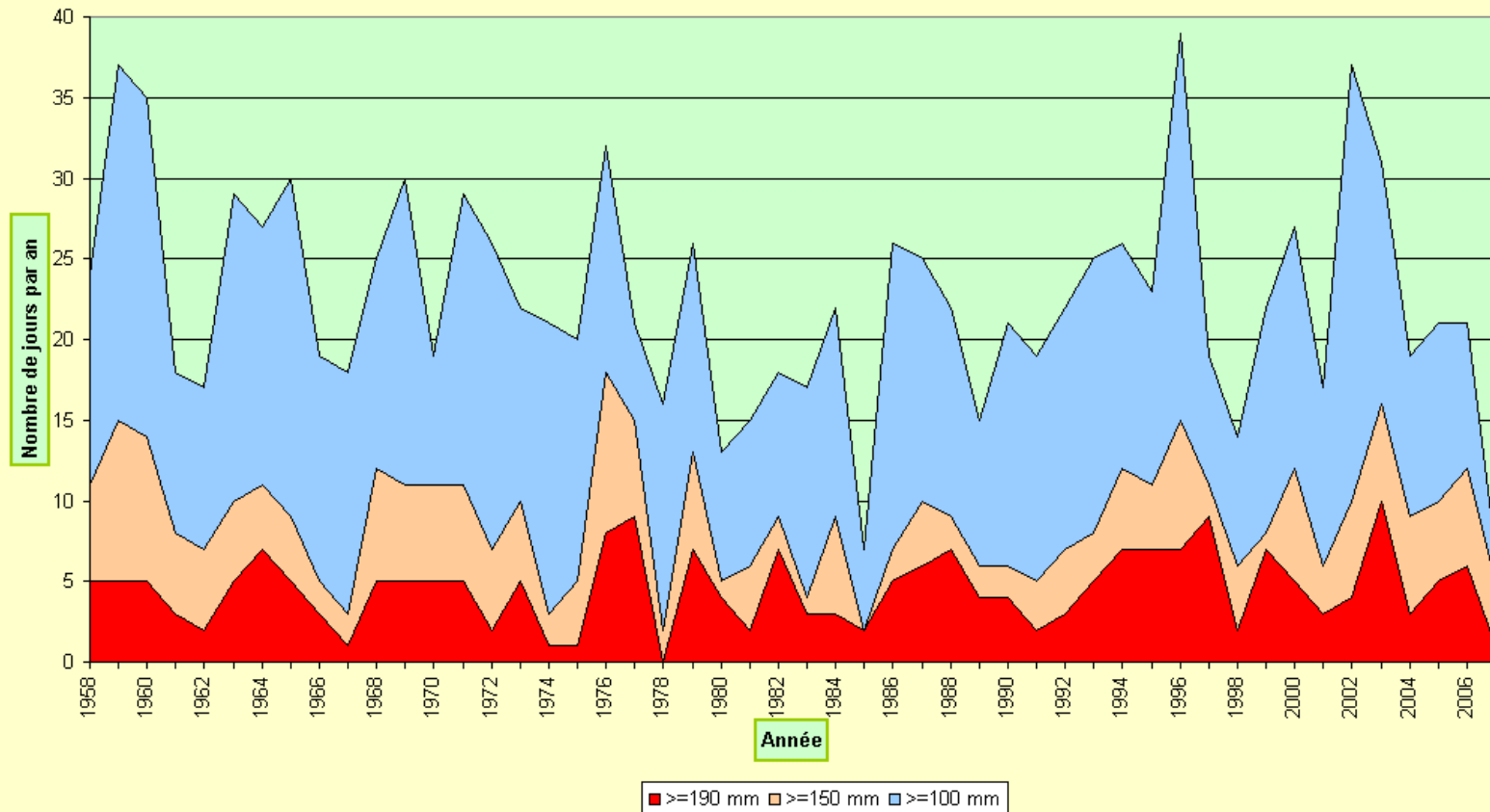
Source : GIEC, 4^e rapport d'évaluation, 2007

Déjà des sols plus secs ?



Plus « d'épisodes cévenols » en France ? : pas pour l'instant

Nombre annuel de jours avec une hauteur de pluie $\geq 100, 150$ ou 190 mm en 24 h sur les régions méditerranéennes de la France. (Période 1958-2007)

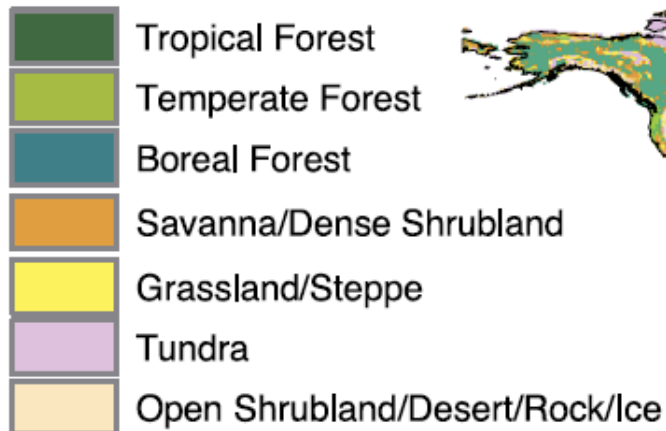


Nombre annuel d'épisodes pluvieux intenses dans le Sud-Est de la France depuis 1958.
Un tel épisode représente plus de 100 mm de pluie sur 24 heures.

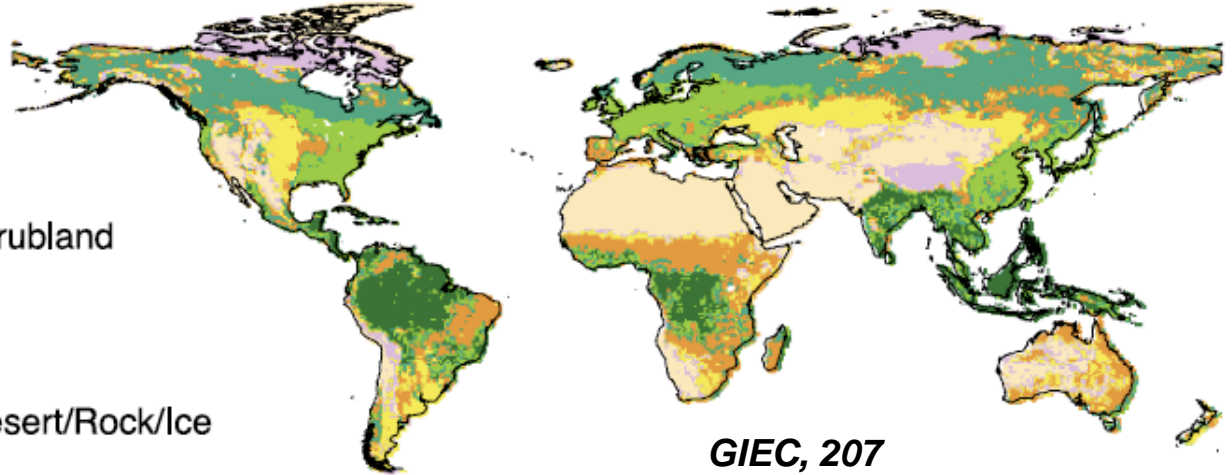
Source : Météo France

Atteintes des écosystèmes continentaux et de l'agriculture

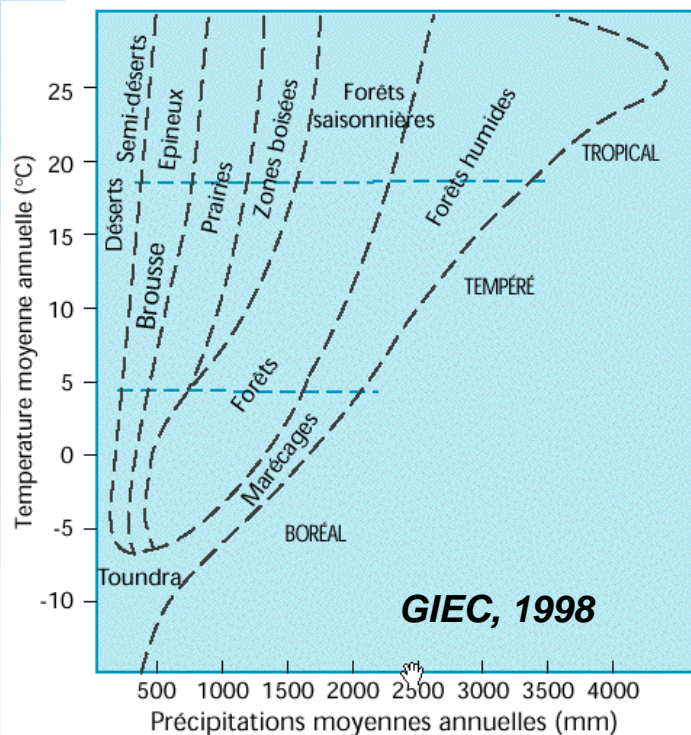
Biome Type



Potential Natural Vegetation



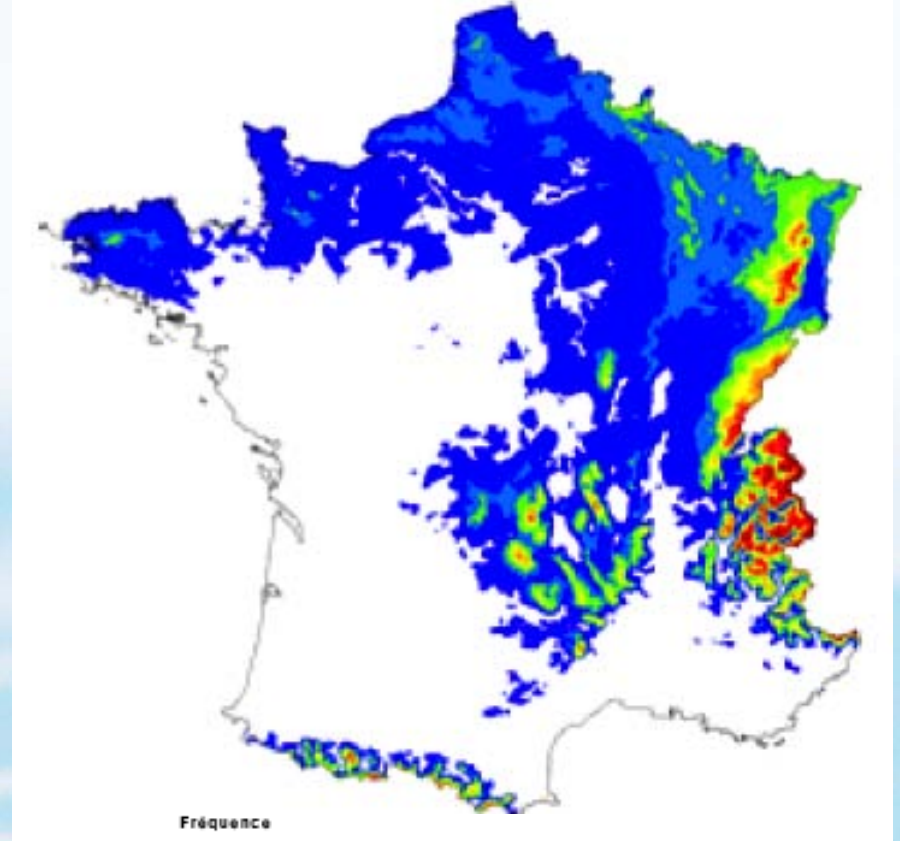
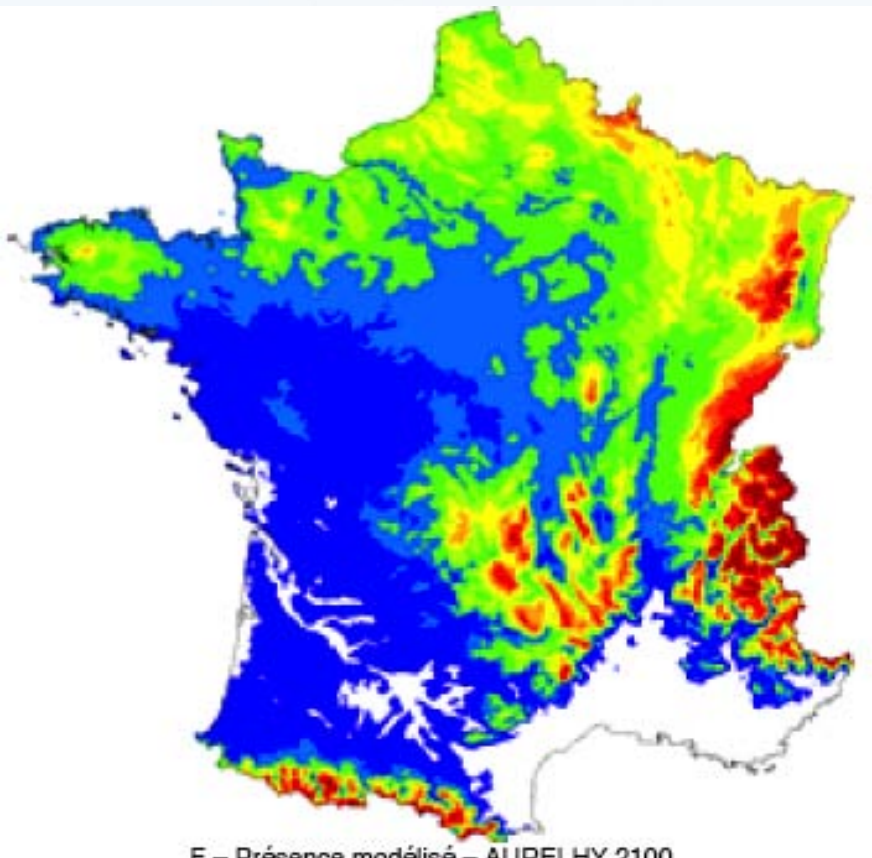
GIEC, 207



GIEC, 1998

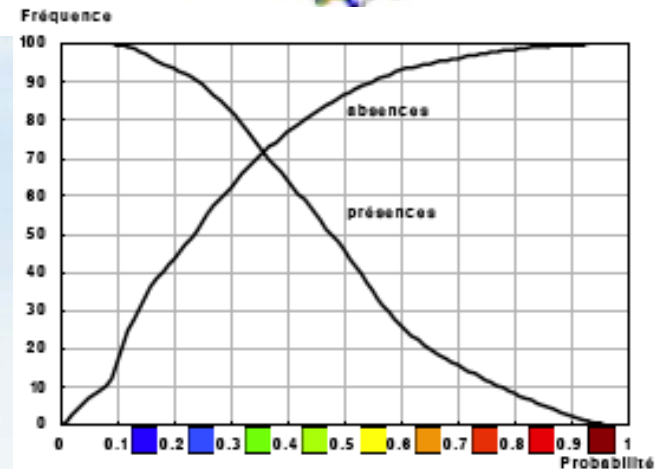
- **Diminution** des récoltes agricoles et forestières ?
- **Diminution** du nombre d'écosystèmes (désertification par endroits ?)
- **Appauvrissement** des écosystèmes survivants ?
- Invasions d'espèces exotiques ?

