

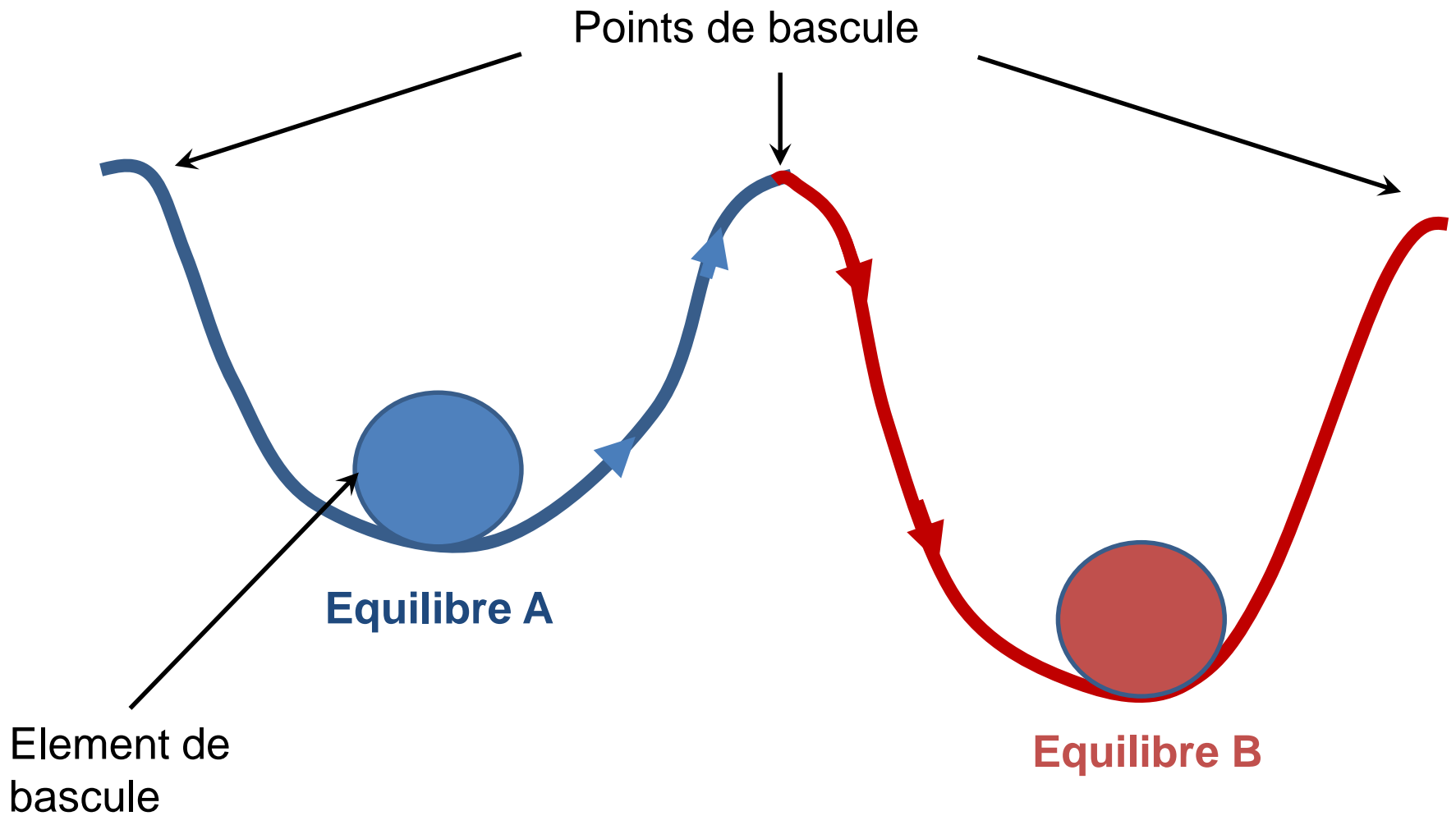
Points de bascule du système climatique

Didier Swingedouw

Qu'est ce qu'un point de bascule ?



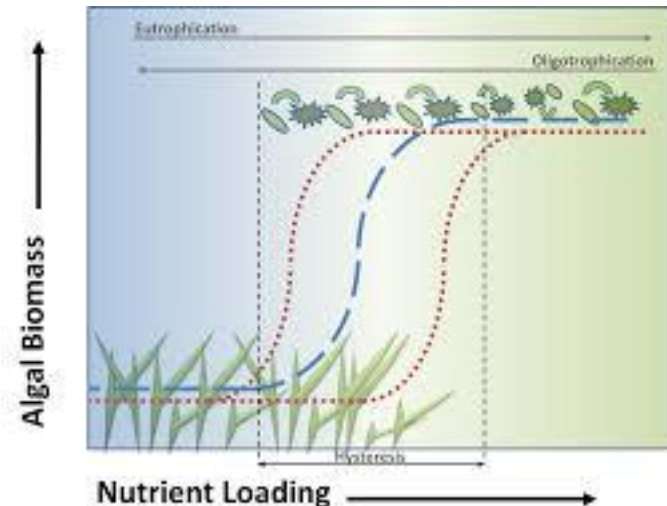
Qu'est ce qu'un point de bascule ?



Lenton et al. (2008) : Le terme “**point de bascule**” se réfère à un seuil critique au delà duquel une petite perturbation peut modifier qualitativement l’état d’un système.

Exemples de systèmes dynamiques

- ❖ Certains lacs aux conditions de forçage très proches peuvent être ou non eutrophisés
- ❖ **Marten Scheffer** a pu expliquer cela grâce à la notion de point de bascule appliqué à cet écosystème particulier
- ❖ Il existe d'autres exemples dans des modèles mathématiques très simples
- ❖ Ces instabilités viennent de l'exemple de **non-linéarité et de rétroactions positives**
- ❖ Ils amènent de **irréversibilités**



Le modèle de Lorenz

Deterministic Nonperiodic Flow¹

EDWARD N. LORENZ

Massachusetts Institute of Technology

(Manuscript received 18 November 1962, in revised form 7 January 1963)

❖ Convection de Rayleigh-Bernard

- $X(t)$ est la vitesse de montée
- $Y(t)$ le gradient de T horizontal
- $Z(t)$ est le gradient de T vertical

$$\begin{cases} \frac{dx(t)}{dt} = \sigma(y(t) - x(t)) \\ \frac{dy(t)}{dt} = \rho x(t) - y(t) - x(t)z(t) \\ \frac{dz(t)}{dt} = x(t)y(t) - \beta z(t) \end{cases}$$

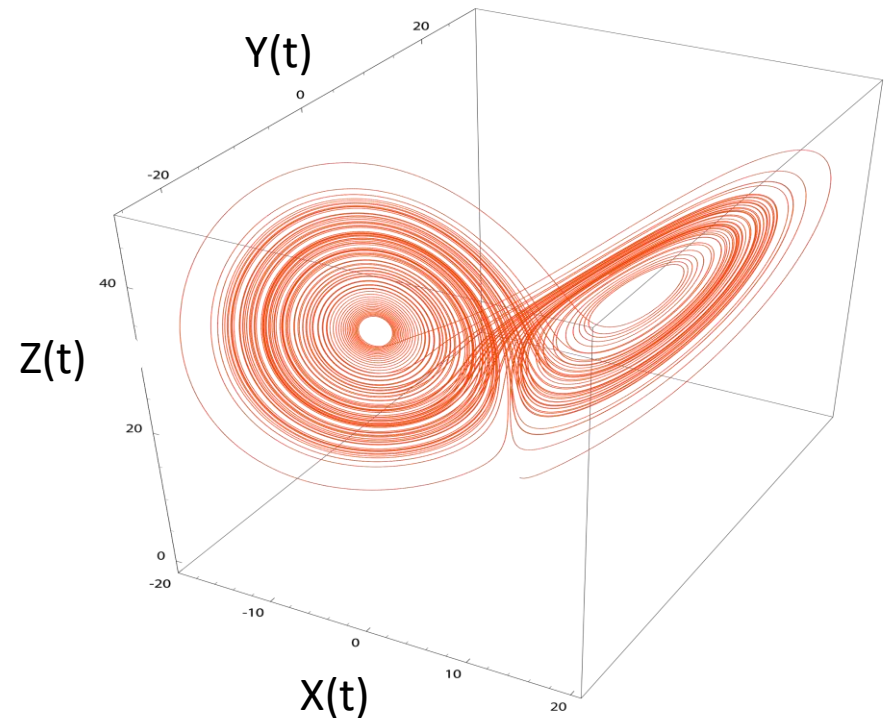
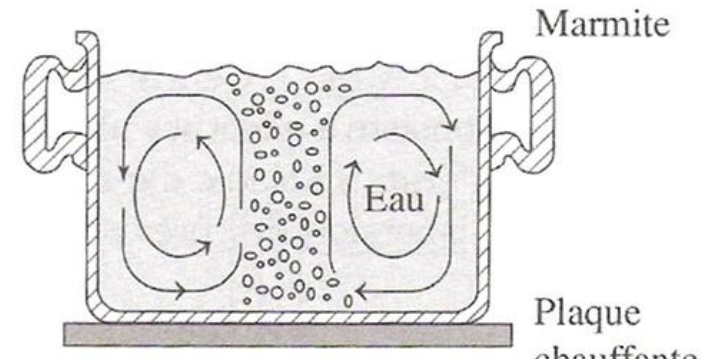
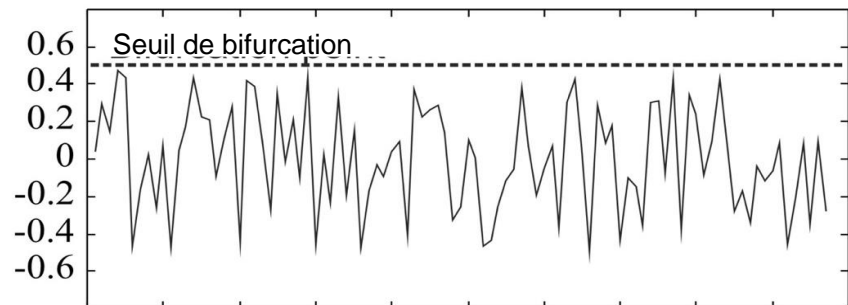
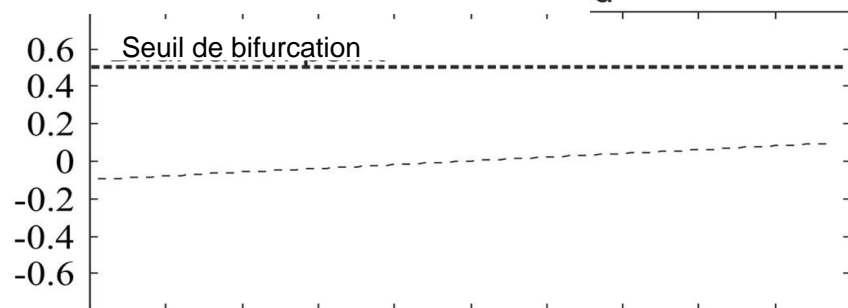


Diagramme de phase

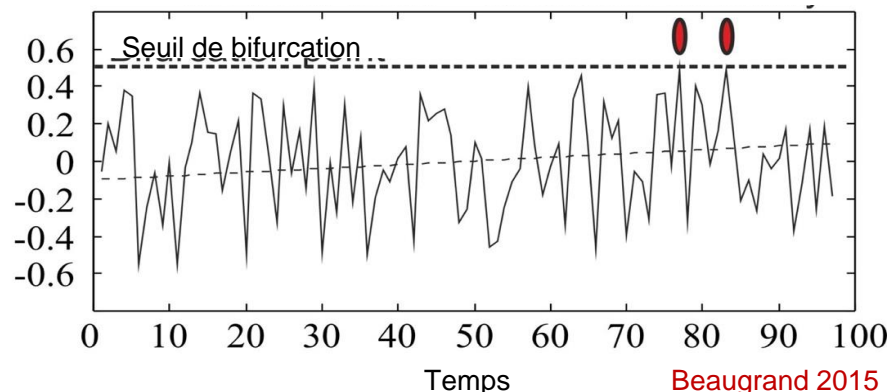
Variabilité stochastique



Tendance linéaire



Tendance linéaire+variabilité stochastique



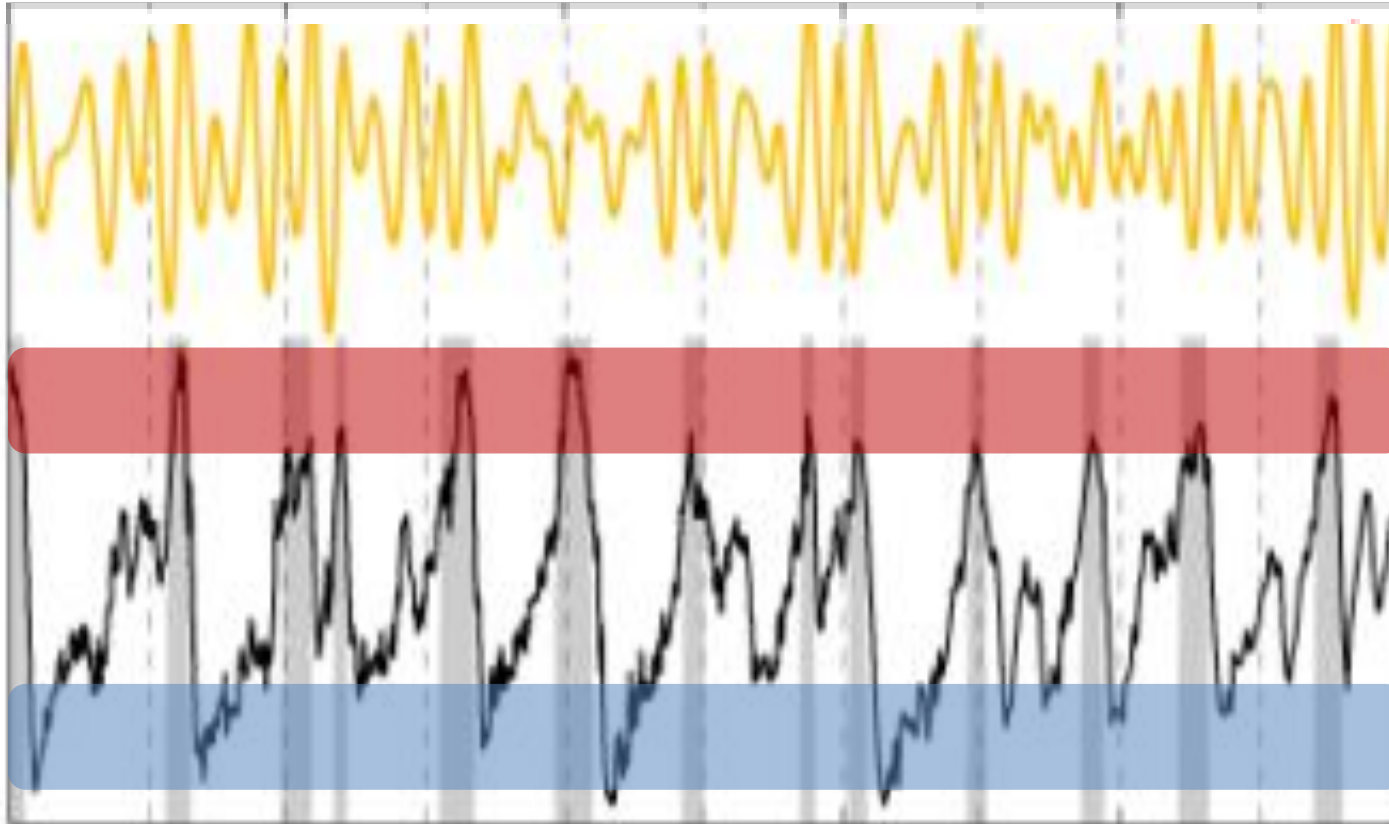
Beaugrand 2015



Notion d'**hystérésis**

Variabilité du système climatique

Aujourd'hui -200 -400 -600 -800 -1000 milliers d'années



Forçage
solaire à 65°N

Chaud

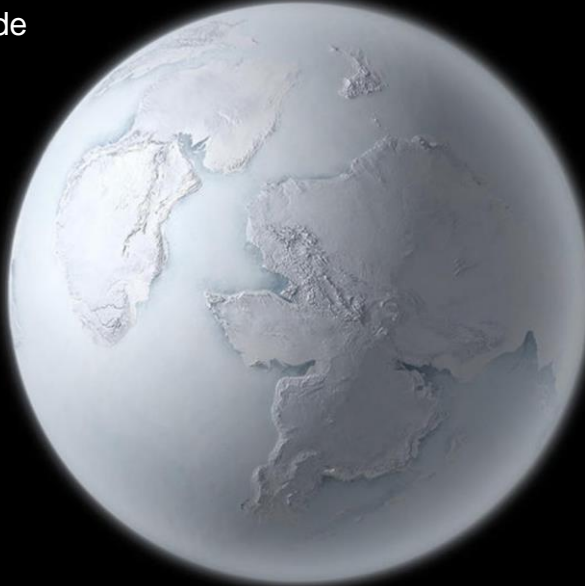
δO^{18} carotte
Antarctique

Froid

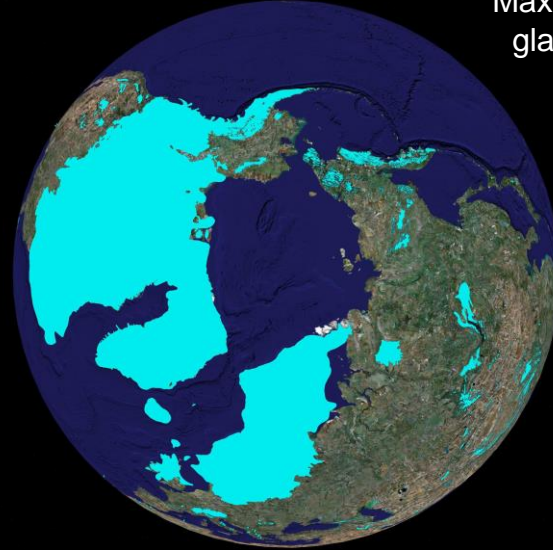


Plusieurs états stables du climat planétaire

Boule de neige



Maximum glaciaire



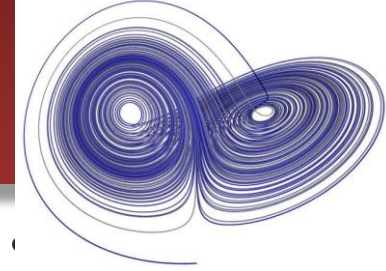
Interglaciaire



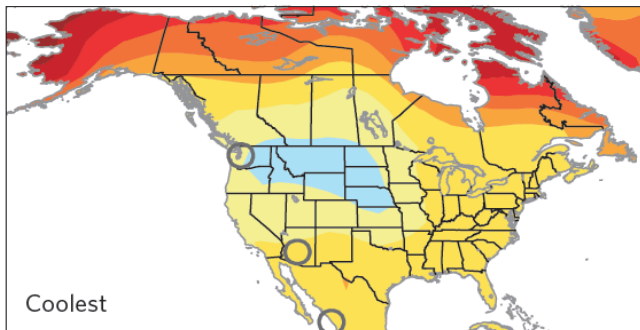
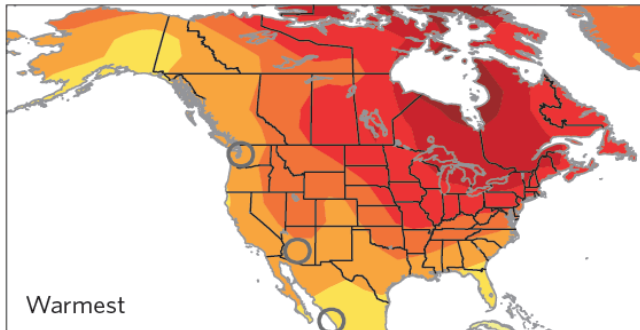
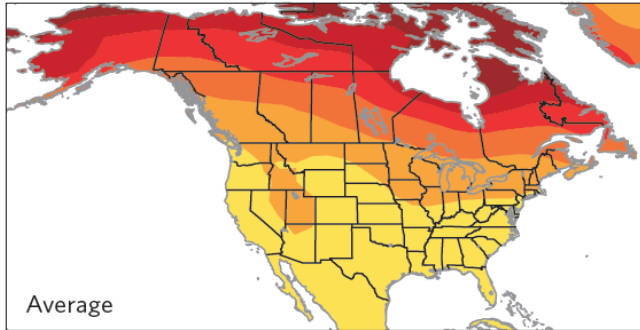
Sans cryosphère



Changement climatique

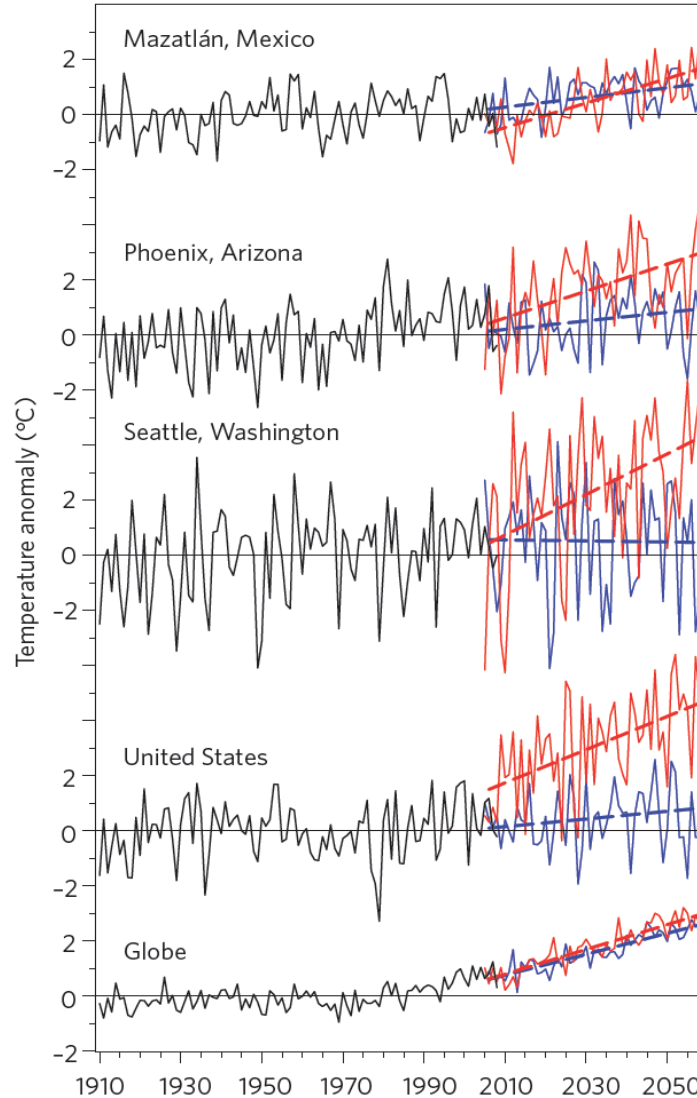


a



Temperature trend (°C per 55 years)