Exemple : le hêtre en France

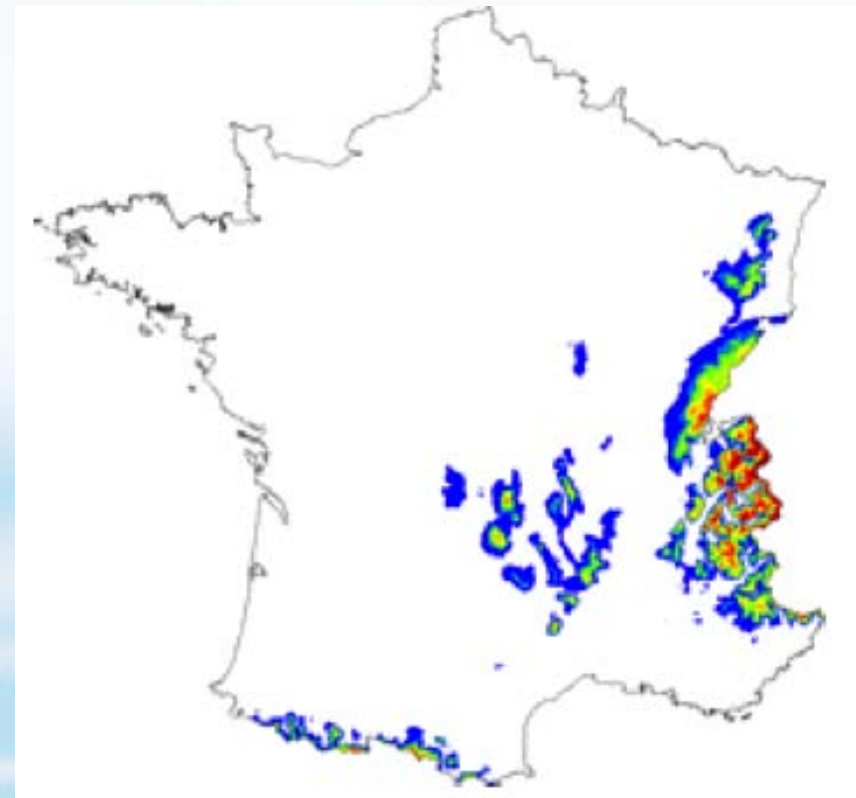
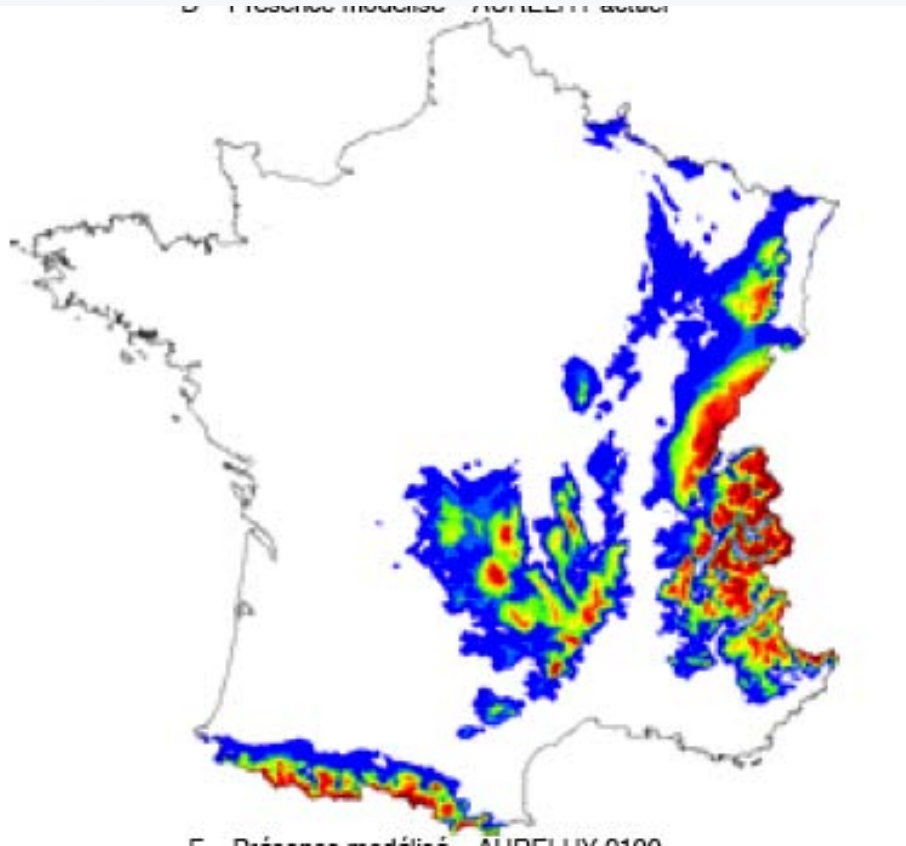


Aire de répartition du hêtre aujourd'hui (à gauche) et potentiel en 2100 (à droite) avec un scénario « peu émissif » (B2).

Source : Badeau et al., CARBOFOR, INRA Nancy, 2004

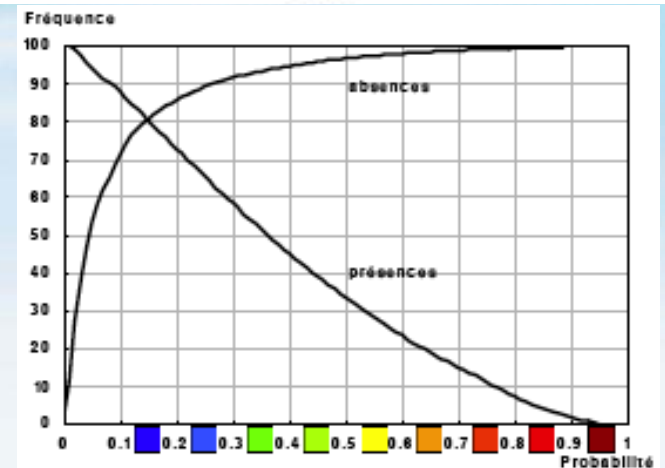


Exemple (2): le sapin en France

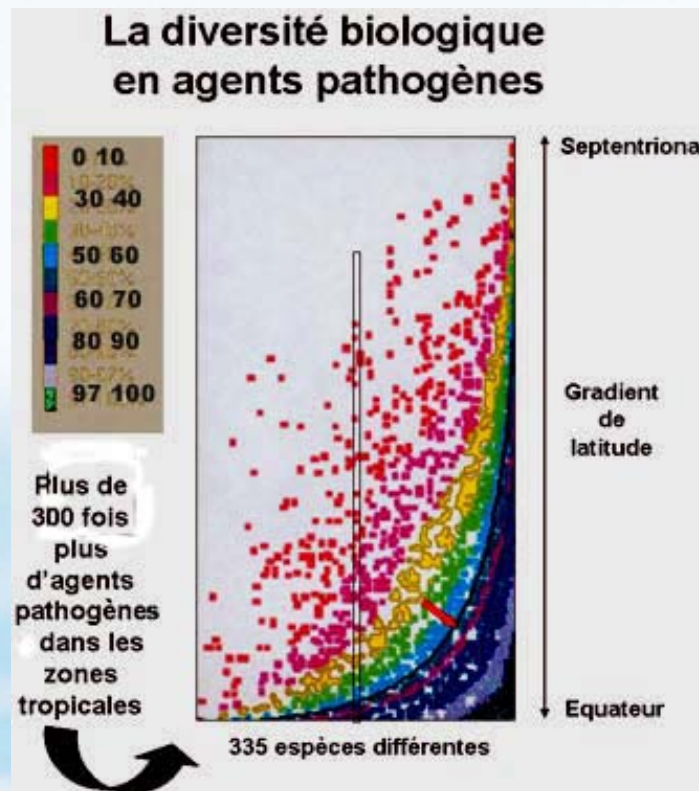


Aire de répartition du sapin aujourd'hui (à gauche) et potentiel en 2100 (à droite) avec un scénario « peu émissif » (B2).

Source : Badeau et al., CARBOFOR, INRA Nancy, 2004



Impacts sur la santé : fichue biodiversité !

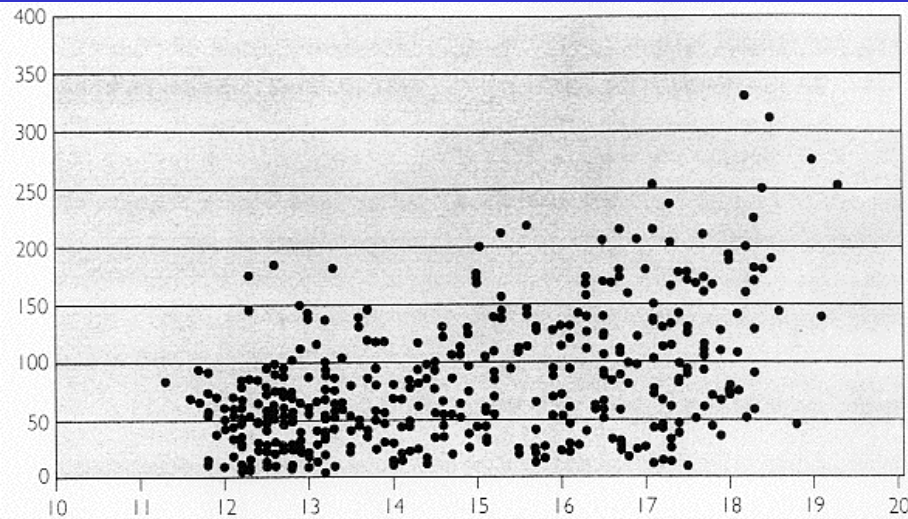


Source Weber, 2006

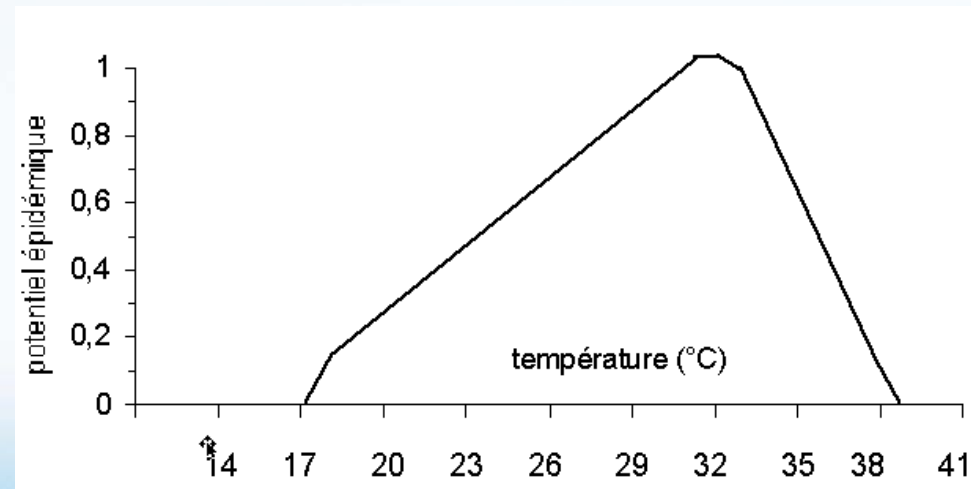
La chaleur est généralement favorable aux micro-organismes, ce qui s'applique aussi à ceux qui sont pathogènes. Les risques évoqués concernent :

- L'augmentation des zones concernées par les maladies à vecteurs (paludisme, fièvre jaune, dengue, fièvre de la vallée du Rift...) aussi bien dans la population que pour les animaux sauvages ou domestiques (Lucilie bouchère, maladie de la langue bleue, etc),
- la remontée vers le Nord de pathologies des plantes et animaux (et des termites...)
- Augmentation de la virulence des micro-organismes pathogènes en général ?

Impacts sur la santé : exemples



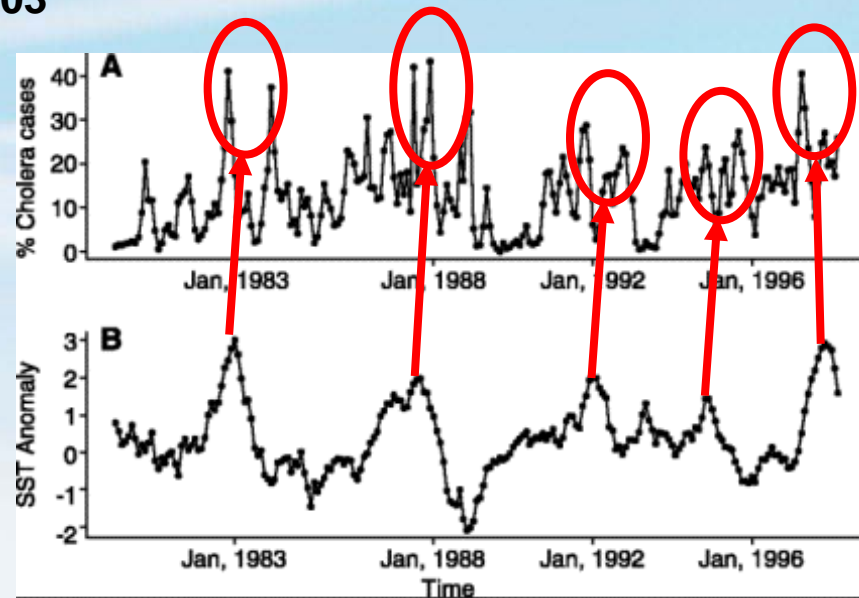
Nombre de cas mensuels de salmonellose en Nouvelle Zélande en fonction de la température moyenne. Source OMS, 2003



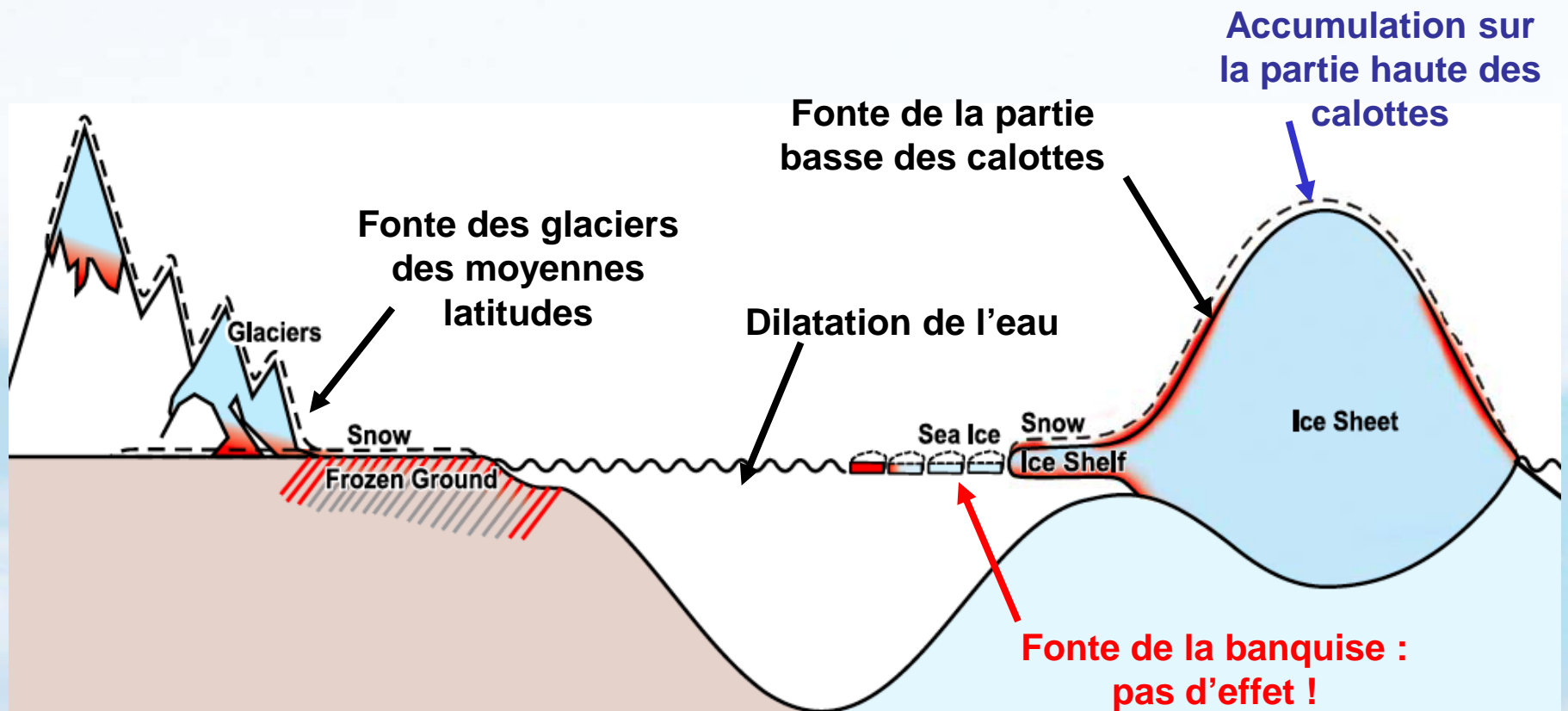
Potentiel épidémique du paludisme en fonction de la température. J.-P. Besançon, La jaune et La Rouge, 2000

Corrélation entre les cas de choléra et la température de surface de l'océan pacifique est.

Source : Colwell, Science, 1996 et Pascual et col., Science, 2000.

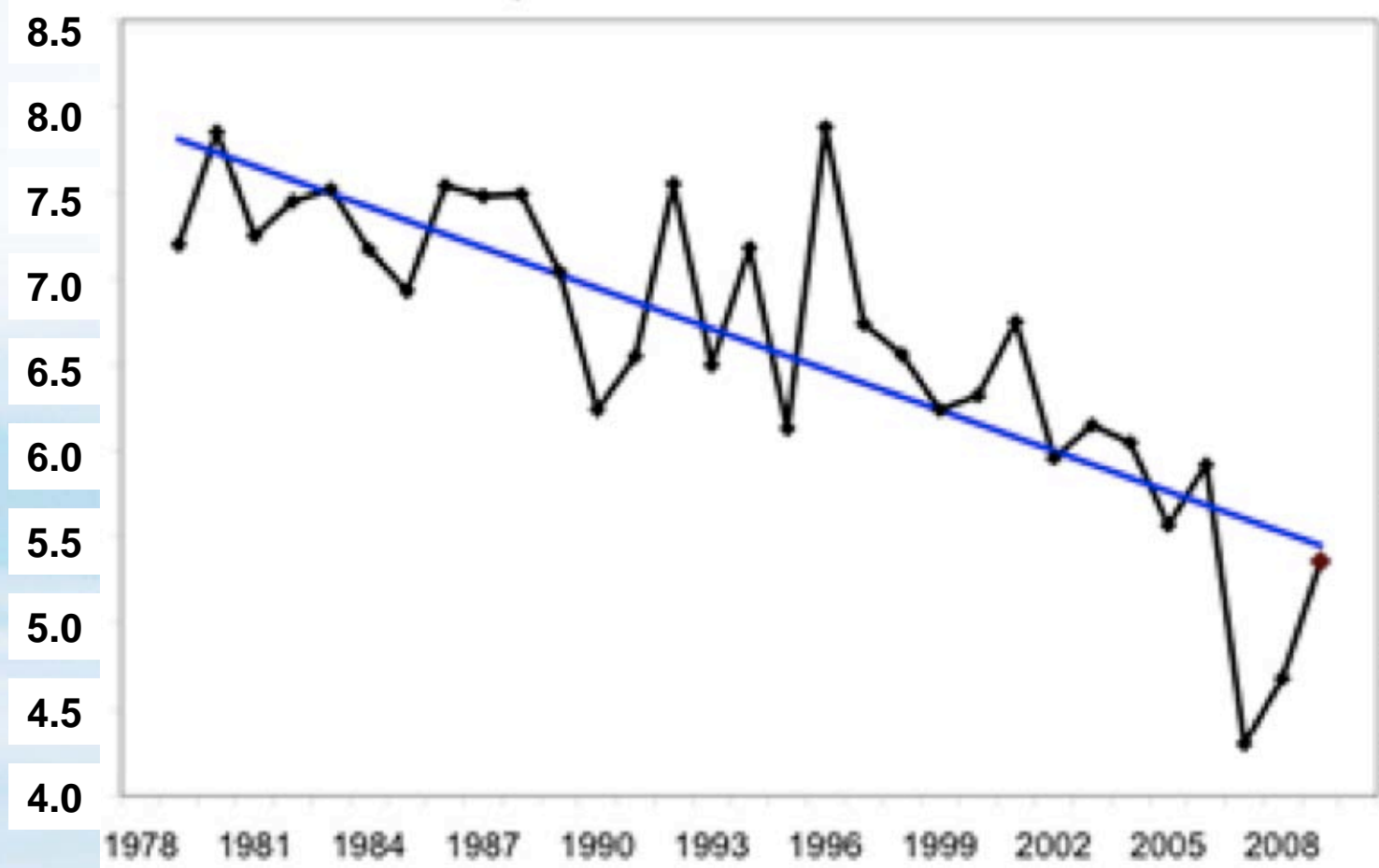


Élévation du niveau des océans : Archimède or not ?



Facteurs contributeurs à la hausse du niveau de la mer.

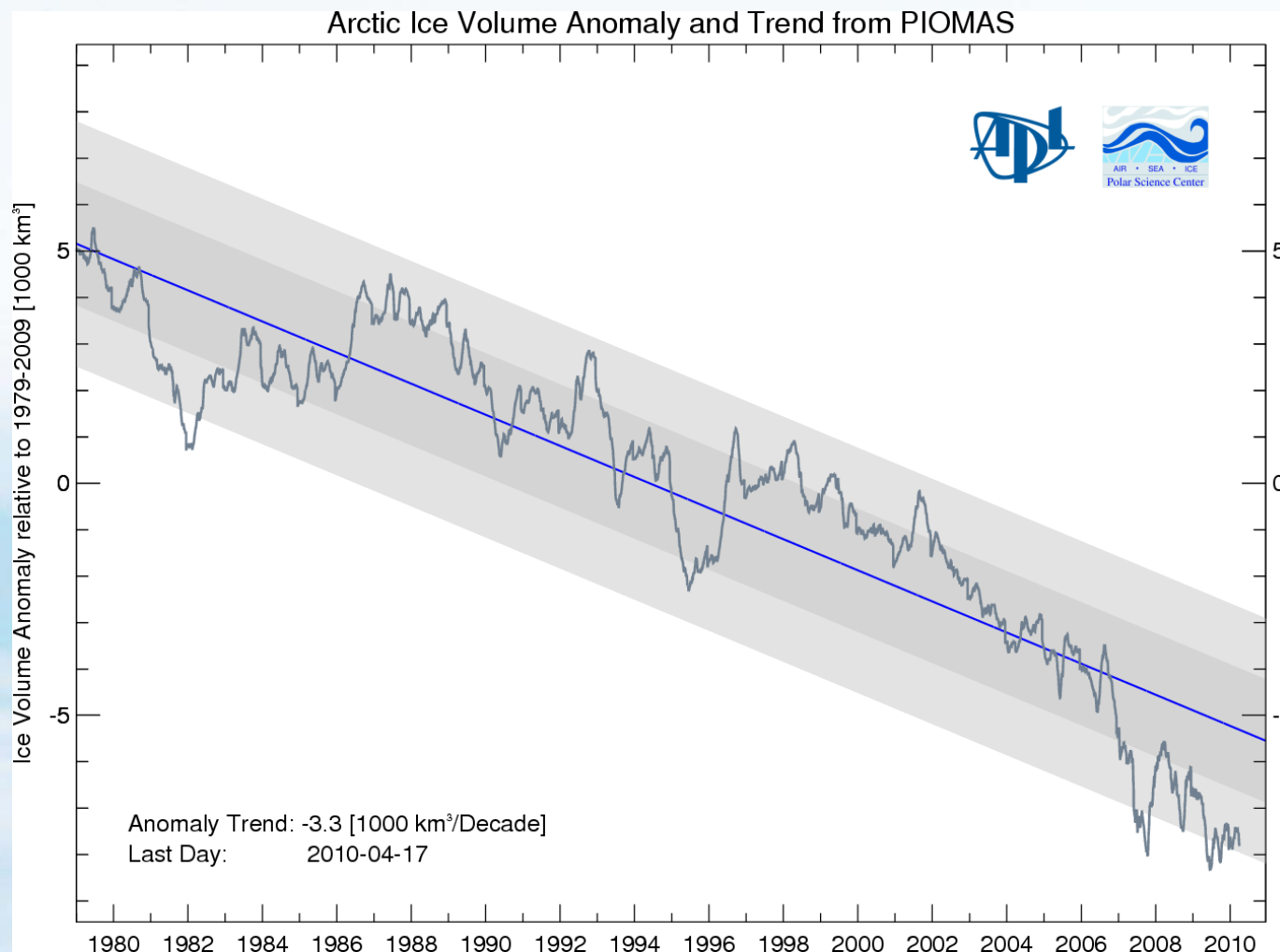
D'après GIEC, 4^e rapport d'évaluation, 2007



Evolution de l'étendue minimale de la banquise dans l'hémisphère Nord depuis 1978.

Source : National Snow and Ice Data Center, USA, 2009

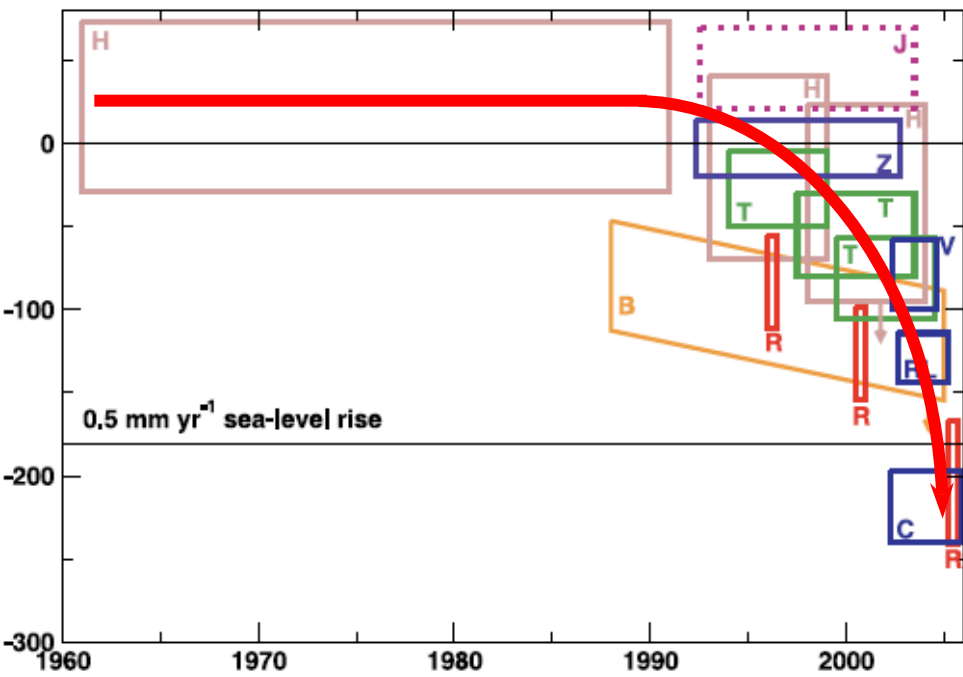
Not Archimède again : la banquise mincit aussi



Evolution du volume calculé de la banquise de l'hémisphère Nord depuis 1979, en milliers de km³ (c'est l'anomalie par rapport à la moyenne 1979-2009 qui est représentée).

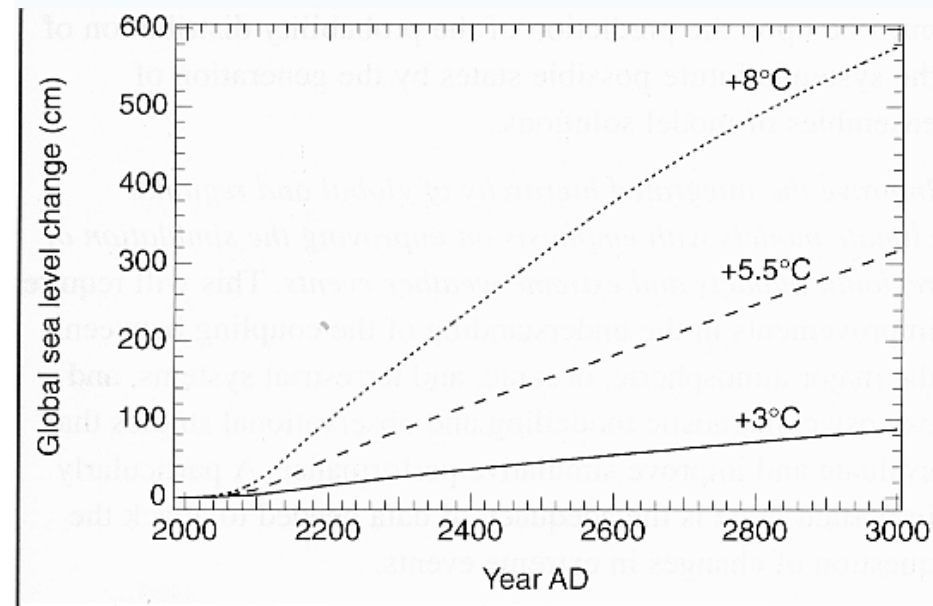
Source : Polar Science Center, University of Washington, 2010

Mais beaucoup d'Archimède se profile peut-être à l'horizon



Diverses évaluations du bilan de masse annuel du Groenland : le côté horizontal du rectangle donne la durée de la mesure ou de l'évaluation, la hauteur est centrée sur la valeur la plus probable et donne l'incertitude. On note une forte accélération récente de la perte de masse.

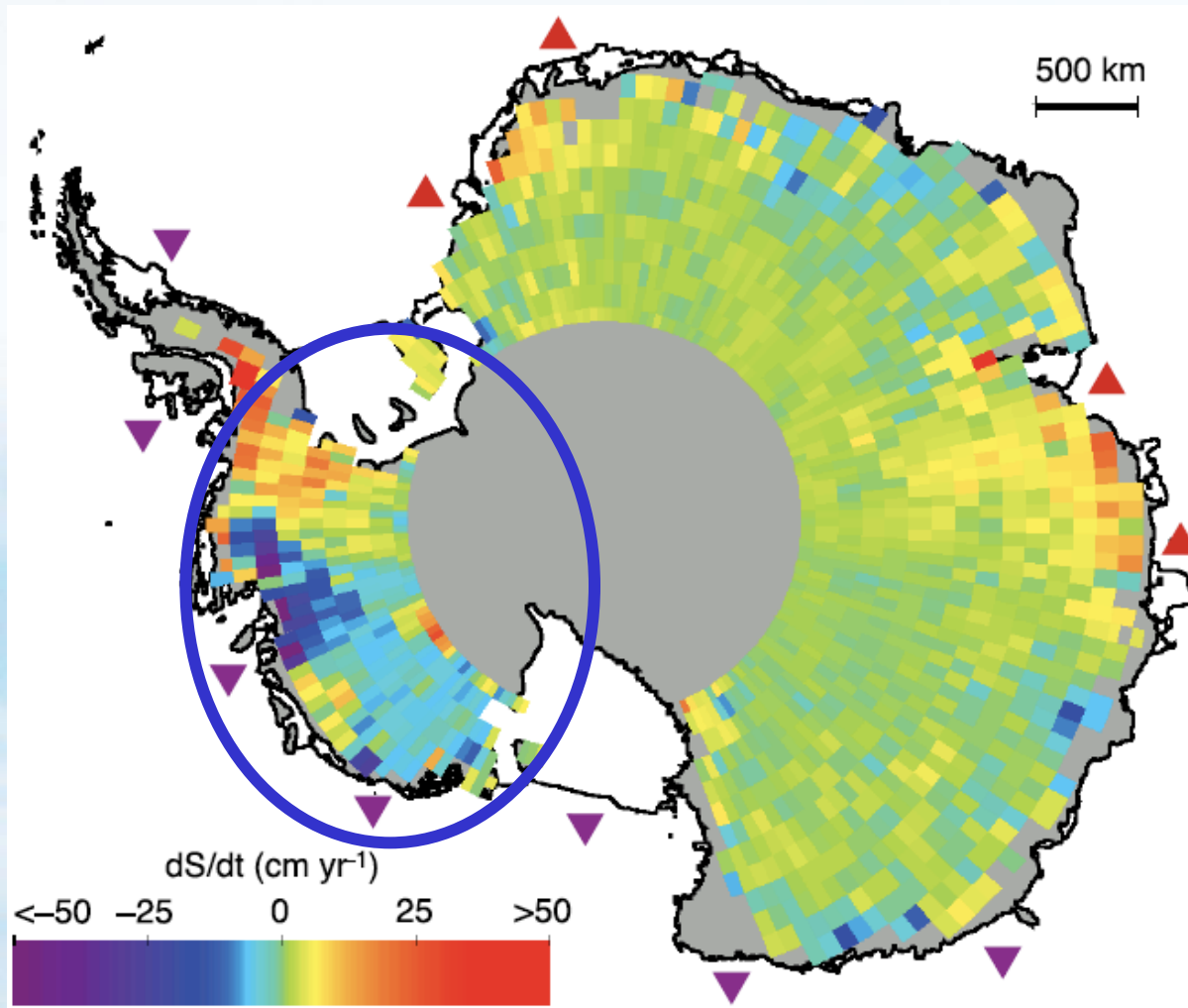
(4th Assessment Report, GIEC, 2007)



Élévation du niveau de l'océan mondial (en cm) de 2000 à 3000 en fonction de l'élévation de température au-dessus du Groenland en 3000. La mise en route de la fonte de cette calotte semble quasiment certaine, sa fonte totale élèverait l'océan mondial de 7 m.