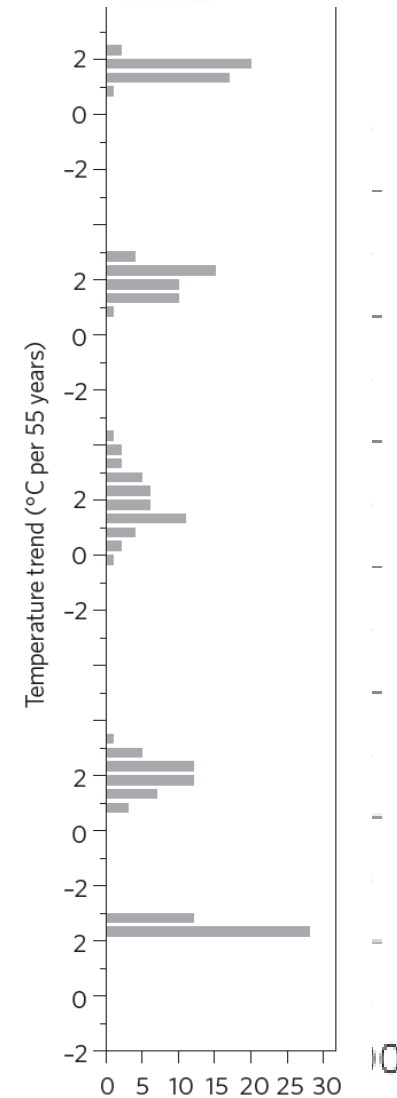
b



Year

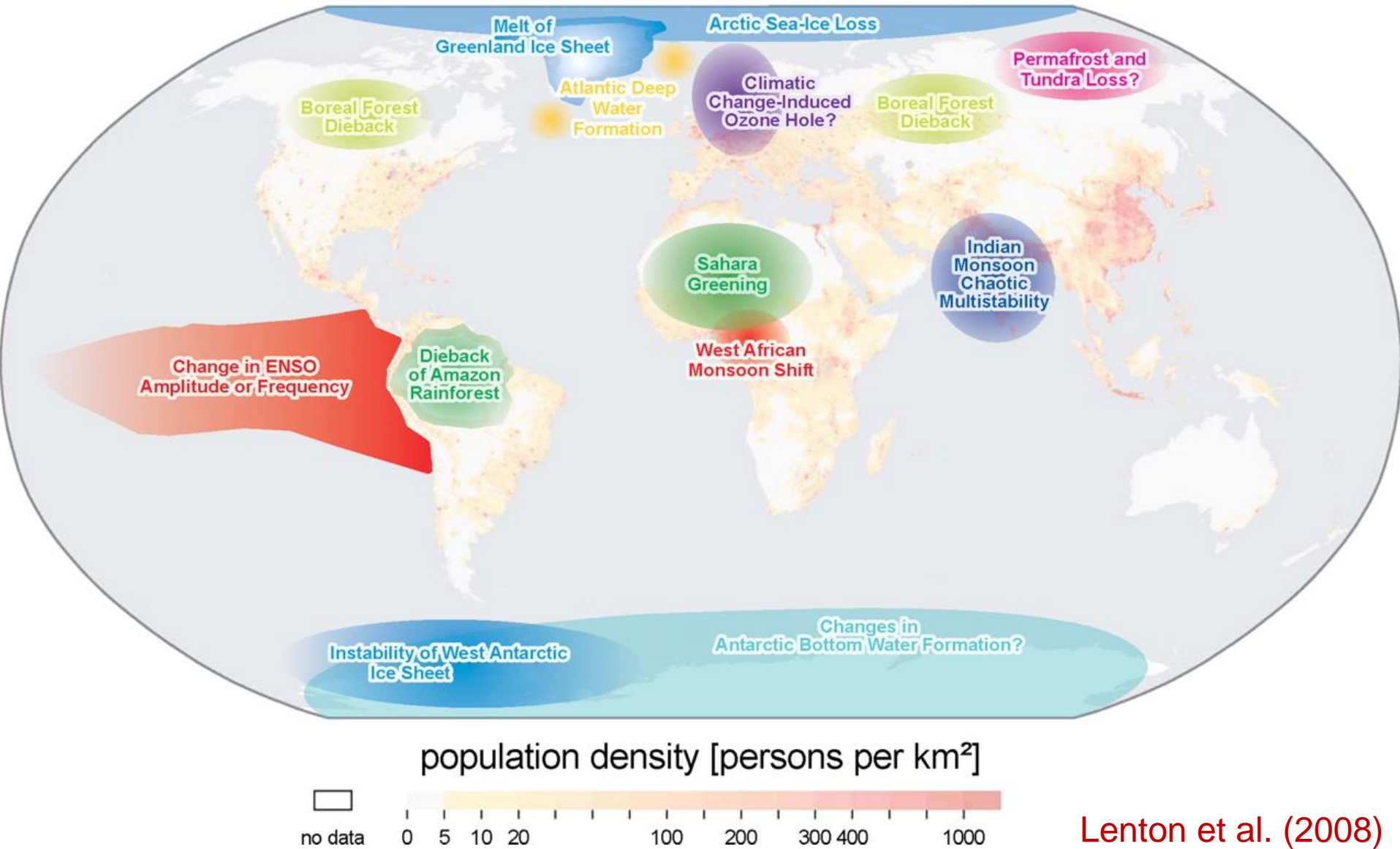
Deser et al. 2012

c



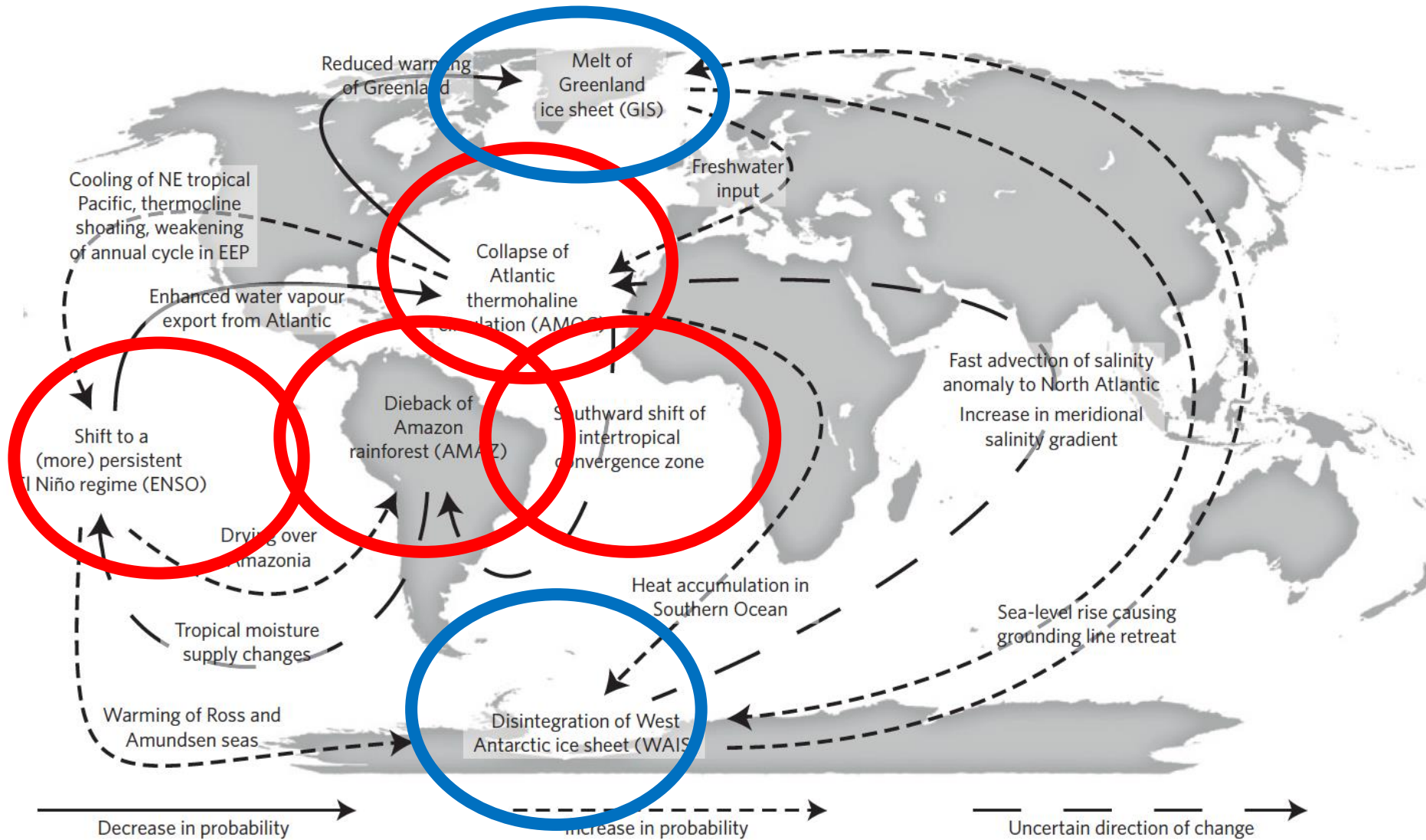
10

Points de bascule du système climatique

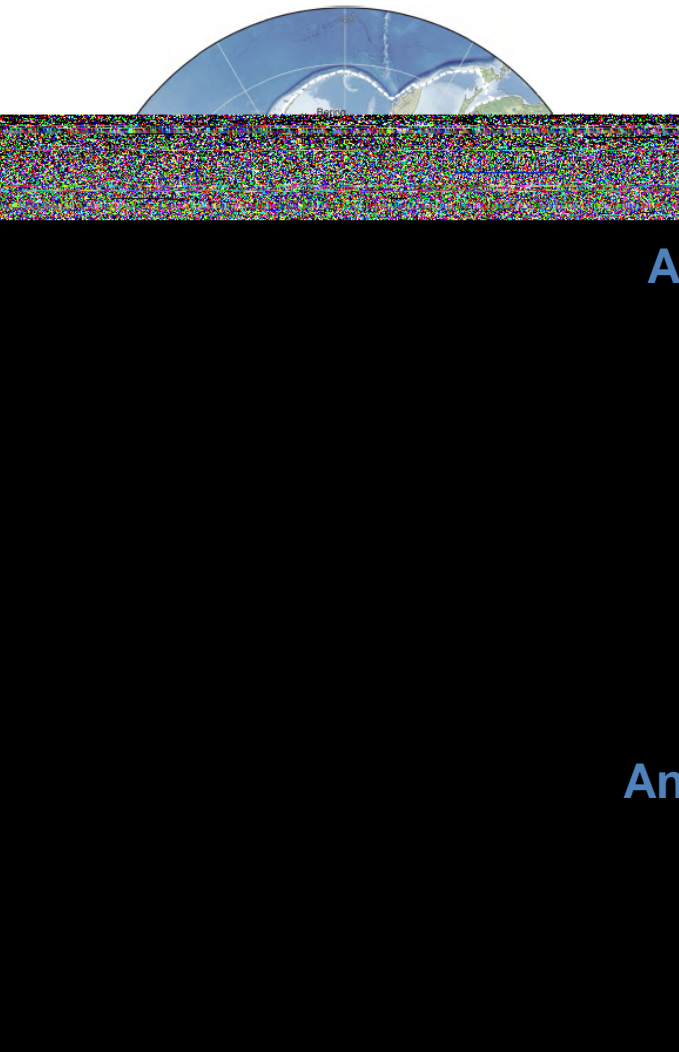


Lenton et al. (2008)