(Climate Change 2001, the scientific Basis, GIEC)

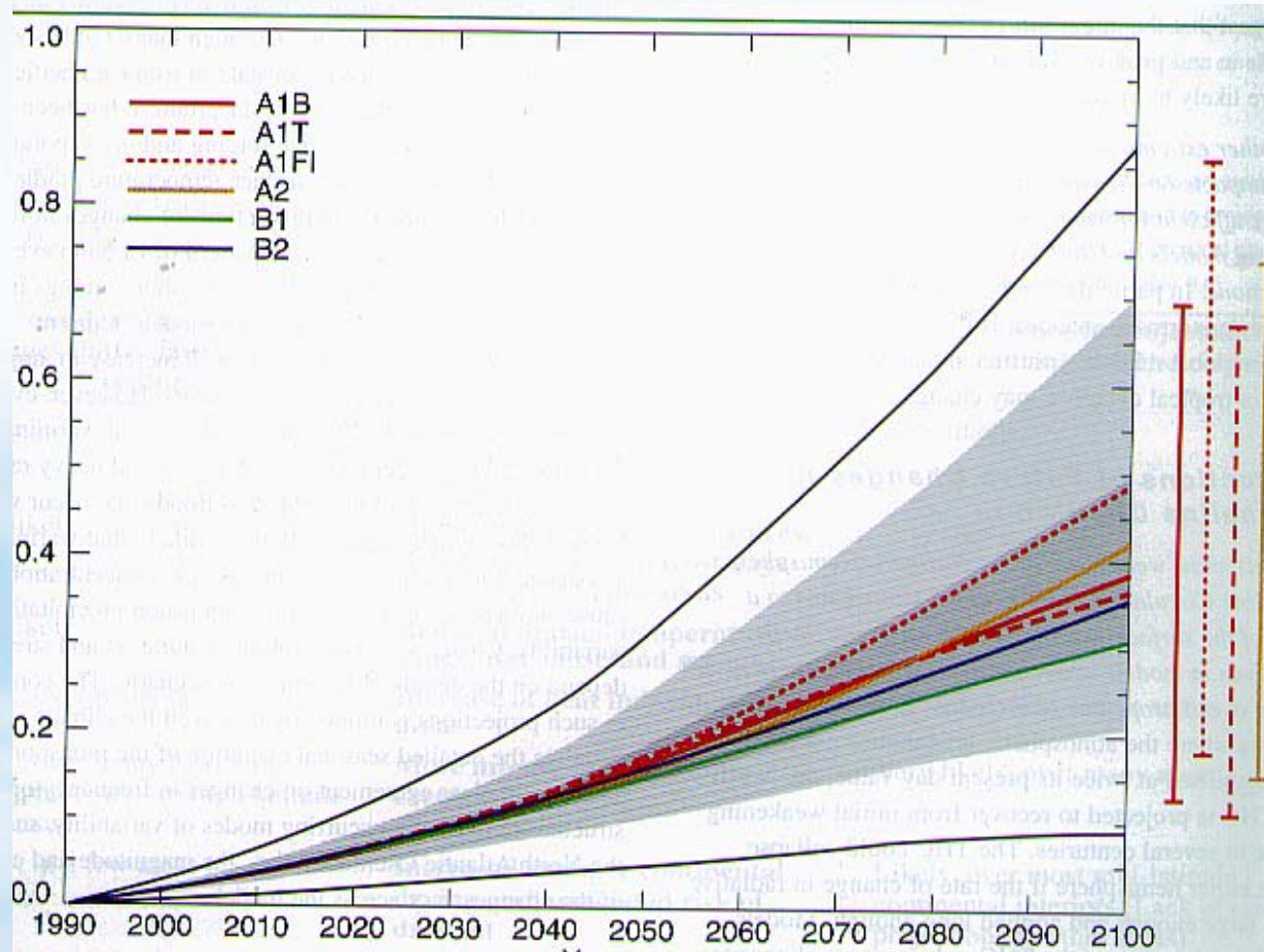
Fondra, fondra pas... : la Calotte Occidentale de l'Antarctique



Variation annuelle moyenne de l'altitude du sommet de la calotte Antarctique (en cm), mesurée par altimétrie radar entre 1992 et 2003 (raison pour laquelle la proximité du pôle Sud n'est pas couverte). Bleu et violet = perte de masse ; vert clair, jaune et rouge = gain de masse.

Fonte de Σ Antarctique = équivalent de 57 m en plus pour l'océan mondial ; calotte Occidentale \approx 6 m.
(4th Assessment Report, GIEC, 2007)

Hors calottes, la grosse bête va monter de toute façon

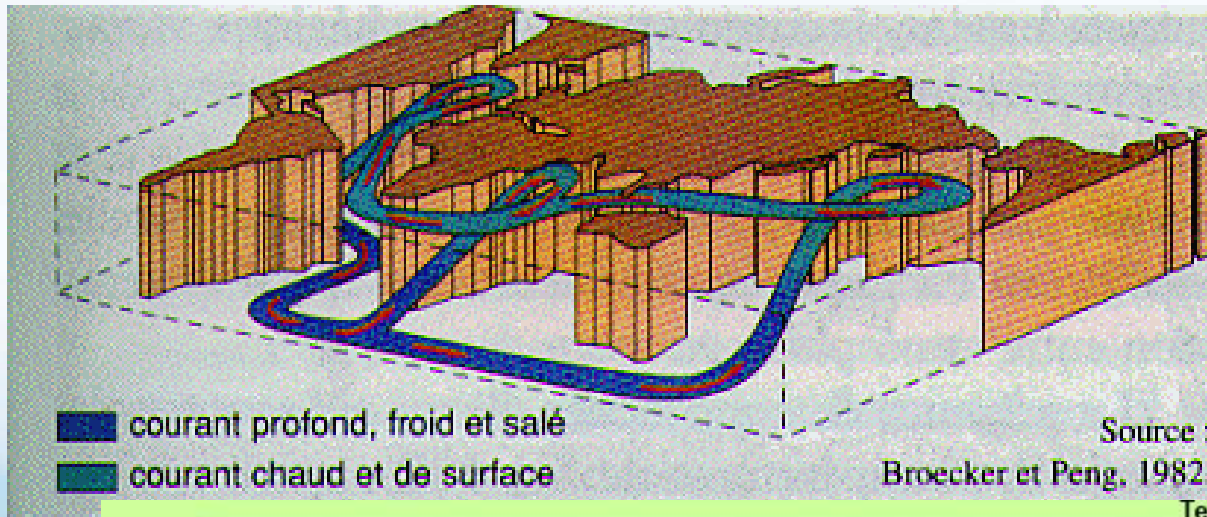


Climate Change 2001, the scientific Basis, GIEC

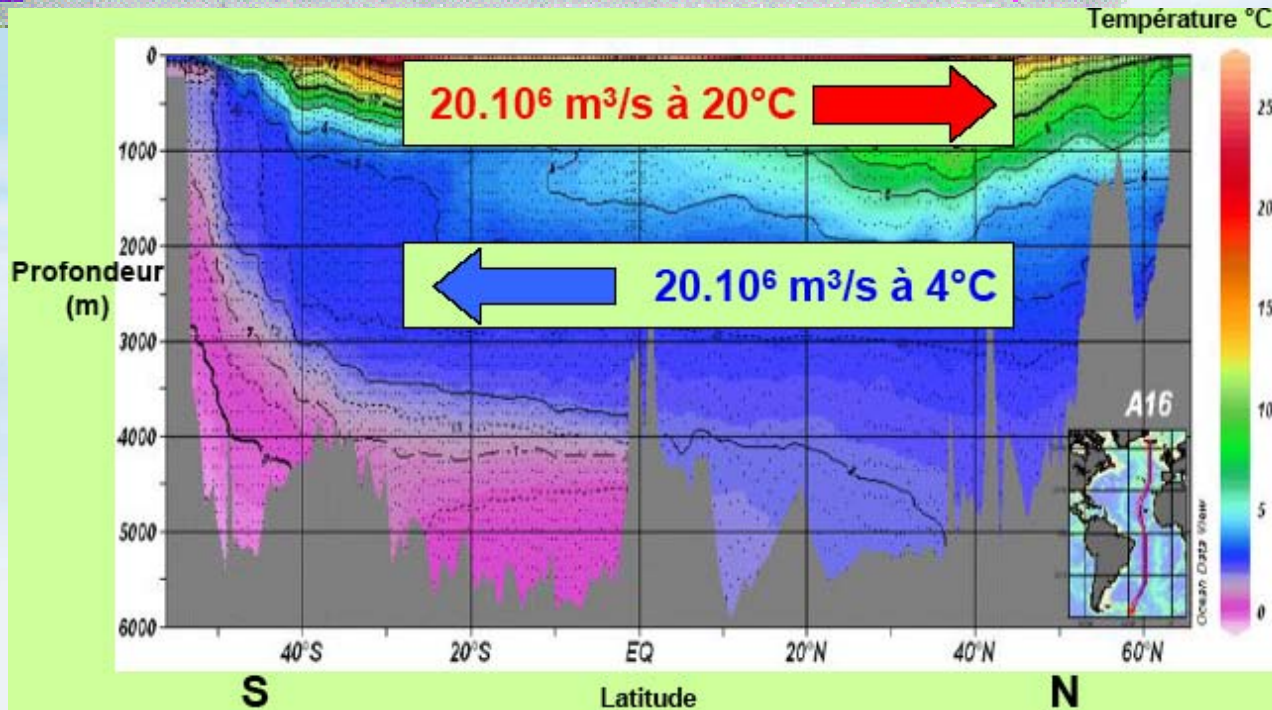
L'eau montera sous l'influence de la dilatation des océans et de la fonte des glaces :

- Inondations de surfaces terrestres peu élevées (deltas, ..)
- Salinisation possible des nappes phréatiques proches des côtes,
- Dégâts plus en profondeur lors de tempêtes

Le Jour d'Après est-il pour demain ?

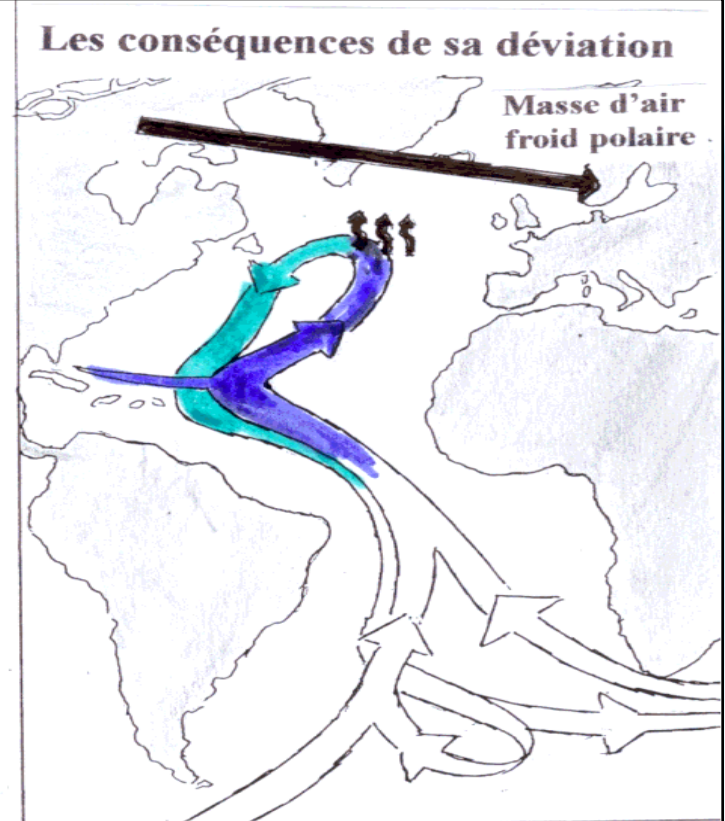
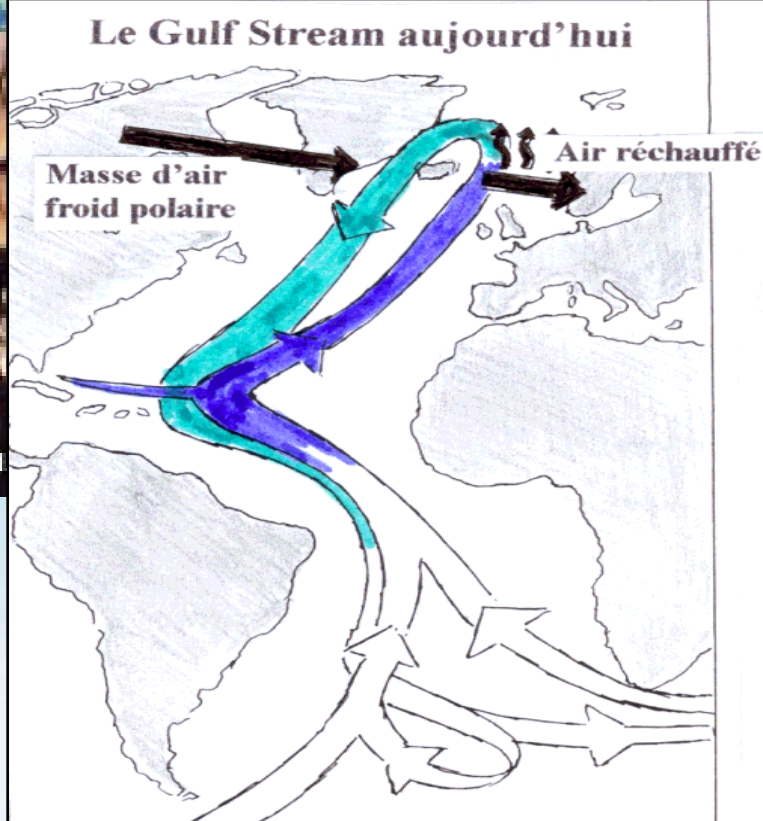
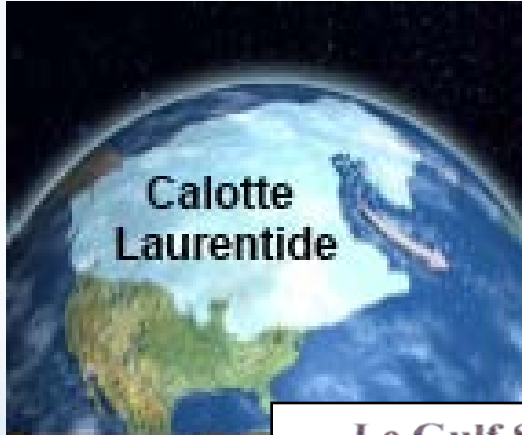


Une plongée des eaux a lieu en permanence près du Groenland. Cela influe de manière déterminante sur les transports de chaleur entre les latitudes.

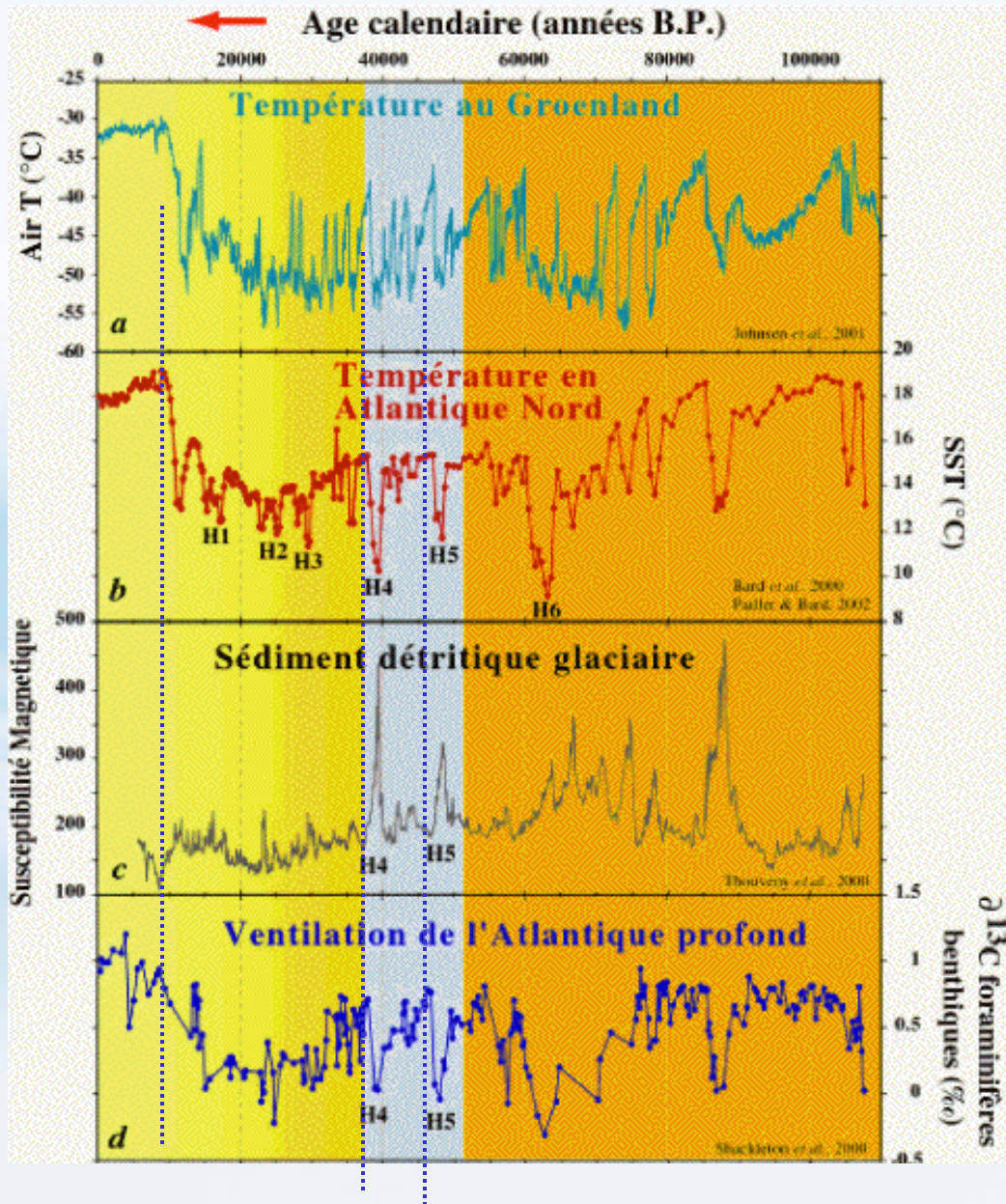


Les eaux profondes remontent également les éléments nutritifs (sels minéraux) indispensables à la faune marine de surface.

Le Jour d'Après est (presque) arrivé... hier !



Isotopes et alkénones sont sous le bateau...



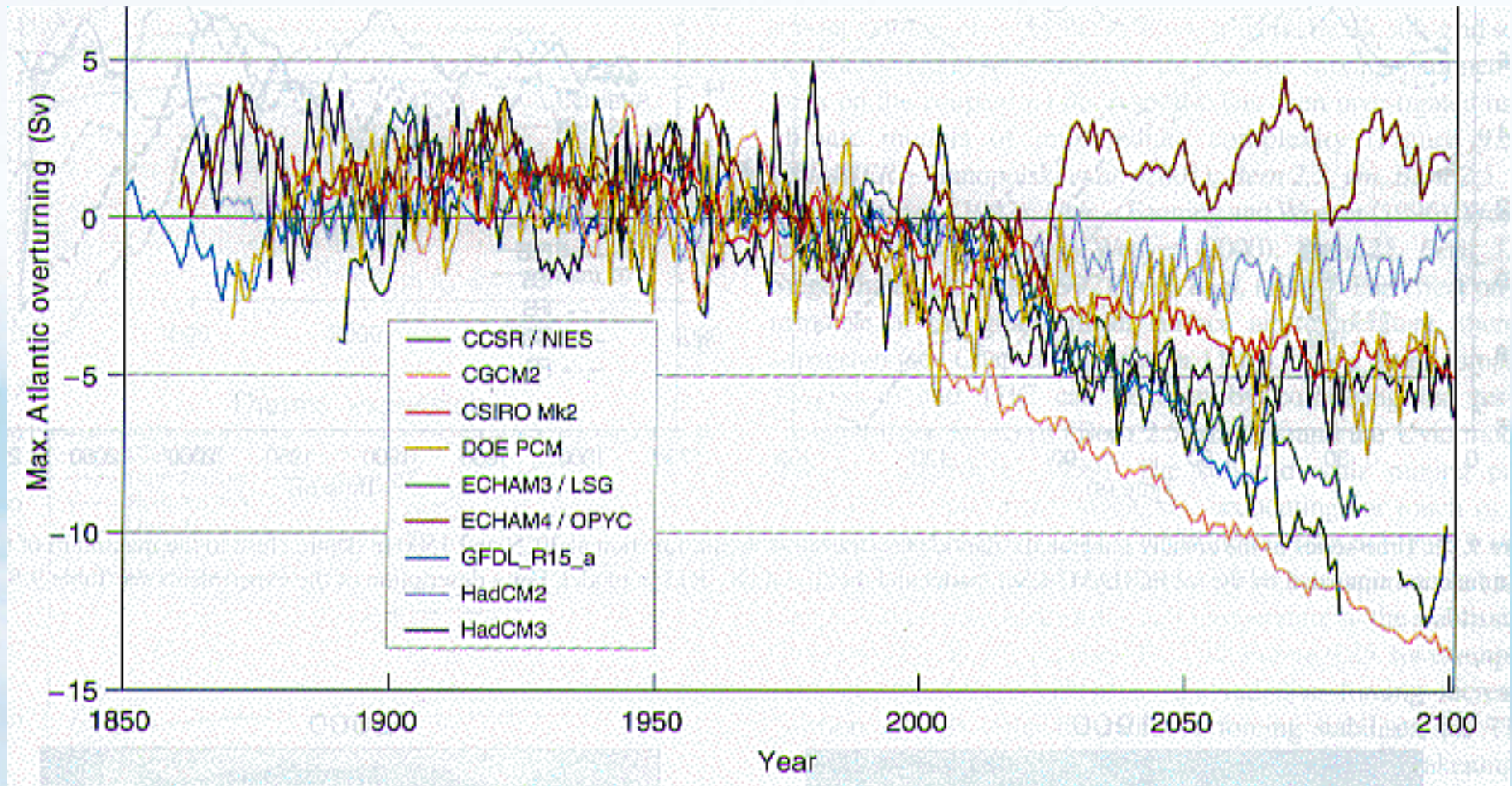
De tels ralentissements, engendrant de véritables « chocs climatiques », sont arrivés à de multiples reprises dans le passé (les lignes verticales tiretées en montrant 3 ; le plus récent s'appelle le Dryas récent).

Reconstitution, sur les 100.000 dernières années :

- de la température au-dessus du Groenland ($\delta O_{18}/O_{16}$, $\delta D/H$ dans la glace)
- de la température de surface de l'Atlantique Nord (proportion d'alkénones dans les sédiments marins)
- de la proportion de sédiments détritiques glaciaires dans les sédiments marins (atteste de la présence d'icebergs détachés du Laurentide et du Groenland)
- de la teneur en oxygène de l'eau profonde ($\delta C_{13}/C_{12}$ dans les foraminifères benthiques)

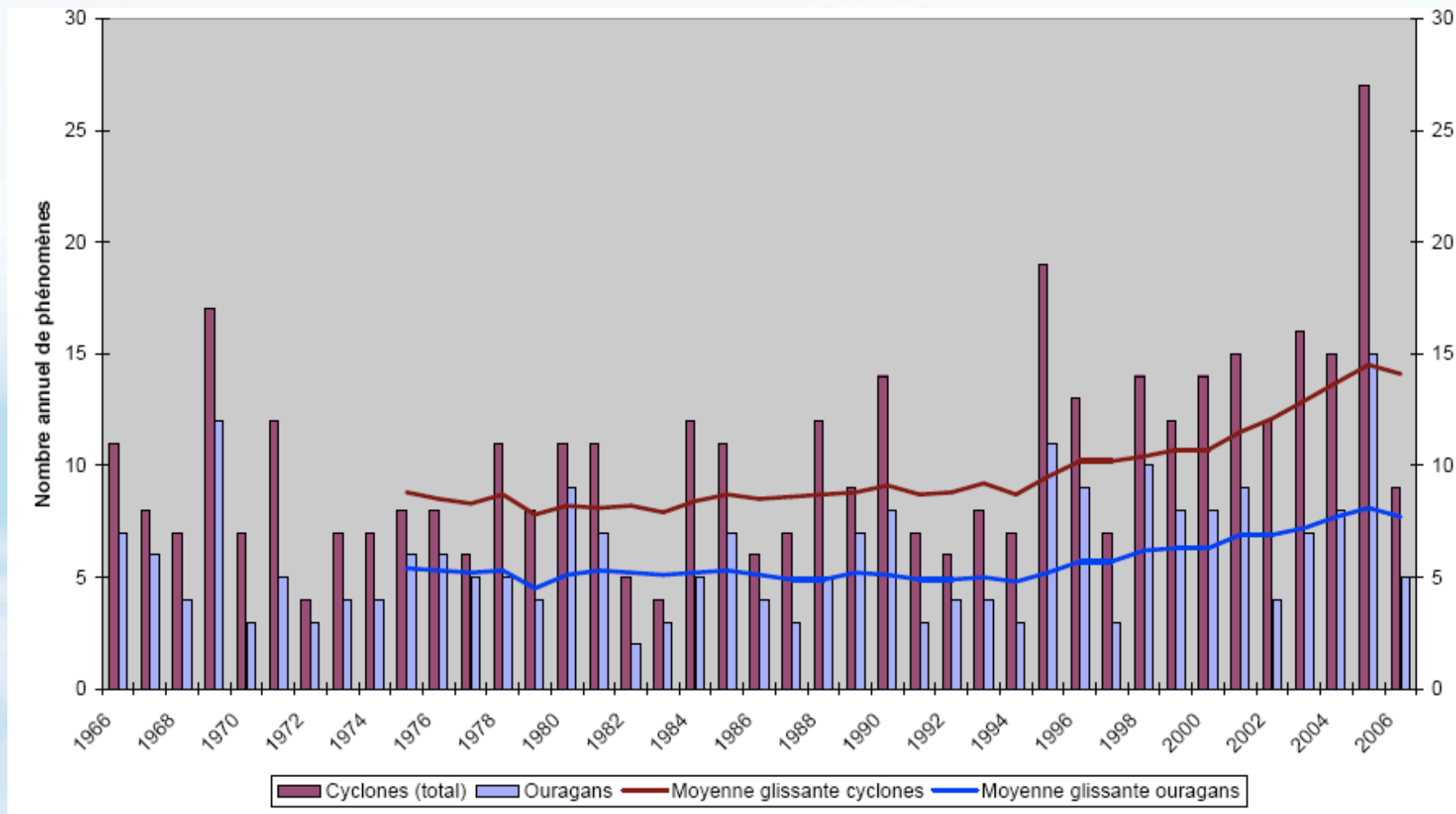
Source : Edouard Bard, Physics Today, 2002

Petit coup de frein ou gros crash, là est la question



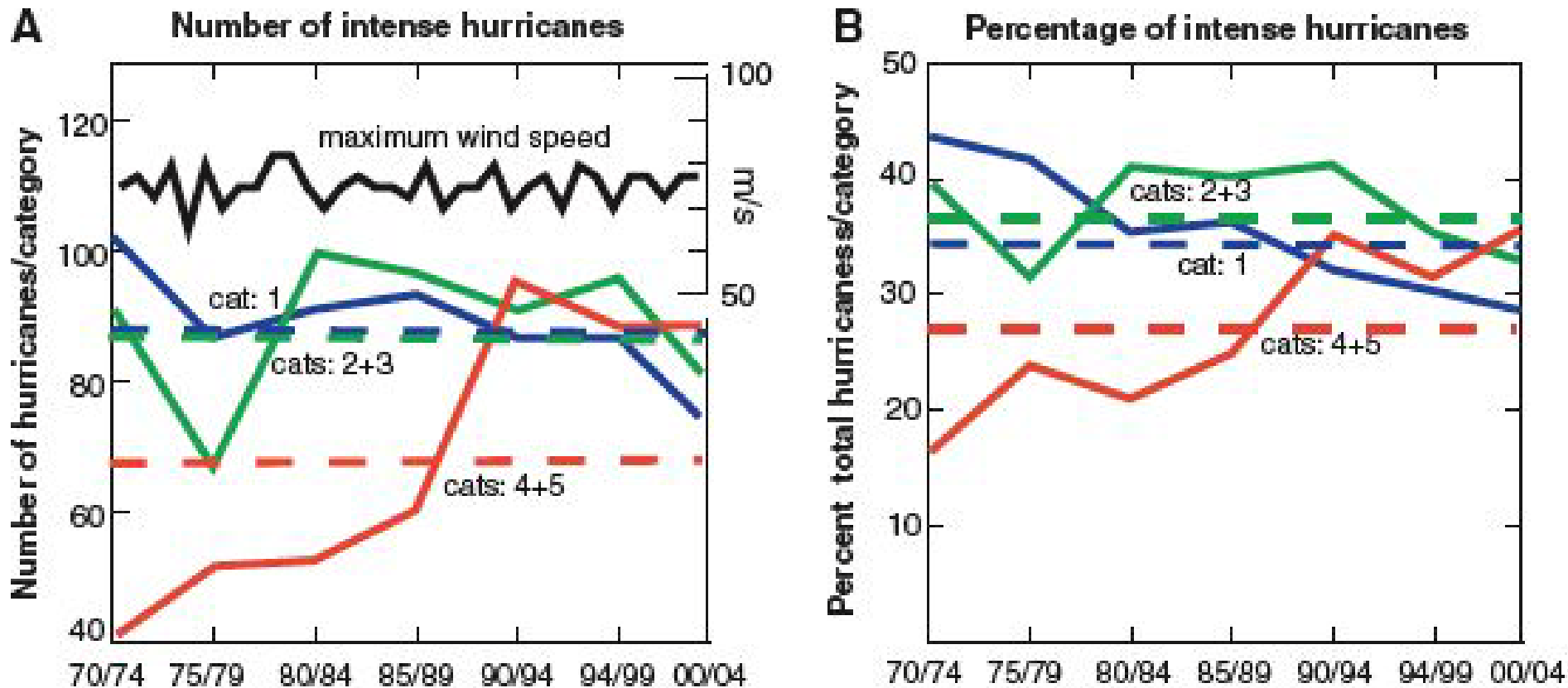
Évolution du flux nord atlantique ($1\text{Sv} = 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$) pour le scénario IS 92a (720 ppmv de CO_2 en 2100 ; élévation de température moyenne de $2,5 \text{ }^\circ\text{C}$ en 2100). Le niveau actuel est de 20 à 25 Sv. Source : Climate Change 2001, the scientific Basis, GIEC

Déjà plus de cyclones ? P'têt ben qu'oui, p'têt ben qu'non...

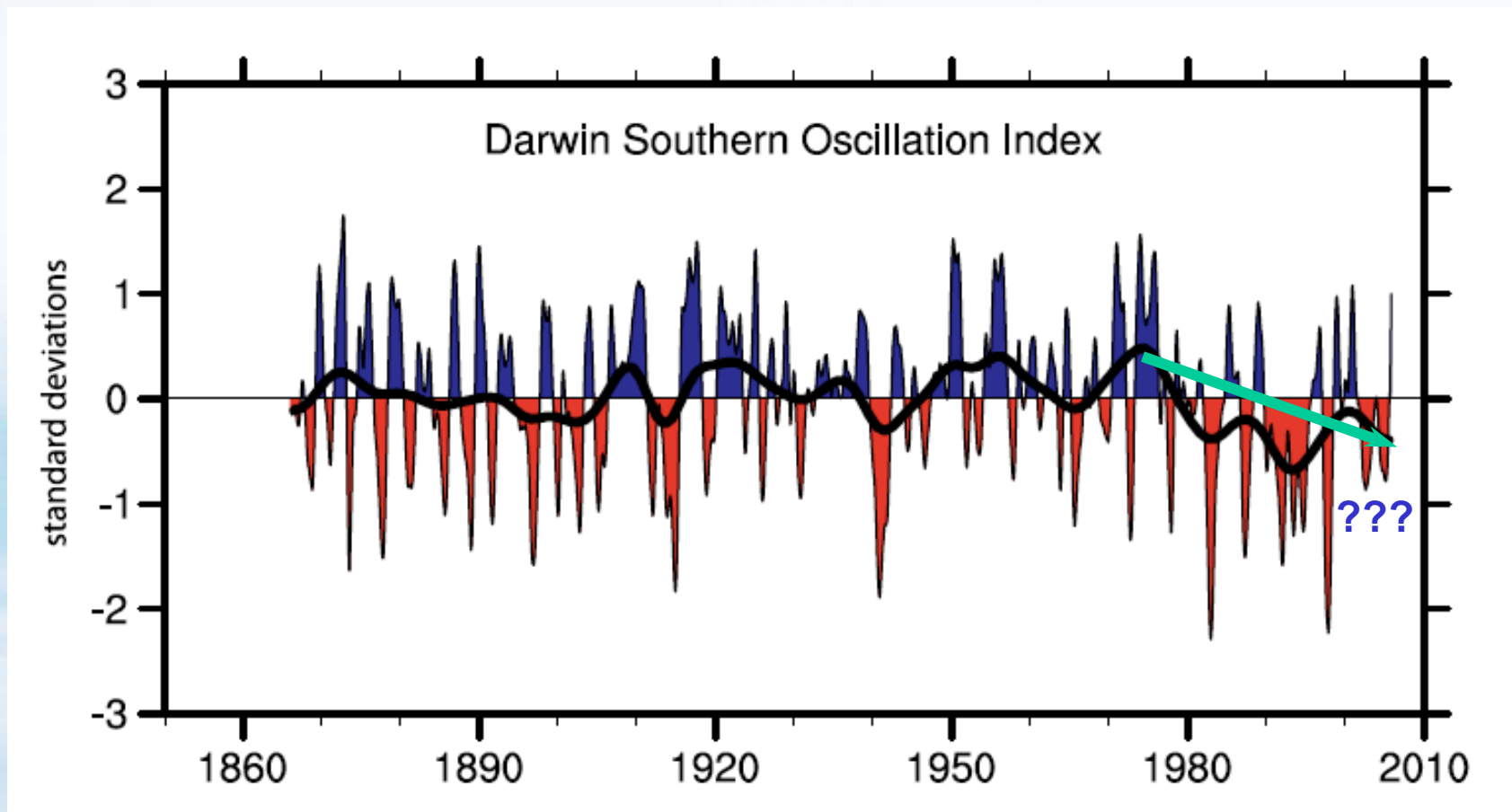


Evolution du nombre de cyclone sur l'Atlantique tropical de 1966 à 2006. Source Météo France

Une puissance cyclonique accrue ? P'têt ben qu'oui....