Cascade de points de bascule

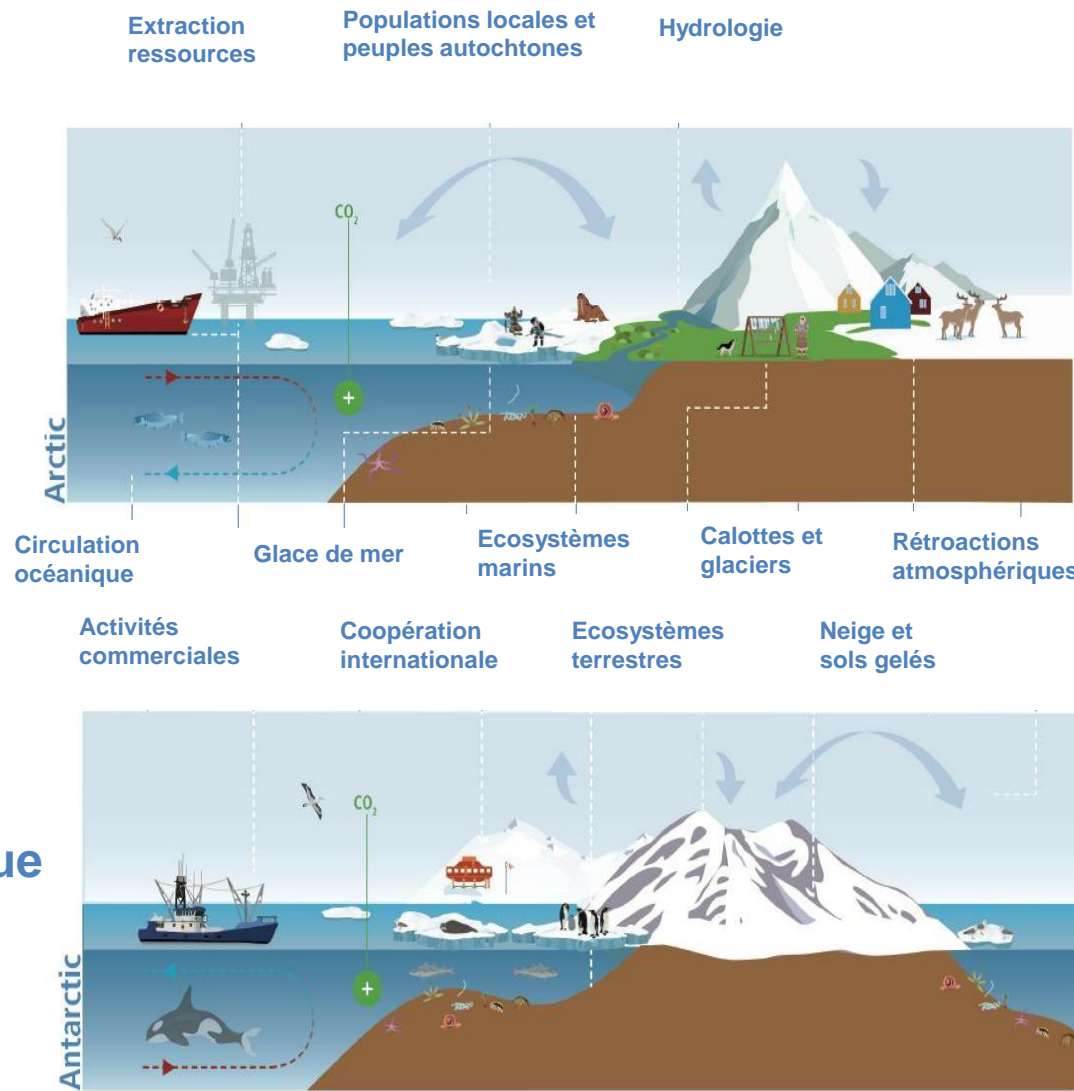


Calottes de glace



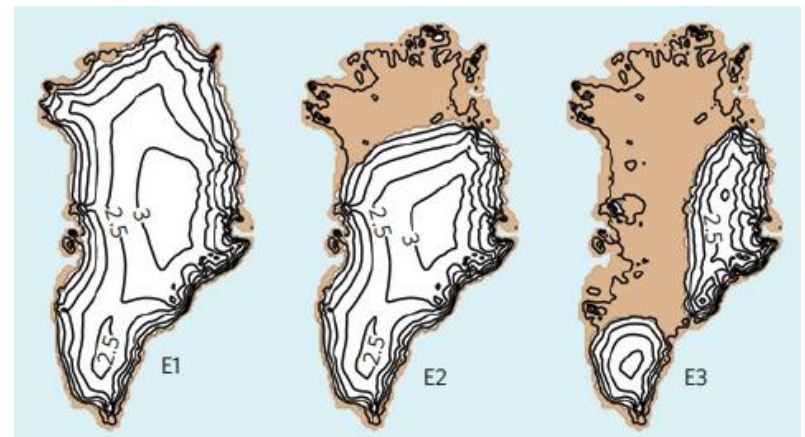
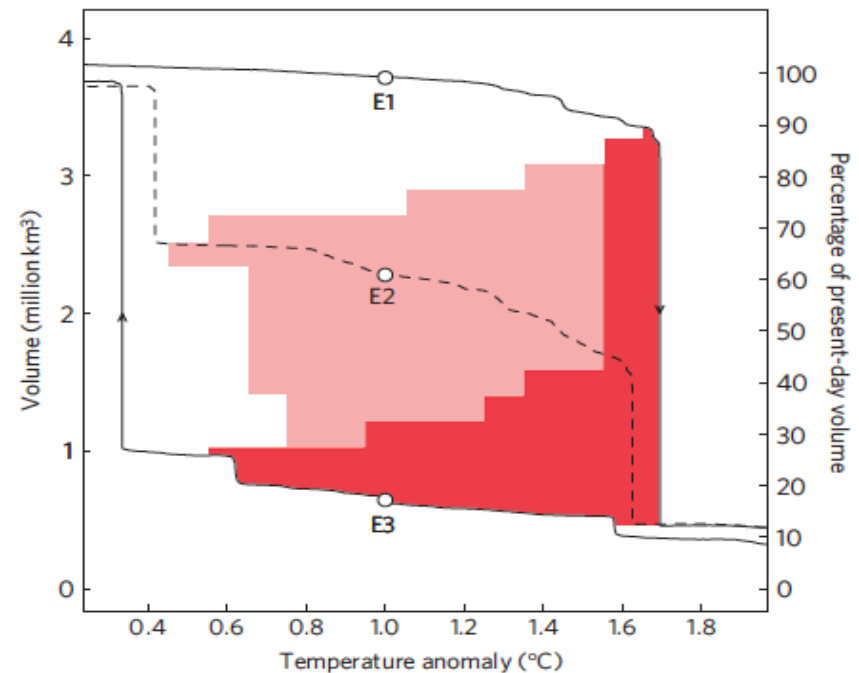
Arctique

Antarctique



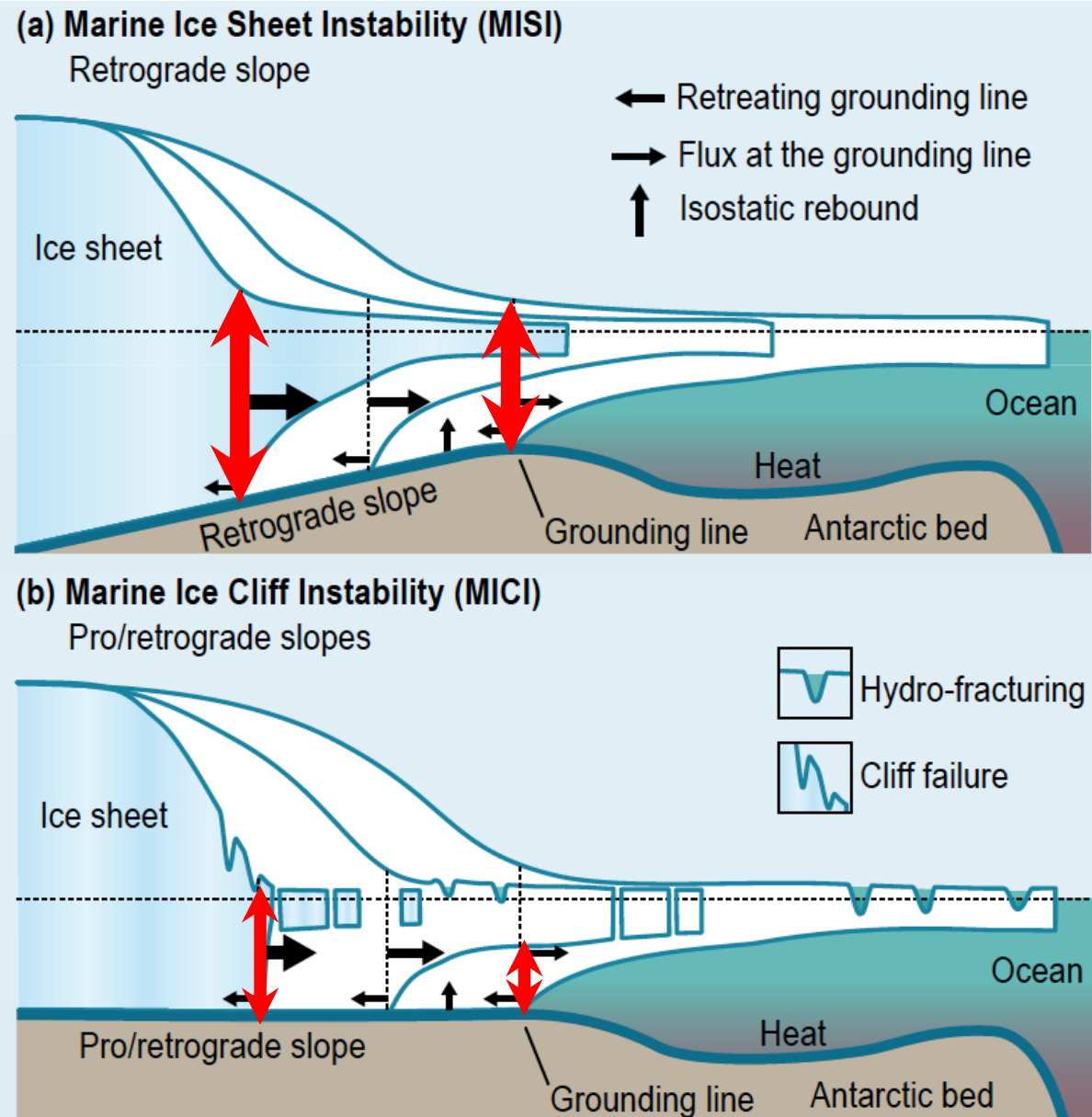
Groenland

- ❖ Accumulation de la neige en altitude
- ❖ Fonte sur les marges en été
- ❖ Vélage iceberg lié à l'écoulement
- ❖ Rétroactions positives en réponse à une augmentation de température estivale:
 - Élévation (moins on est haut, plus il faut chaud)
 - Albedo
- ❖ Plusieurs états stables et un risque de fonte massive dès 2°C de réchauffement
- ❖ Temps de fonte difficile à estimer, mais a priori centaine à milliers d'années.

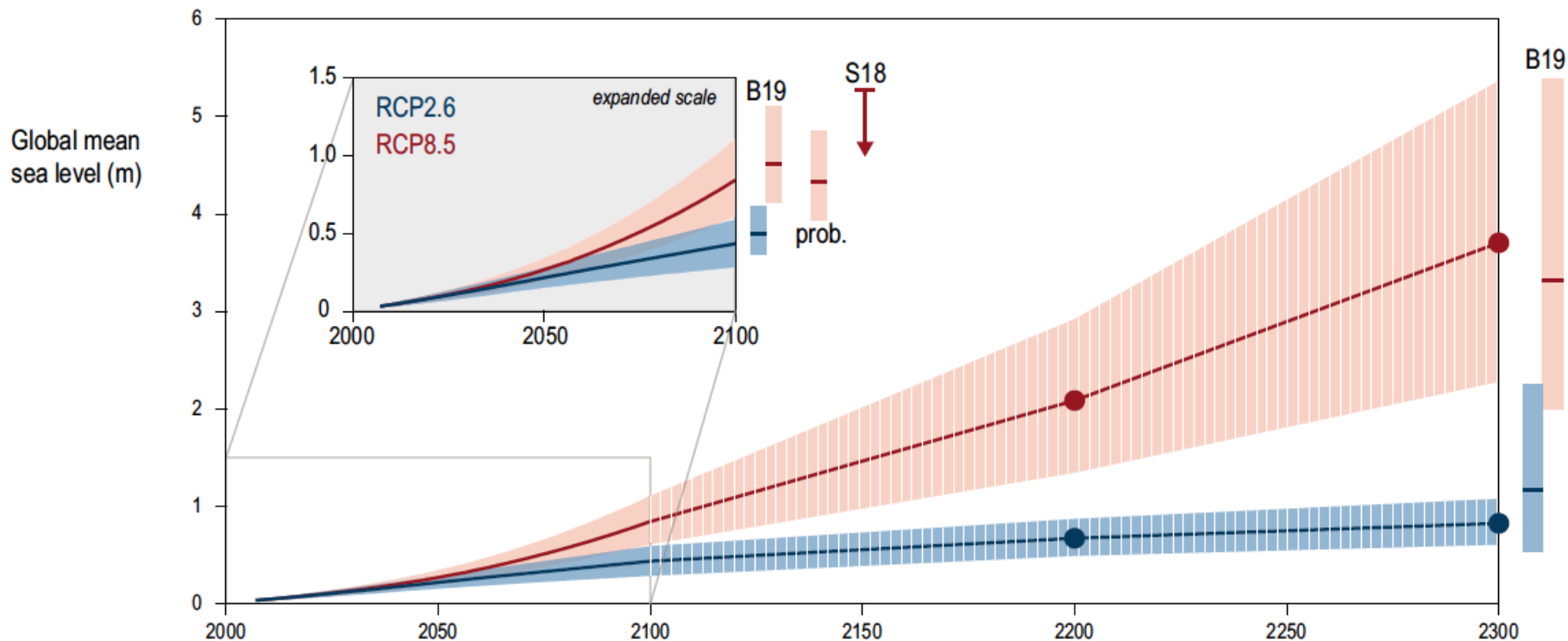


Antarctique

- ❖ Accumulation quasiment partout
- ❖ Perte masse principalement par vélage iceberg lié à l'écoulement
- ❖ Fonte basale importante
- ❖ Rétroactions positives :
 - Instabilité des calottes marimes (posé sous le niveau marin)
 - Instabilité liée aux falaises de glace

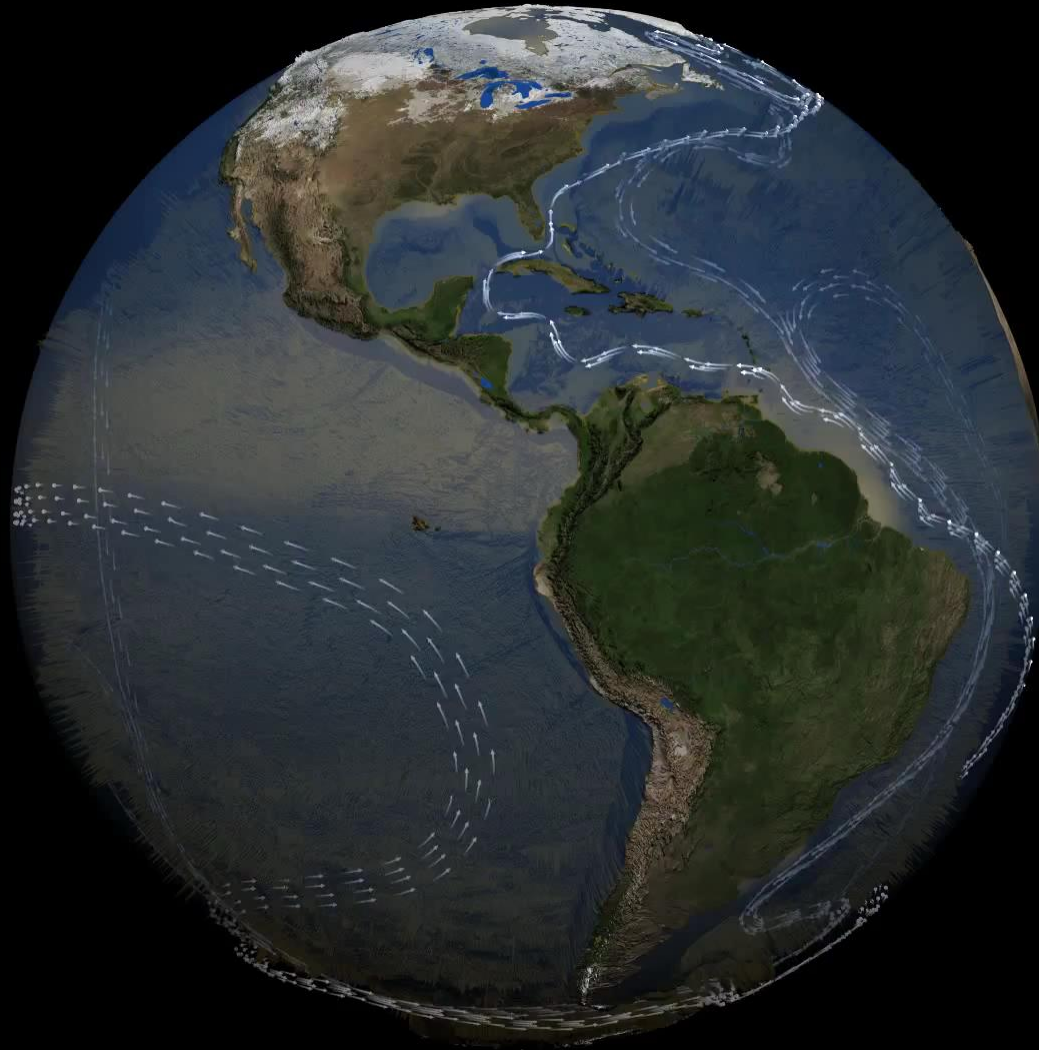


Impact sur le niveau marin



- Plus de 600 millions d'habitants vivent sur des littoraux peu élevés
- De nombreuses villes très vulnérables (New York, Alexandrie, Miami...)