Evolution sur 30 ans du nombre de cyclone dans le monde par catégorie (gauche), et proportion de chaque catégorie dans le total (droite). Source Science, 2005

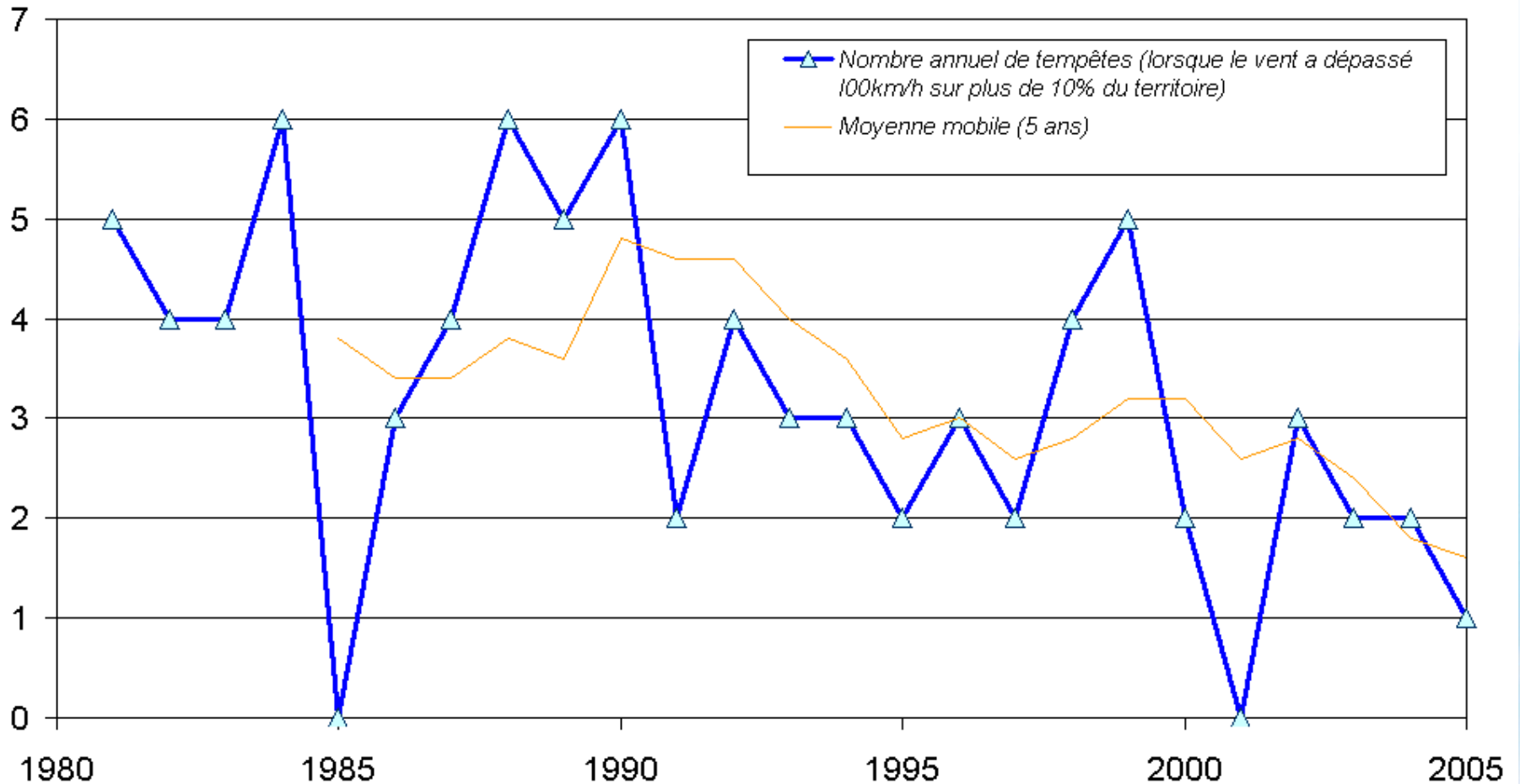


Evolution de l'indice mesurant l'intensité de l'oscillation El Nino-La Nina. Le bleu correspond à une situation « La Nina », le rouge à une situation « El Nino.

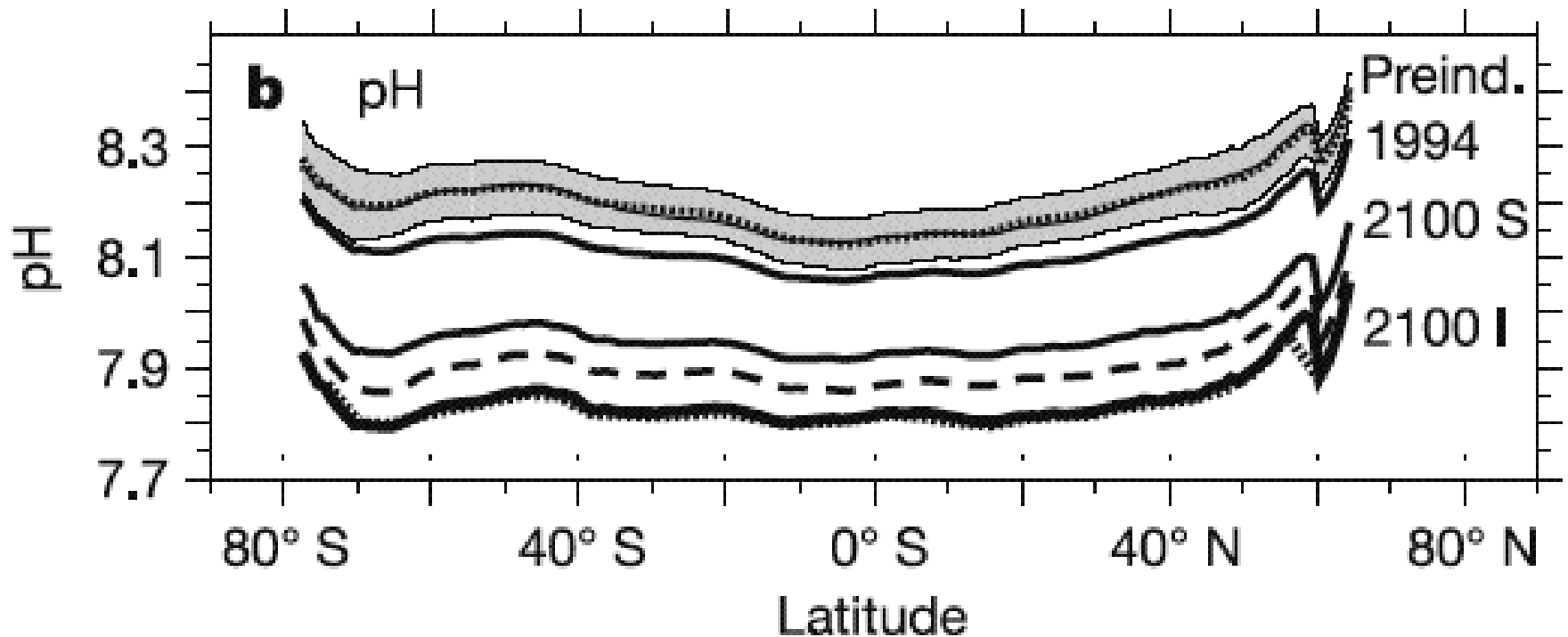
Source : GIEC, AR4, 2007

Plus de tempêtes en France ? Pas en nombre

Nombre annuel de tempêtes



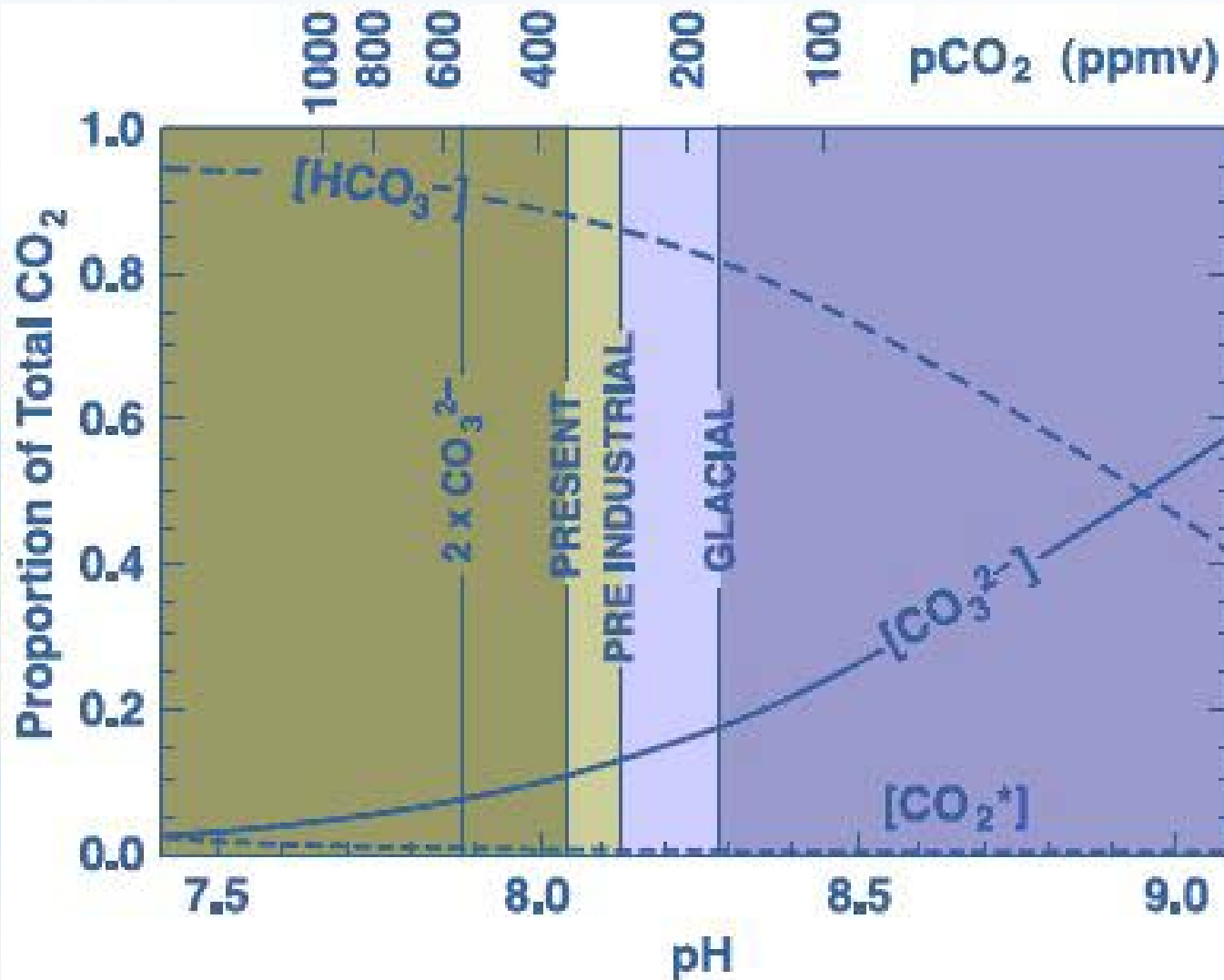
Plus de CO₂ dans l'air n'a pas que des effets climatiques...



Simulation de variation du pH de l'océan d'ici 2100 en fonction de la latitude et du scénario d'émission (S = 550 ppm de CO₂ en 2100, I = 800 ppm de CO₂ en 2100).

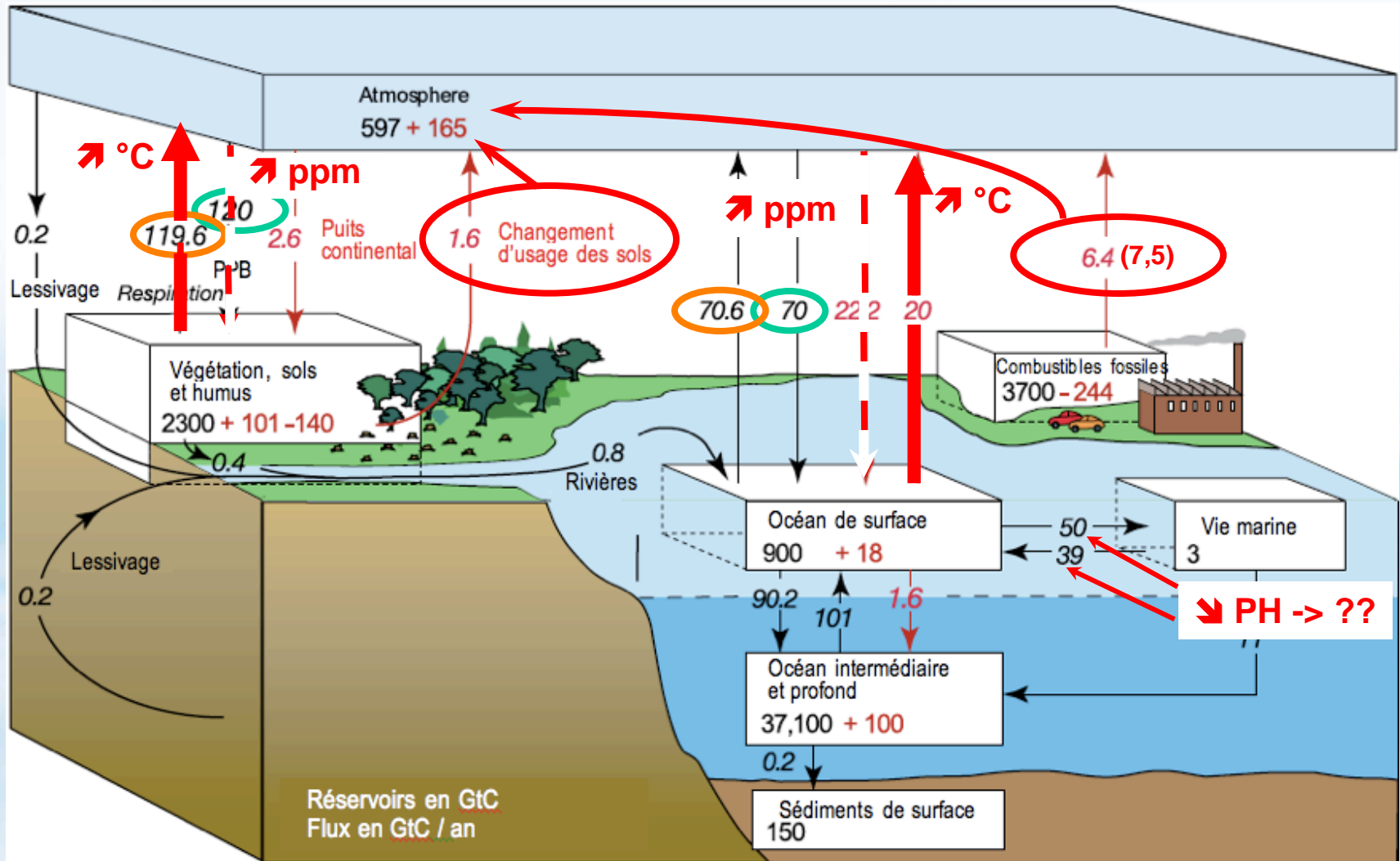
Source Orr et al., Nature, 2005

Un océan plus acide = moins de calcaire produit



Proportions respectives de carbonates et de bicarbonates en fonction du pH. Dans un océan plus acide, la disponibilité en carbonates diminue.

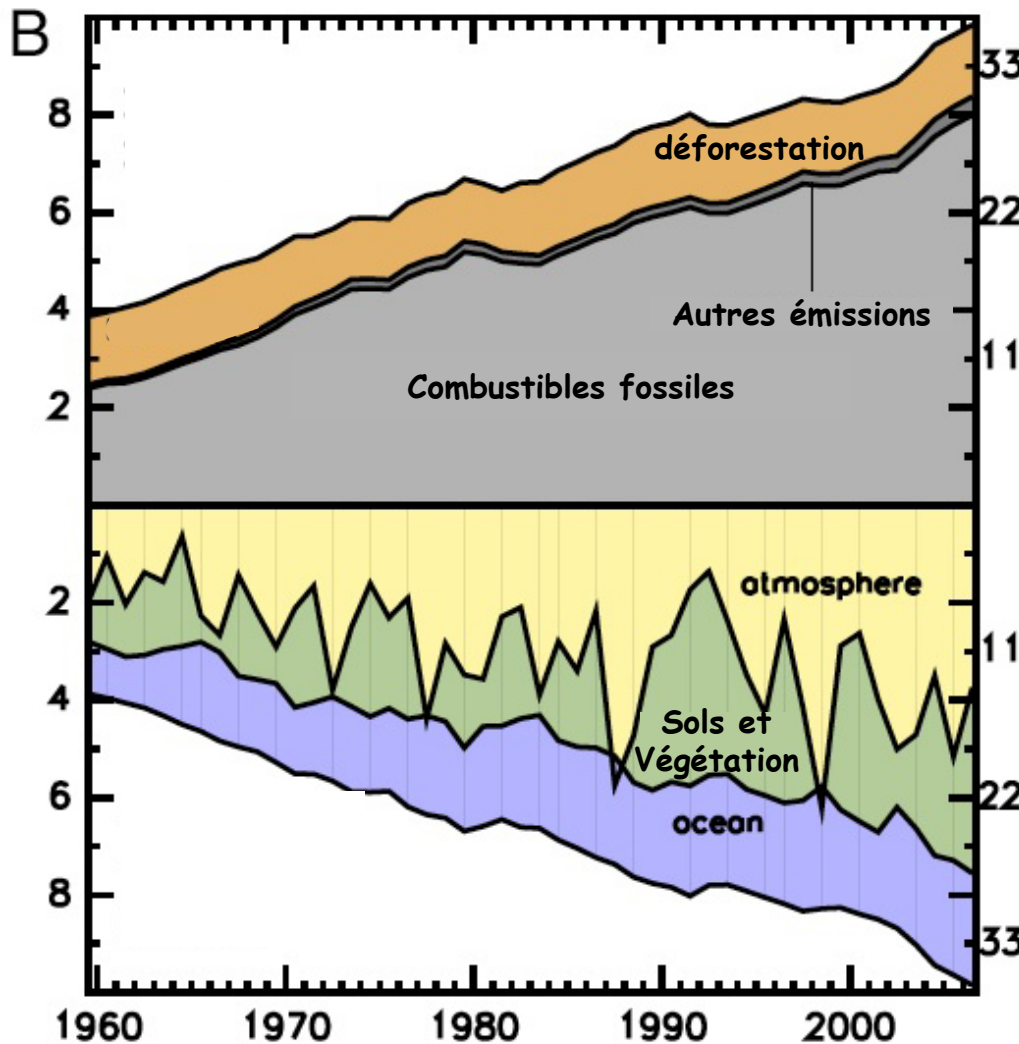
Plus de CO₂ = plus chaud, mais l'inverse est vrai aussi !