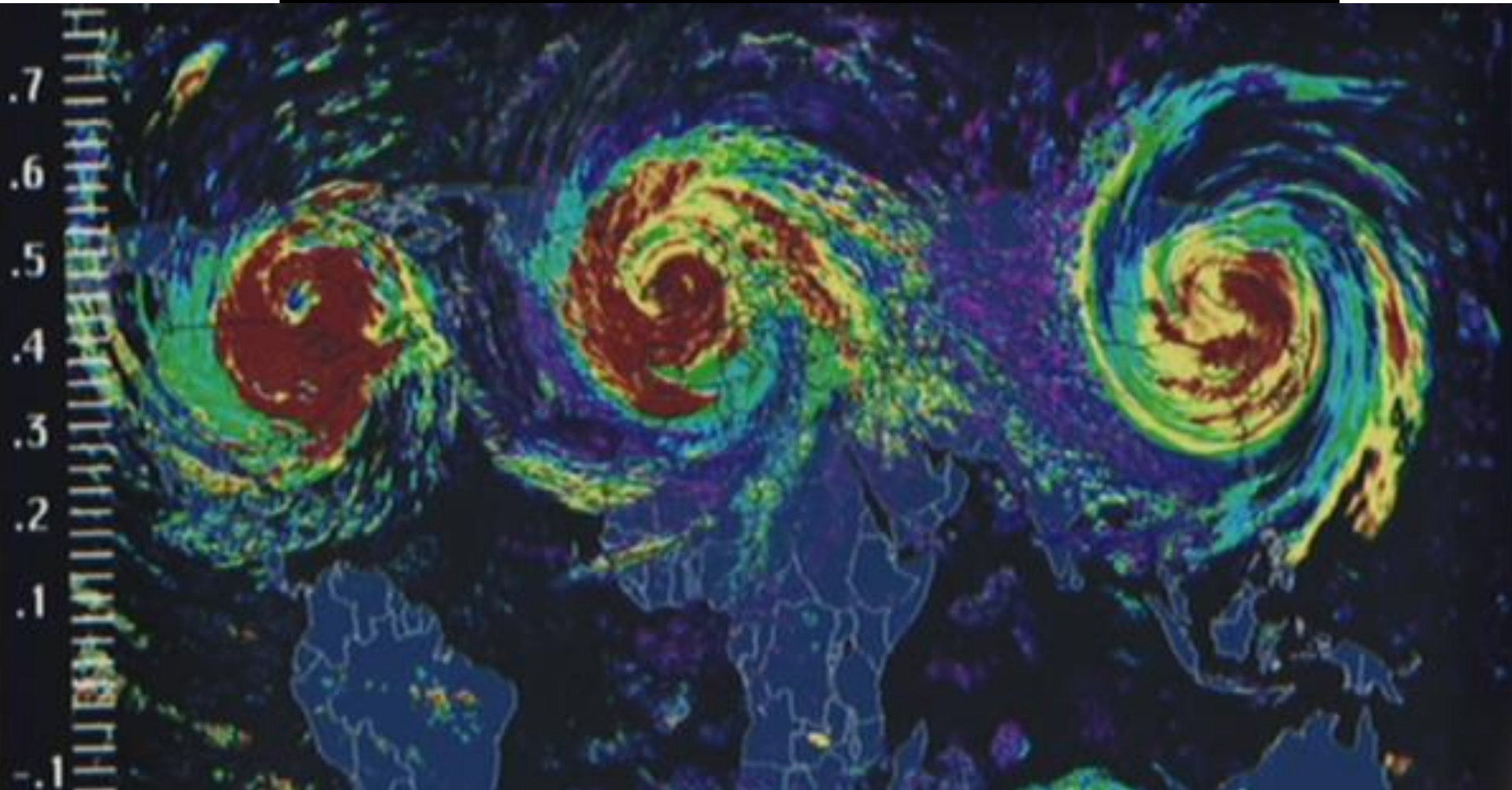
Circulation de retournement en Atlantique Nord



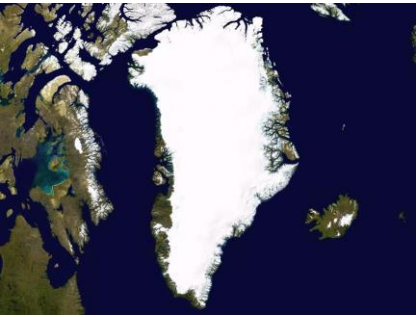
Un coup de froid sur l'Atlantique Nord ?

« L'art de la prophétie est extrêmement difficile surtout en ce qui concerne l'avenir »

Mark Twain



Variabilité climatique rapide



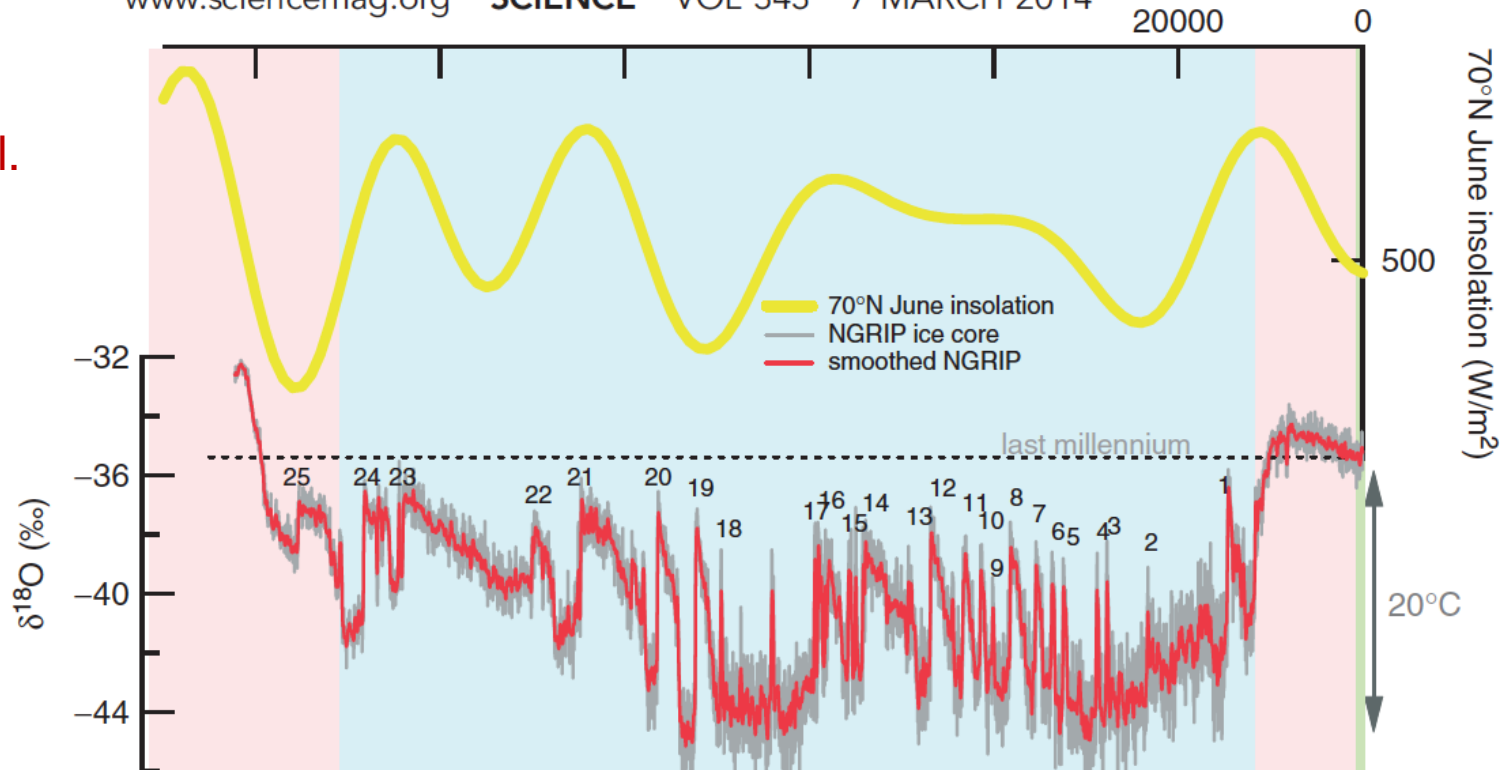
Rapid Reductions in North Atlantic Deep Water During the Peak of the Last Interglacial Period

Eirik Vinje Galaasen,^{1*} Ulysses S. Ninnemann,^{1,2} Nil Irvani,² Helga (Kikki) F. Kleiven,^{1,2} Yair Rosenthal,³ Catherine Kissel,⁴ David A. Hodell⁵



(a)

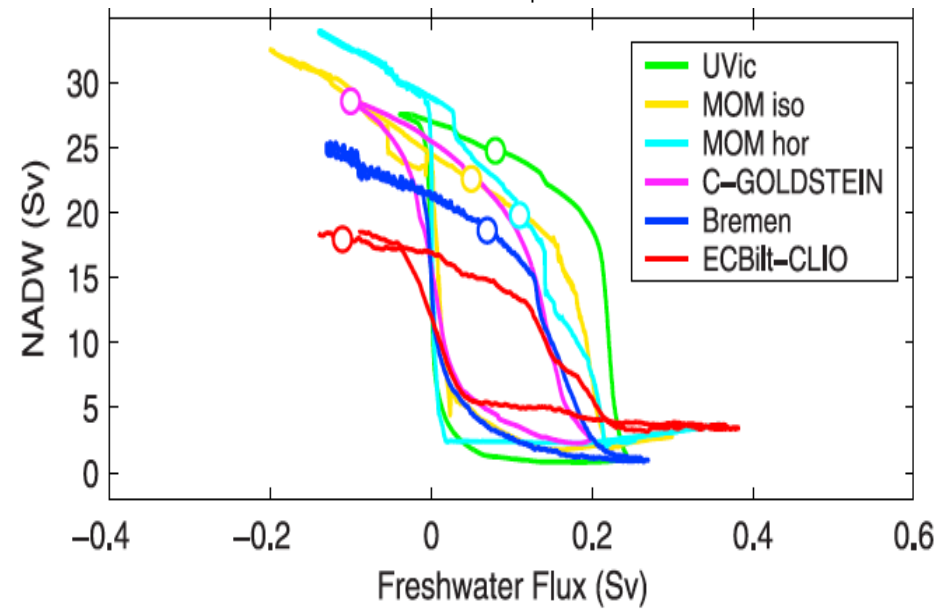
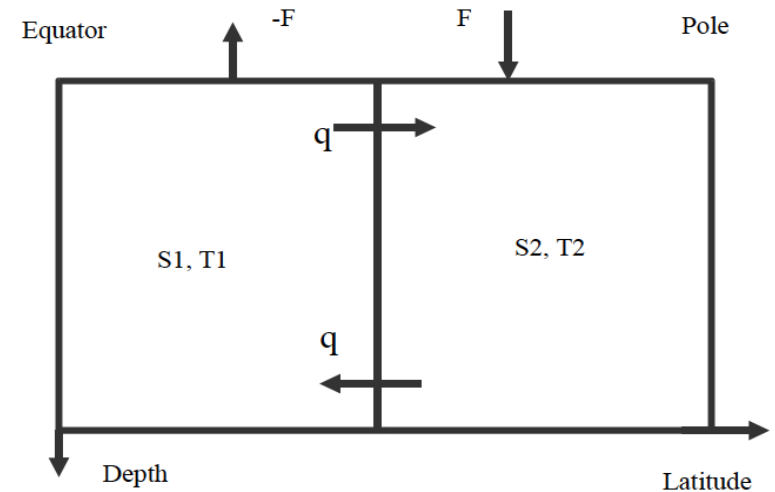
www.sciencemag.org SCIENCE VOL 343 7 MARCH 2014



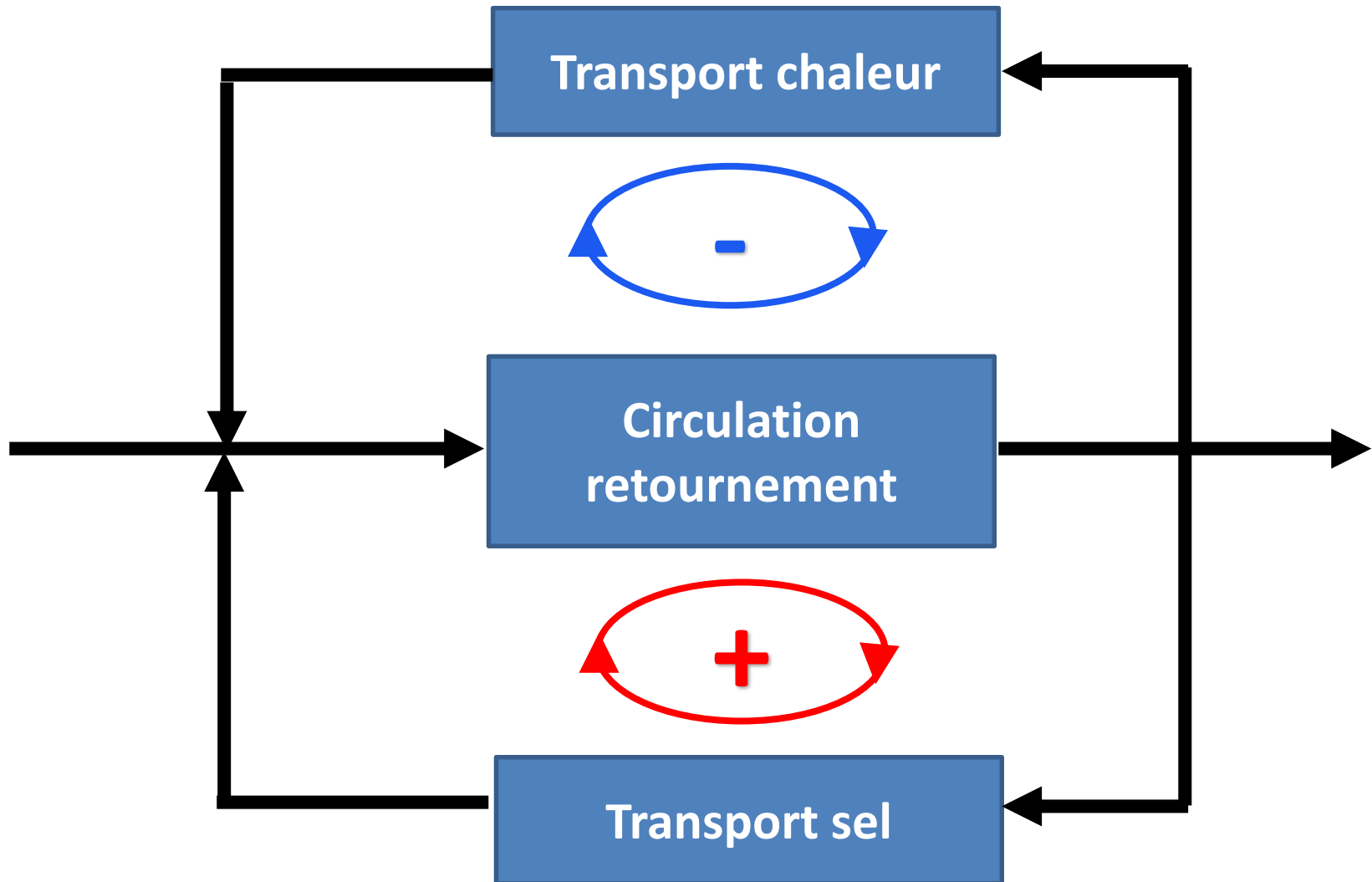
Masson-Delmotte et al. 2012

Non linéarité de la circulation océanique

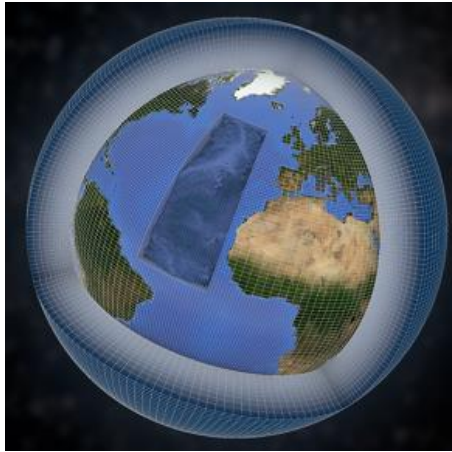
- ❖ Modèle de **Stommel (1961)**
- ❖ Transport de volume entre l'équateur et un pôle proportionnel au gradient de densité
- ❖ Bilan de salinité amène à une équation non-linéaire en transport
- ❖ 2 solutions possibles pour un même forçage en eau douce
- ❖ Vrai dans des modèles de climat plus complexes (**Rahmstorf et al. 2005**, **Hawkins 2011**, ...)



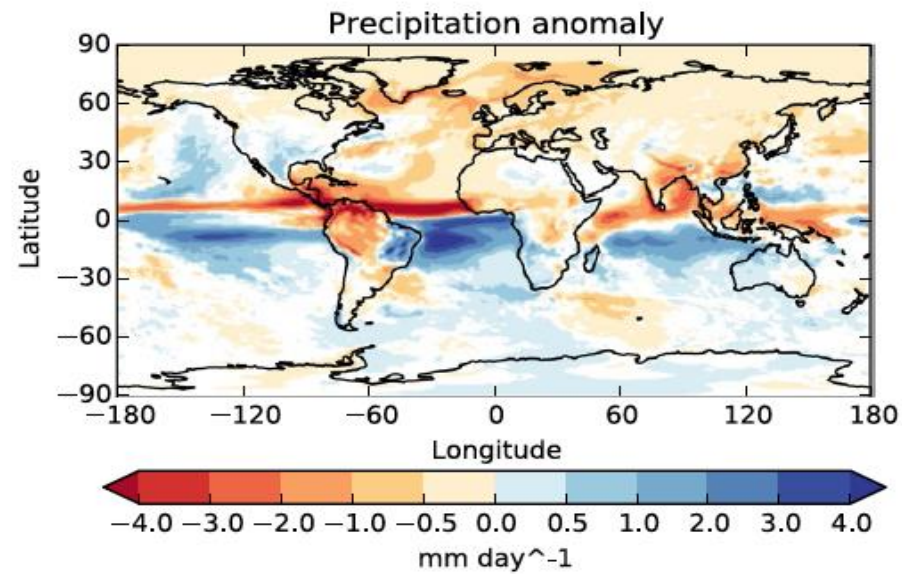
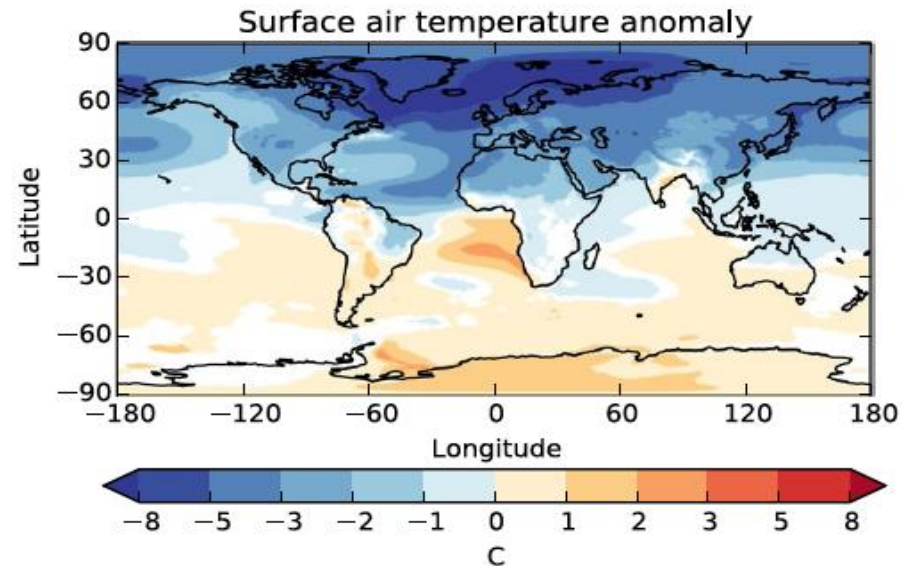
Rétroaction positive



Impact climatique



- ❖ La fonte du Groenland peut avoir un effet climatique conséquent ([Swingedouw et al. 2007](#))
- ❖ Diminution du réchauffement localement (mais dépend du modèle)
- ❖ Migration des zones de précipitations au niveaux des tropiques
- ❖ Reste vrai dans un modèle haute résolution ([Jackson et al. 2015](#))

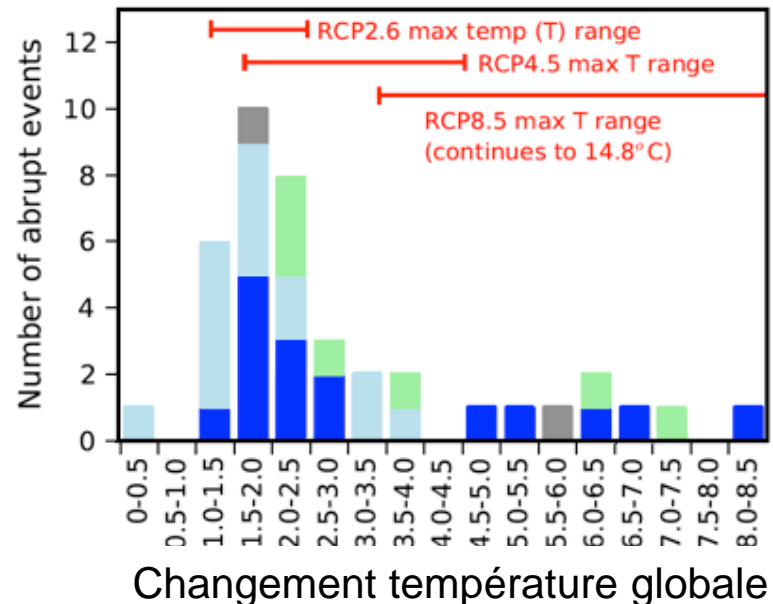
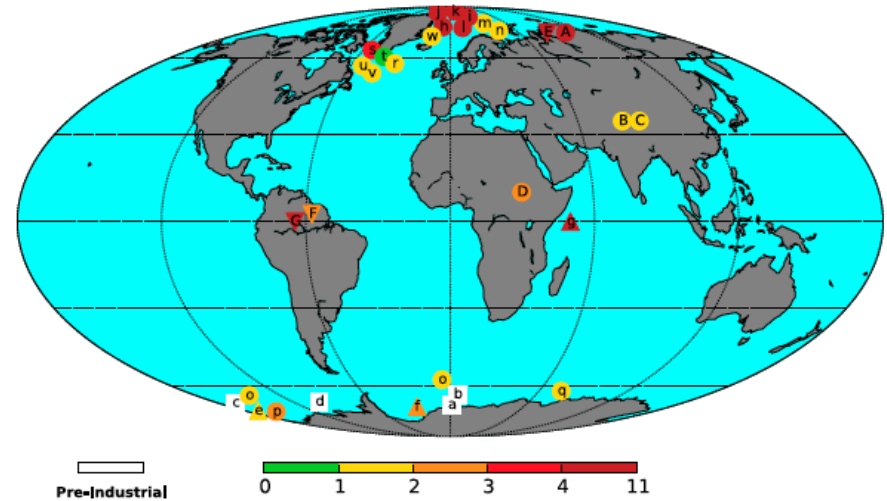