Chiffres en noir : stocks et flux préindustriels, en milliards de tonnes de carbone. Chiffres en rouge : modifications d'origine anthropique (flux pour la moyenne de la décennie 1990 ; modifications des stocks sur la période 1750-1994). Source GIEC, 4^e rapport d'évaluation, 2007

Le CO₂ dans l'air : un petit tour et puis s'en va... ou pas ?

Milliards de tonnes de carbone



Emissions de CO₂ passées de **15** à **presque 40** milliards de tonnes en un peu moins de 50 ans

L'atmosphère conserve environ **45%** des émissions ↗

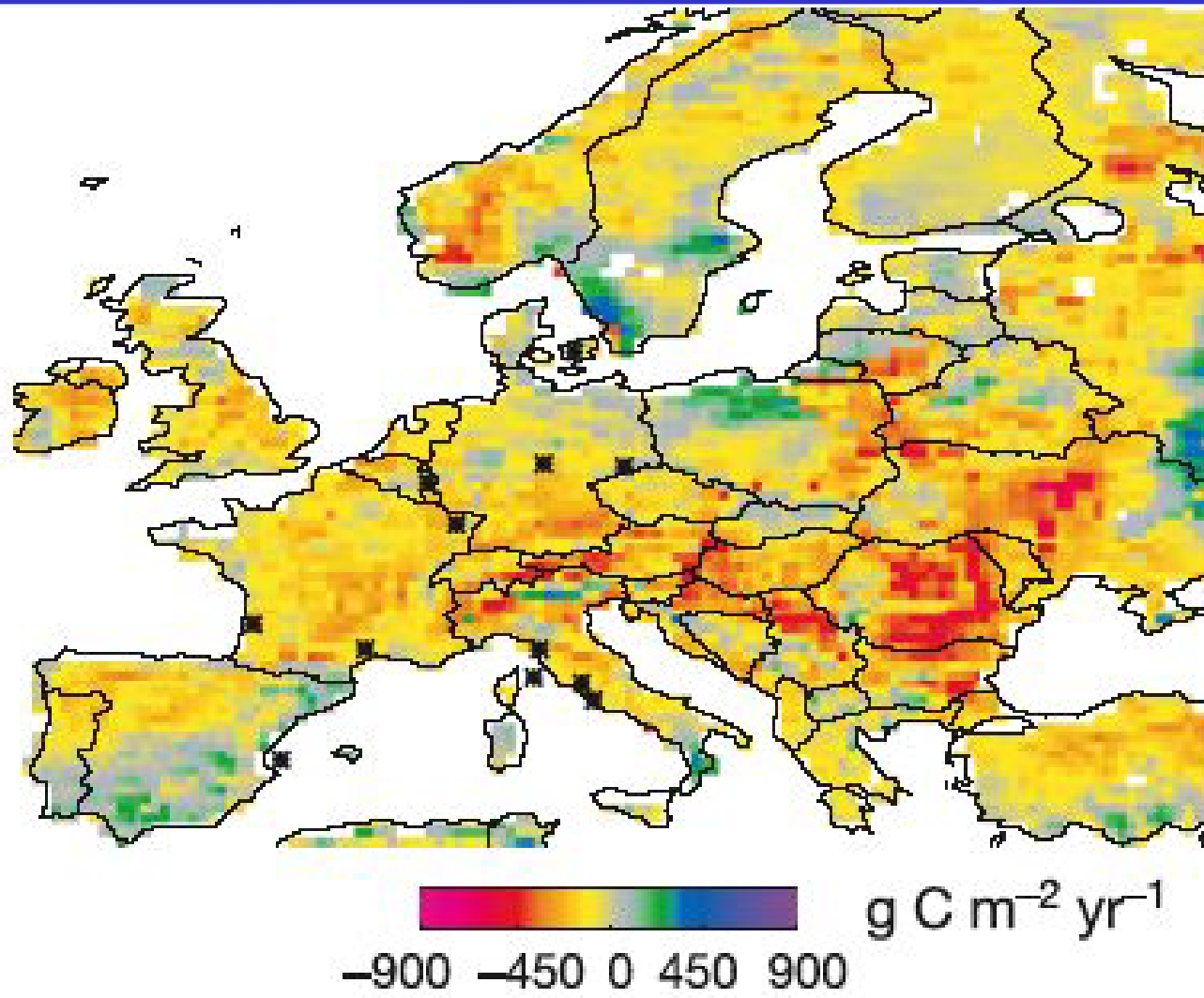
Les végétaux absorbent environ **30%** des émissions →

L'océan absorbe environ **25%** des émissions, ↘

Evolution des émissions de CO₂ depuis 1960 (en haut), et accroissement du stock de carbone de chaque compartiment de la planète sur la même période (en bas).

Source : Canadell et al, Proceedings of the National Academy Of Science (US), 2007.

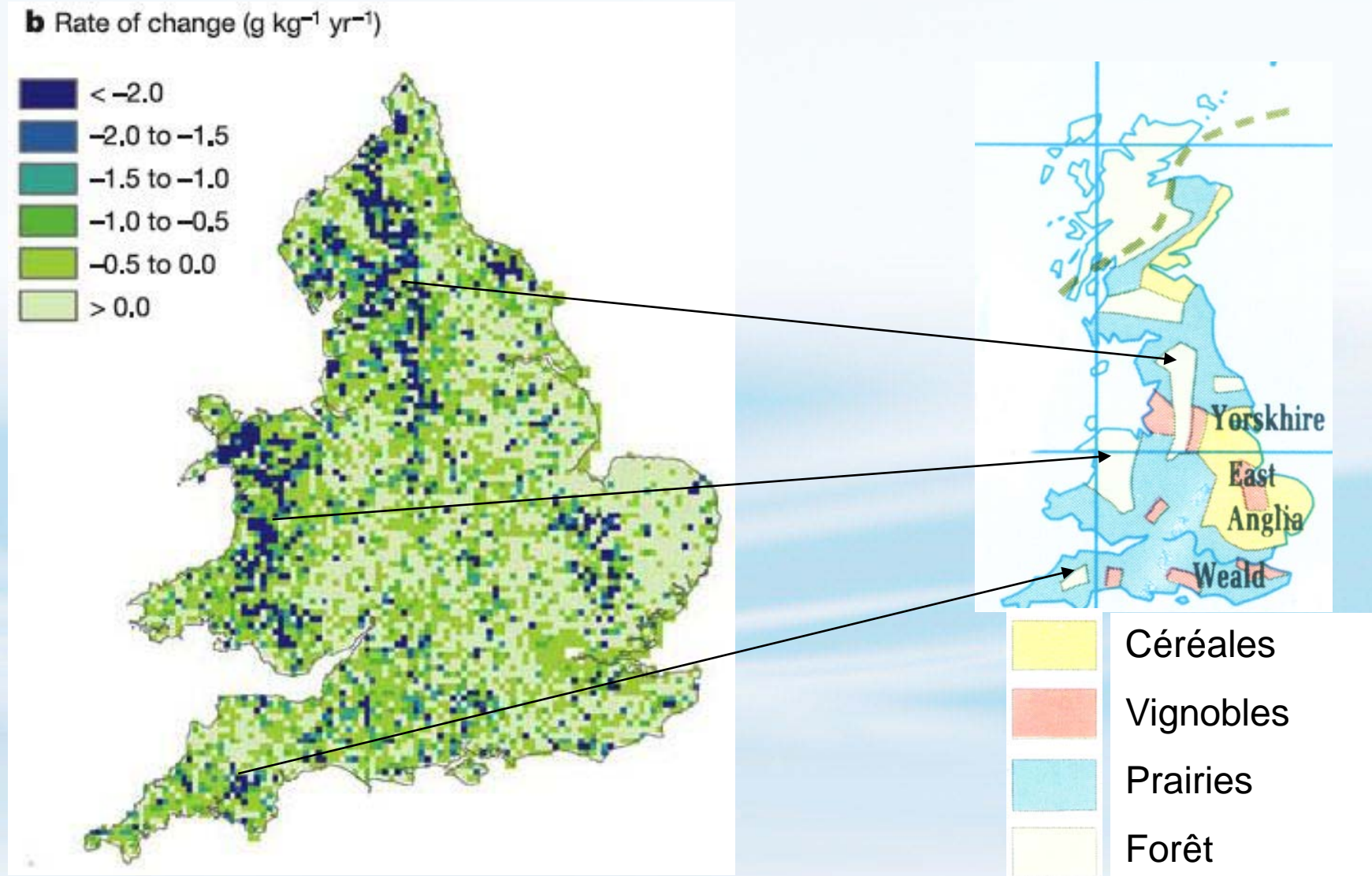
Le déstockage est-il pour bientôt ?



Comparaison de la productivité primaire nette des écosystèmes en 2003 avec la moyenne 1998-2002. Quasiment partout le flux descendant s'est affaibli, et en 2003 les écosystèmes européens ont « recraché » 4 ans de « pompage » du CO₂

Source Ciais et al., Nature, septembre 2005

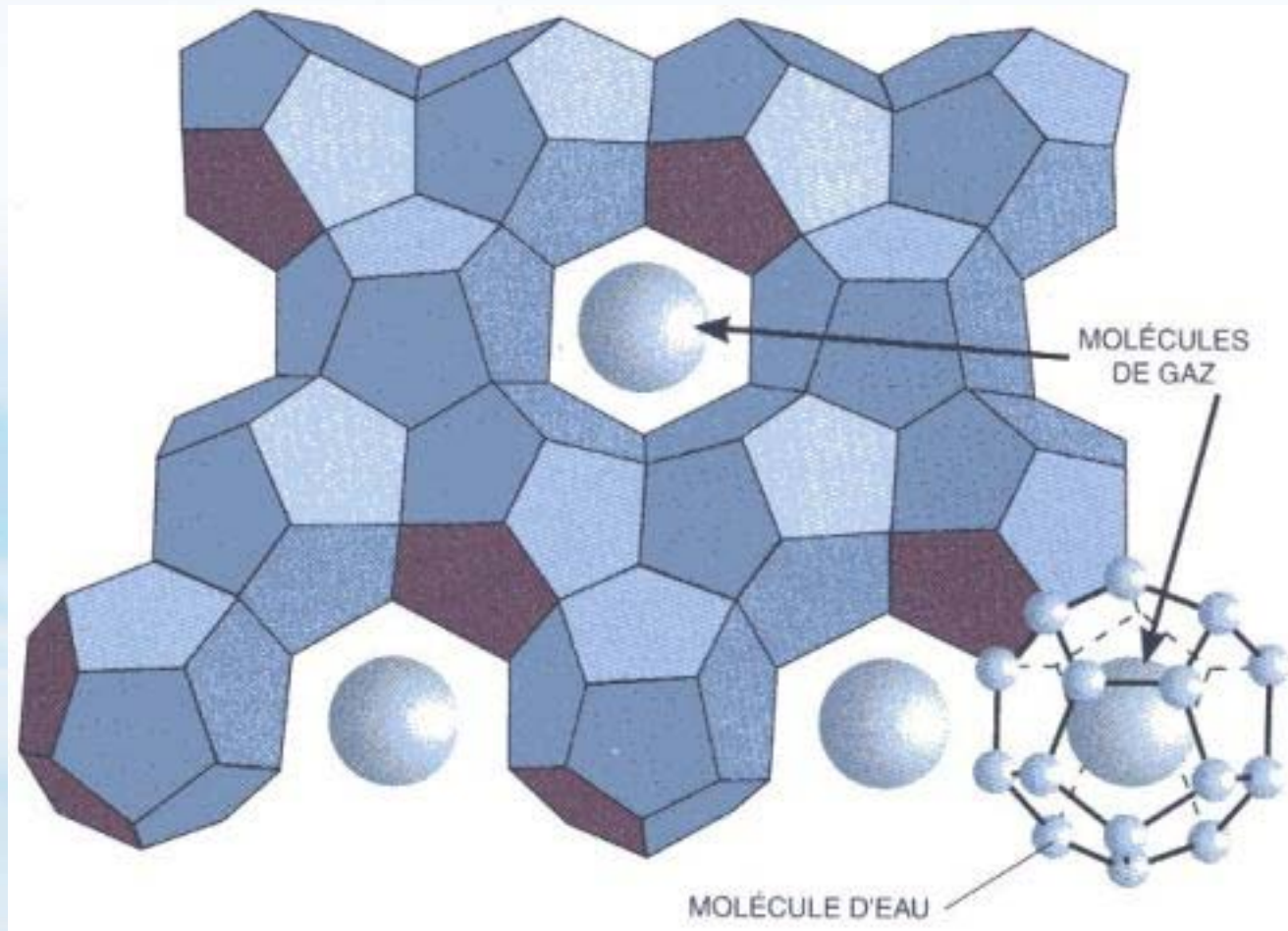
Le déstockage est-il pour bientôt ? (bis)



Evolution du stock de carbone dans les sols anglais de 1978 à 2003. Sur la période, les sols ont perdu ce que la biomasse a absorbé.

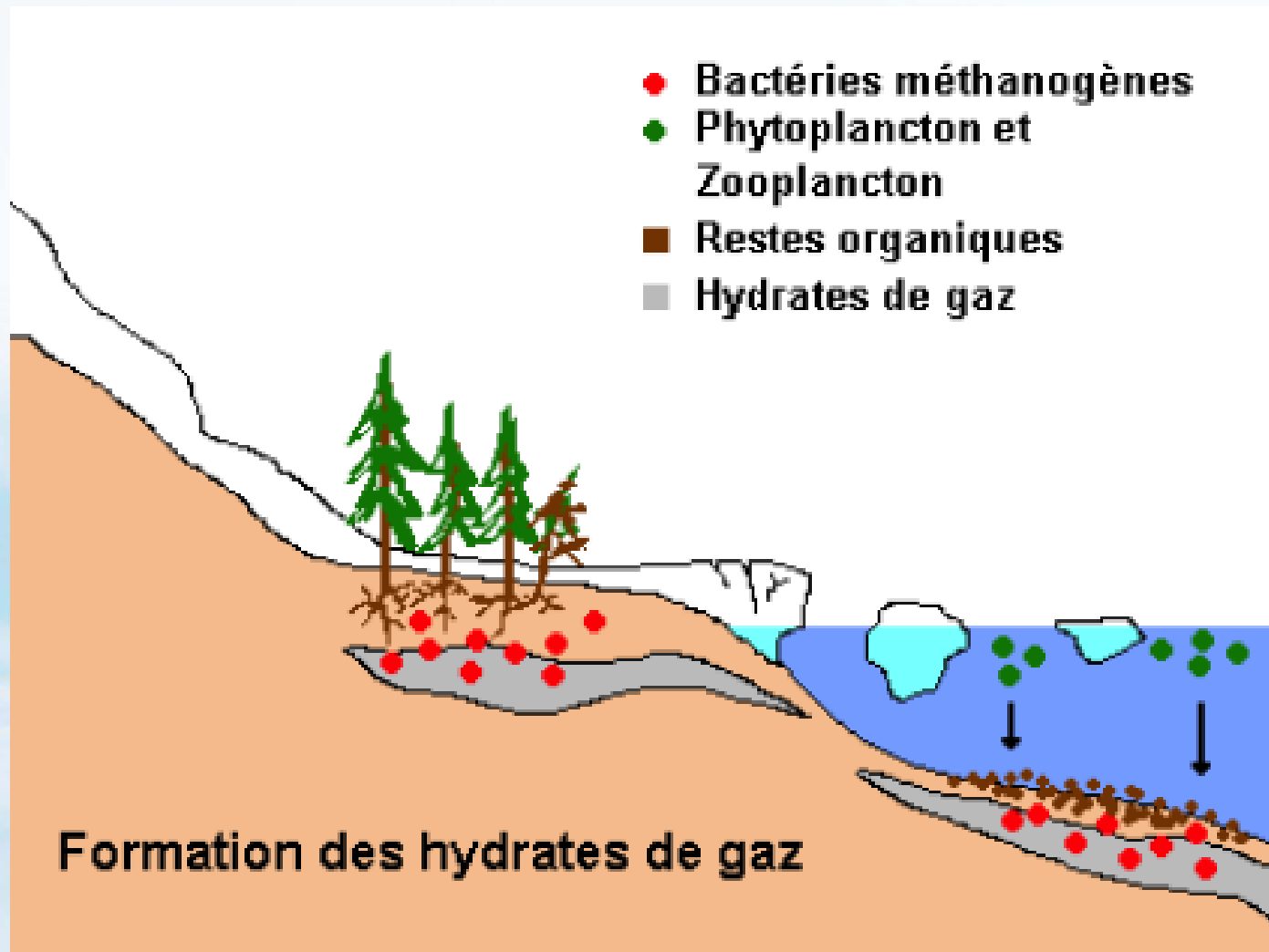
Source Bellamy et al., Nature, septembre 2005

Encore plus fort : les hydrates de méthane



Structure d'un hydrate de méthane

Les hydrates de méthane, c'est où ?



Formation des hydrates de méthane

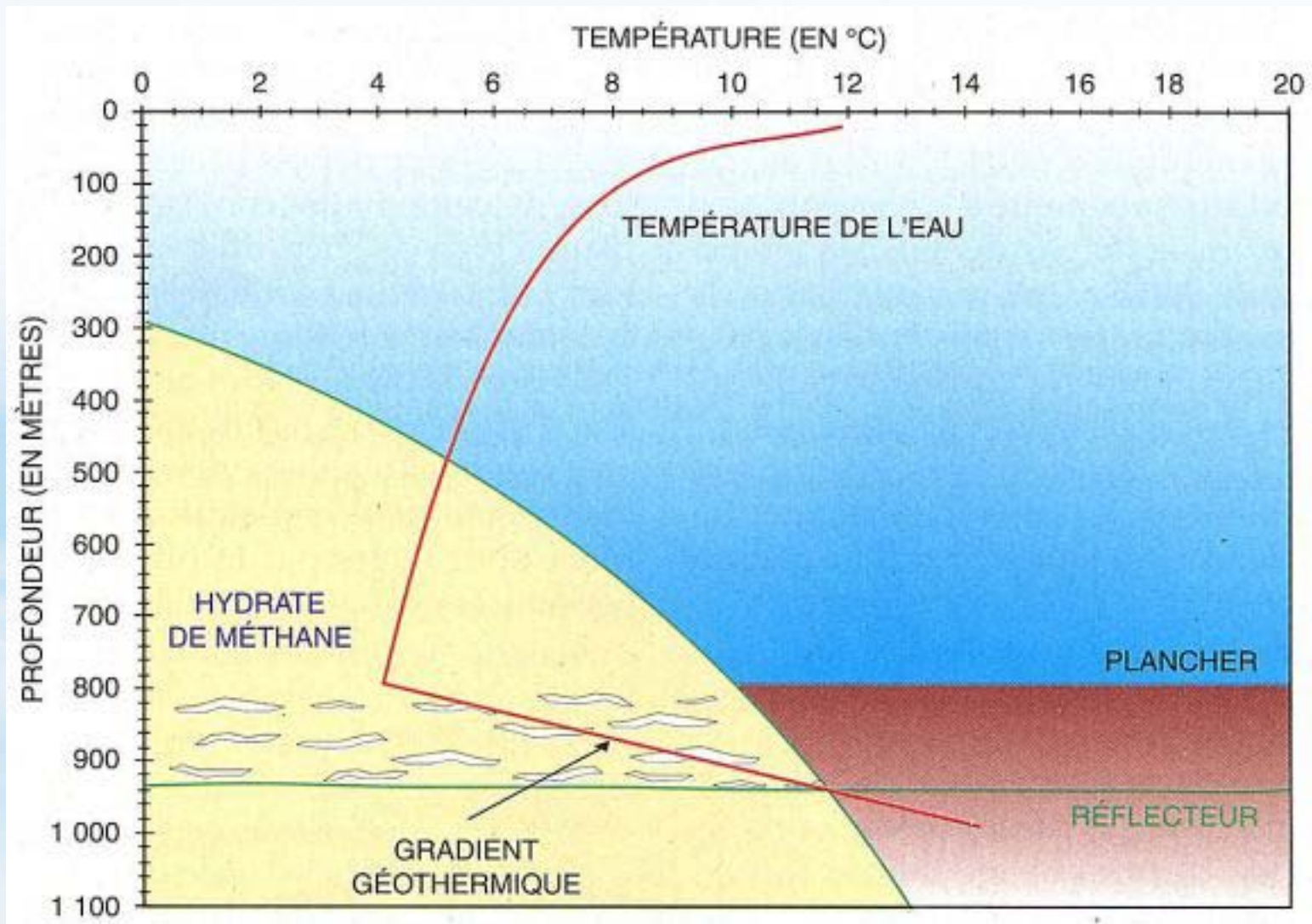
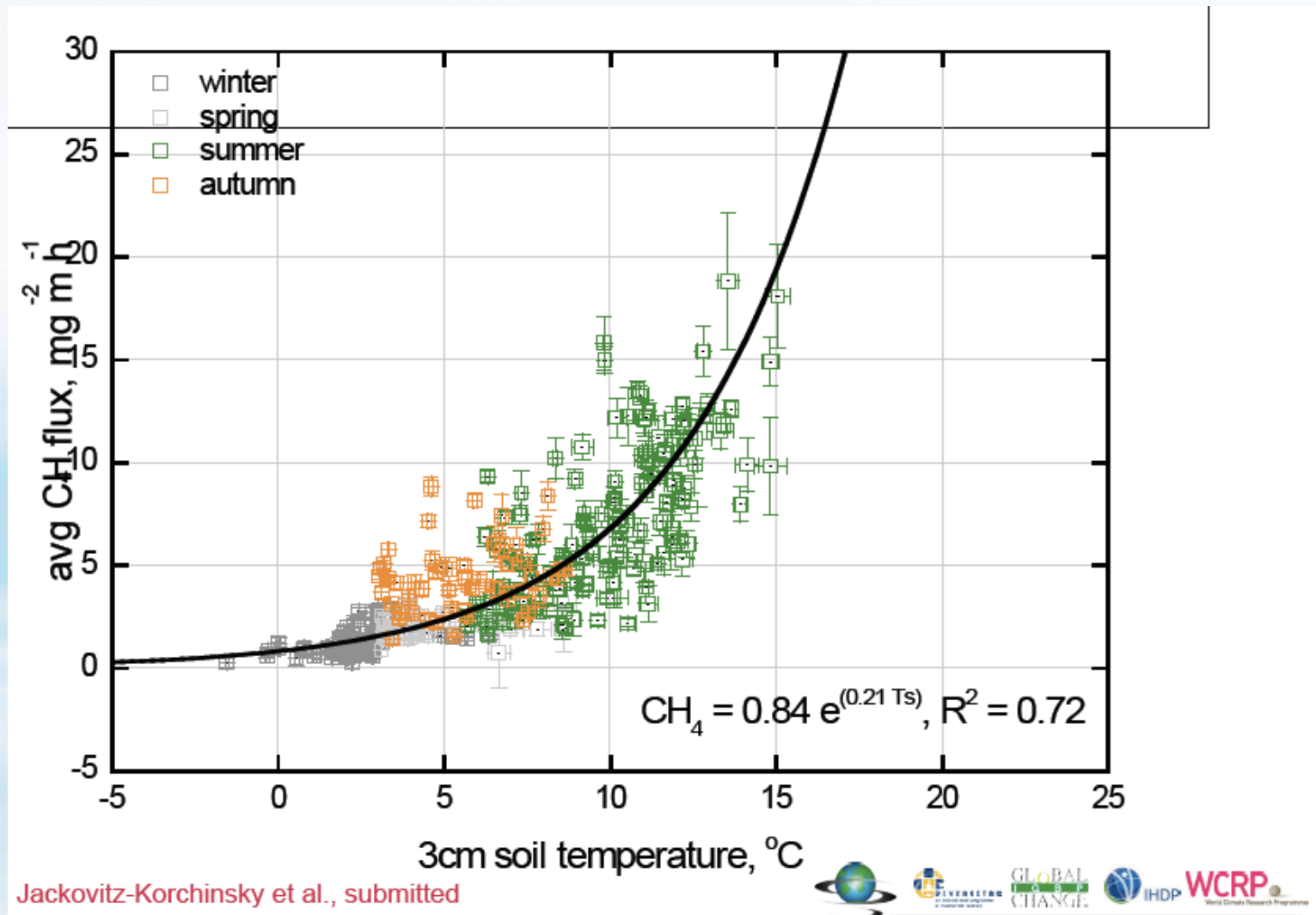


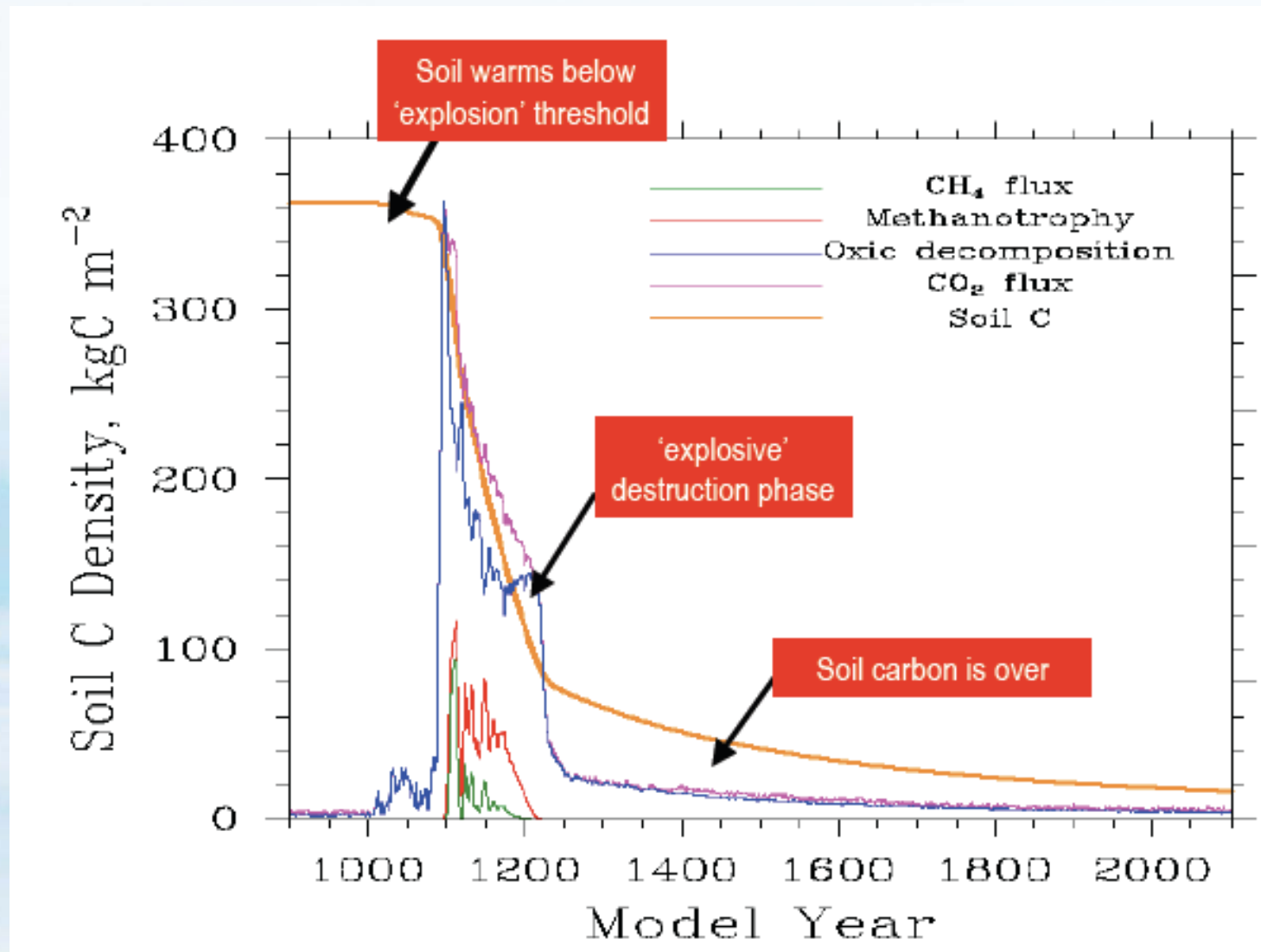
Illustration de la zone de stabilité des hydrates

Plus chaud (et plus humide), le CH₄ aime aussi



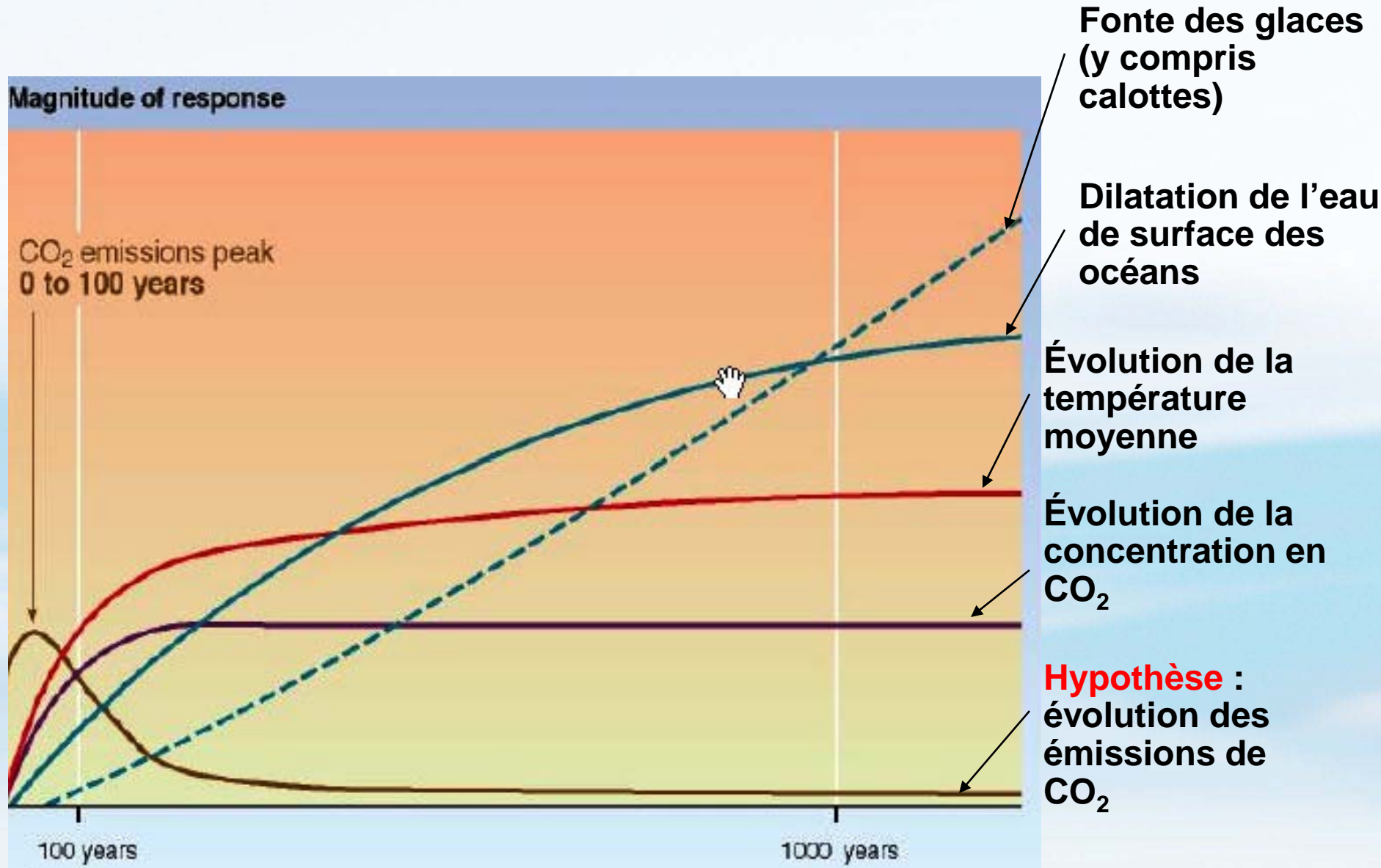
Emissions de CH₄, en mg par m² et par heure, en fonction de la température du sol (3 cm sous la surface). Source sur le graphique.

Le carbone du sol : un petit tour dans l'air... ou pas ?



Carbone résiduel dans le sol des hautes latitudes, en kg par m², si la température franchit le « seuil de réveil » des bactéries contenues dans le sol. Source : P Ciais, en cours de soumission, 2009

Au secours ! Où est le bouton « reset » ?



Source : Climate Change 2001, the scientific Basis, GIEC

Compte tenu de notre connaissance nécessairement partielle des processus, on parle de **risques** de dommages, avec une probabilité plus ou moins élevée, et non de conséquences certaines.

Attention à ne pas confondre conditionnels et futurs simples : tout ce qui est possible n'arrivera pas nécessairement, mais plus nous émettons, et plus le risque est sérieux

Attention aussi à ne pas confondre « ignorance » et « garantie qu'il ne se passera rien » ! **L'ignorance n'est pas une police d'assurance.**

Attention aussi à **ne pas raisonner à capacité de réaction constante** : ce qui fait notre capacité de résistance à l'adversité aujourd'hui, c'est essentiellement l'abondance de l'énergie, et ce qu'il restera de cette abondance dans un siècle est un énorme point d'interrogation