De la possibilité de changements abrupts



EMBRACE

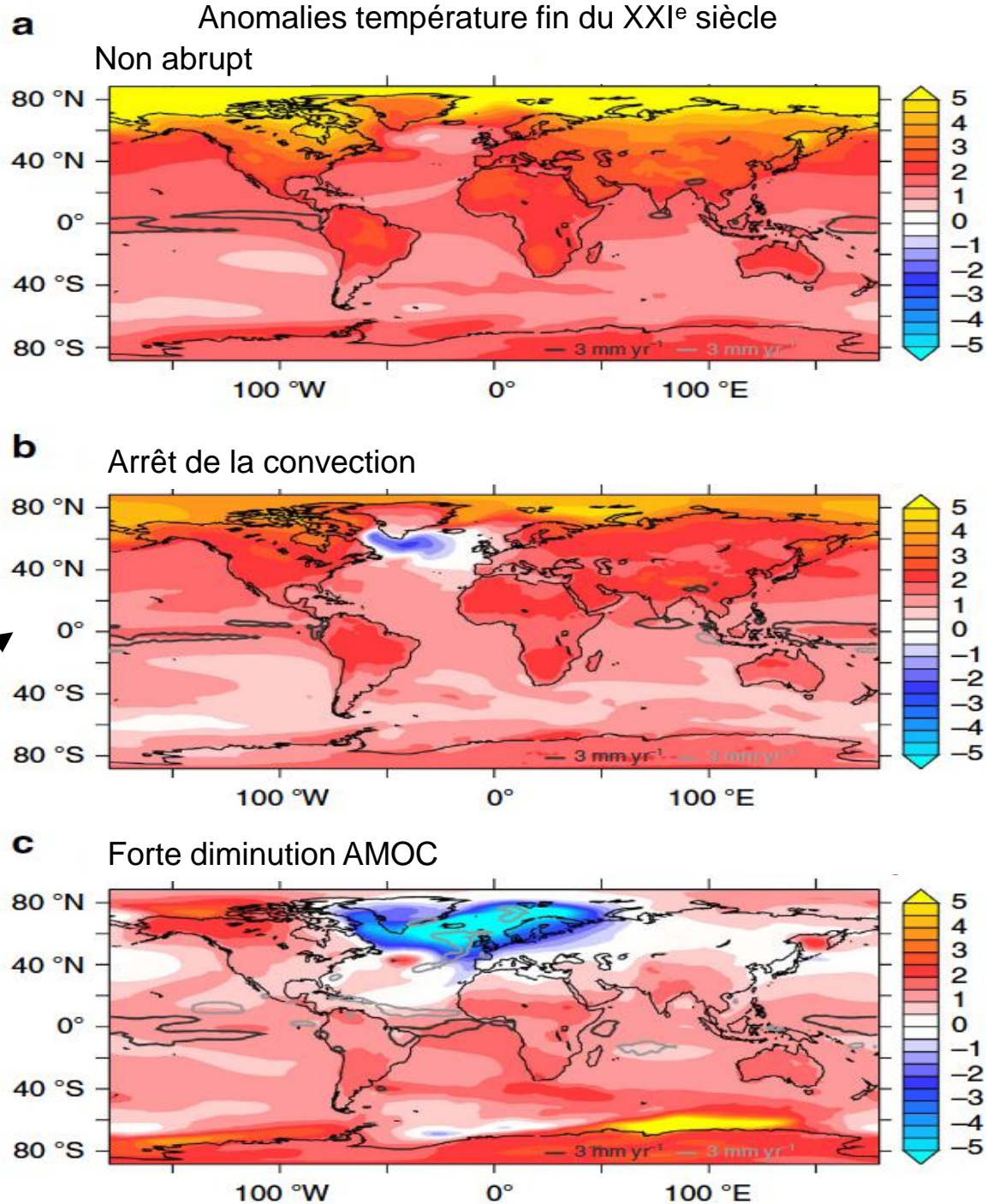
- ❖ Nous avons scanné la base de données CMIP5 à la recherche de variations brutales (Drijfhout et al., *PNAS* 2015)
- ❖ Critère de recherche : tendance linéaire sur 10 ans > 4 écarts type de la distribution des tendances de 10 ans de la simulation préindustrielle
- ❖ **39 événements abrupts (présent dans 36% des simulations)**



Banquise
Océan
Végétation
Pergélisol

Evenements abrupts en Atlantique

- ❖ Dans certains modèles, la réponse en Atlantique Nord influence fortement la réponse à l'échelle régionale autour de cette zone, et dans une moindre mesure l'échelle globale
- ❖ Deux types d'instabilités :
 - Gyre subpolaire
 - Circulation de retournement
- ❖ Incertitude régionale du changement climatique comme un challenge majeur de la climatologie actuelle

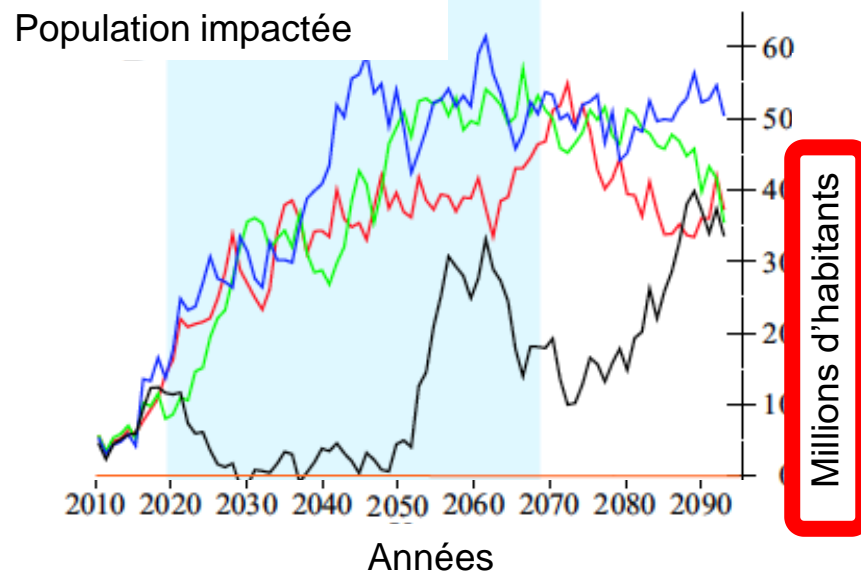
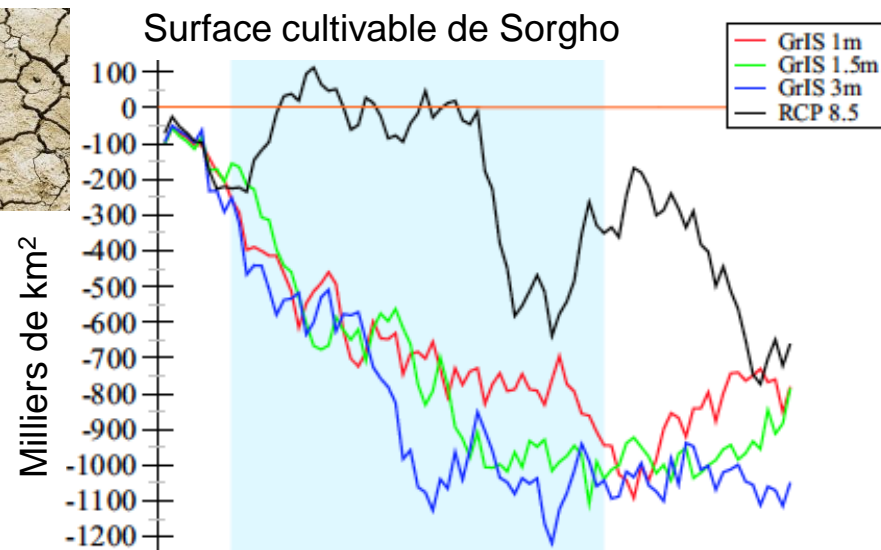
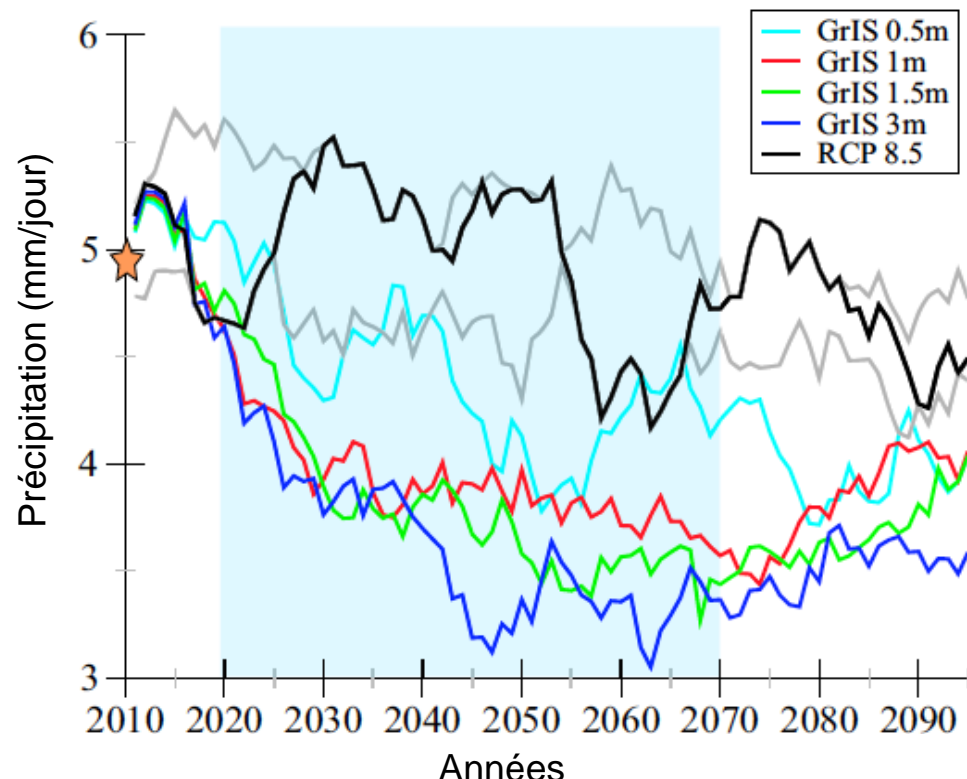


Impact sur la zone sahélienne

Scénario extrême avec forte fonte calotte groenlandaise (DeFrance et al. PNAS 2017) avec **arrêt circulation** **retournement retournement**



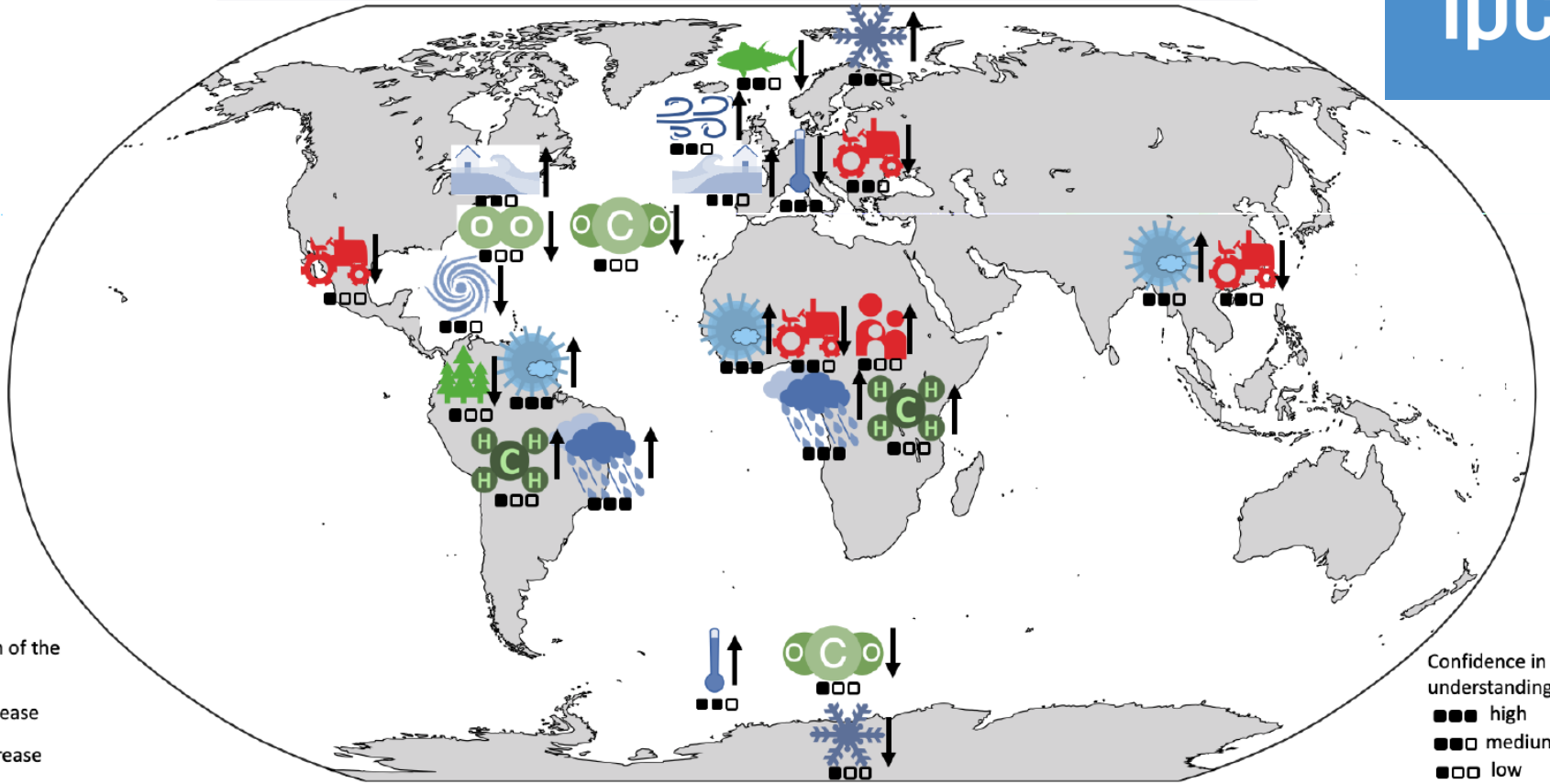
Changement pluie au Sahel



Impacts globaux arrêt circulation retournement

Peu probable (mais gros impact...)

ipcc



Direction of the change
 ↑ increase
 ↓ decrease

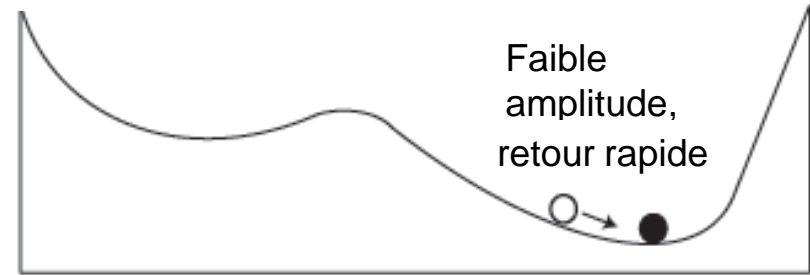
Confidence in process understanding
 ■■■ high
 ■■■ medium
 ■■■ low

Physical system Sea-level rise Droughts Cyclones frequency Temperature trend Precipitation and flooding Storminess Sea ice and snow		Biological system Vegetation Marine ecosystems Oxygenation Oceanic carbon and acidification Wetland methane		Human systems Agriculture and food production Migration pressure due to degradation in livelihoods	
---	--	---	--	---	--

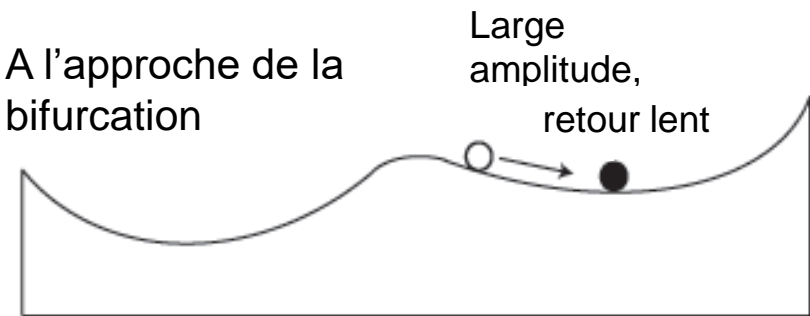
Anticiper les points de bascule

- ❖ A l'approche d'un point de bascule, les systèmes concernés deviennent plus instables
- ❖ En conséquence les variations autour de leurs états moyens sont plus lentes et ont plus d'amplitudes
- ❖ Ce type de comportement, et le changement de variabilité associée, peut servir de **système d'alerte précoce**

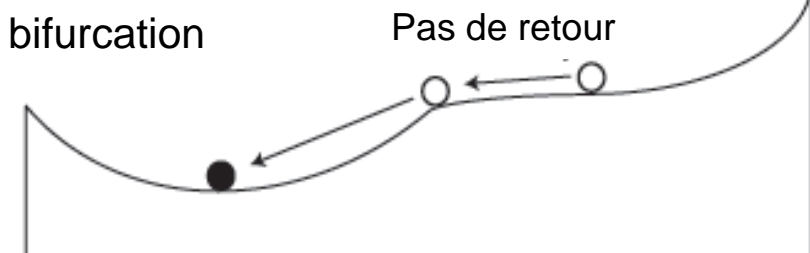
Loin d'une bifurcation



A l'approche de la bifurcation

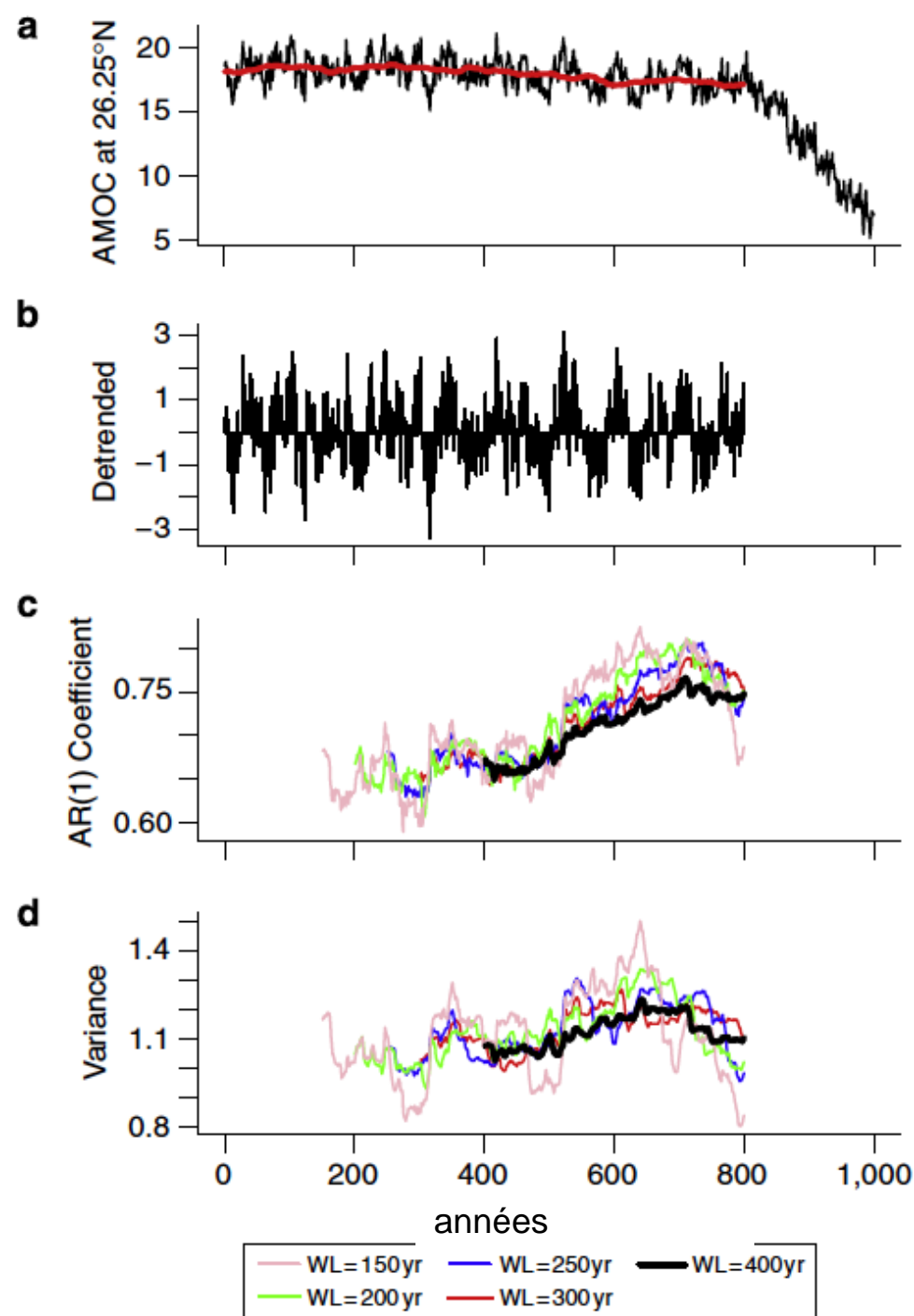


Point de bifurcation



Système d'alertes

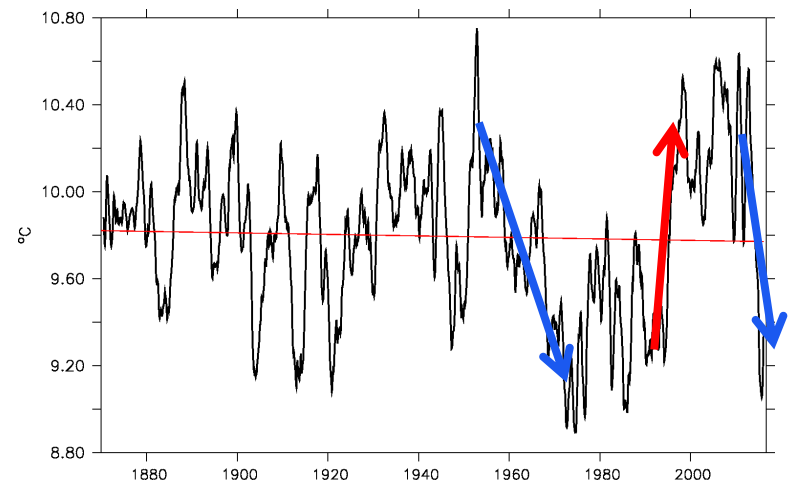
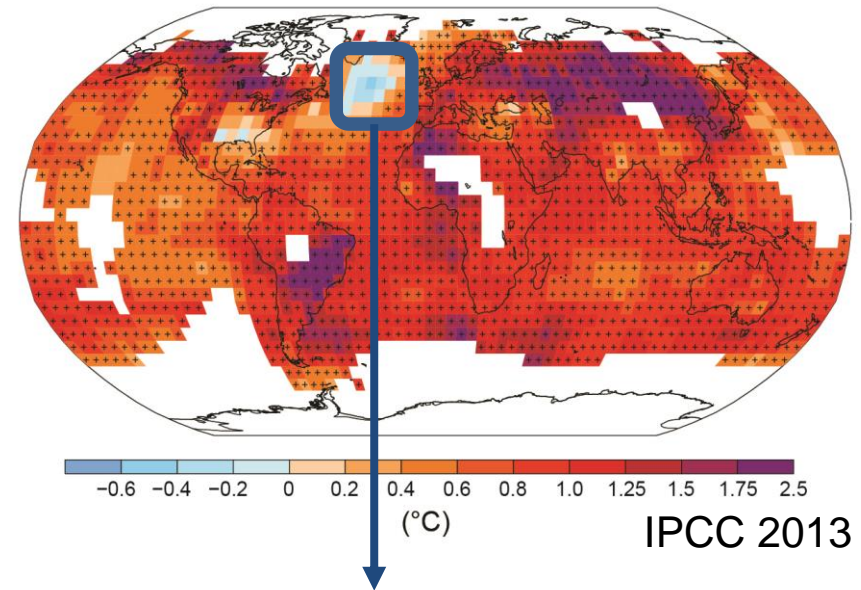
- ❖ **Boulton et al. (2014)**: On peut en effet détecter un point de rupture pour l'AMOC jusque 250 ans en avance
- ❖ Mais pour cela il faut connaître plusieurs centaines d'années de variabilité de l'AMOC
- ❖ Avec 15 ans de mesures, on est loin du compte....
- ❖ Besoin de reconstruire les variations passées de l'AMOC



Un climat qui se réchauffe partout ?

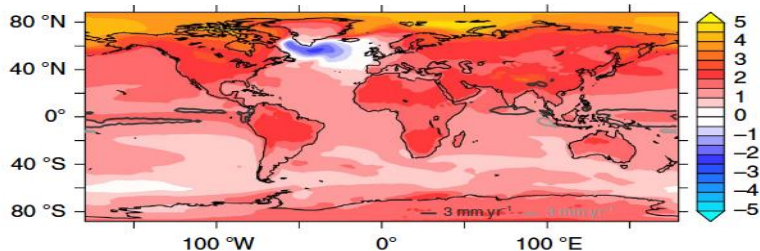
- ❖ La plupart des régions se réchauffent très clairement
- ❖ L'Atlantique fait figure d'exception et voit même un léger refroidissement sur le siècle passé
- ❖ Cette tendance négative est surtout marquée par de grandes variations :
 - Un refroidissement important dans les années 1960 et 1970
 - Un réchauffement rapide en 1995
 - Un refroidissement rapide vers 2010

Tendance (1901-2012) de température de surface (HadCRUT4)

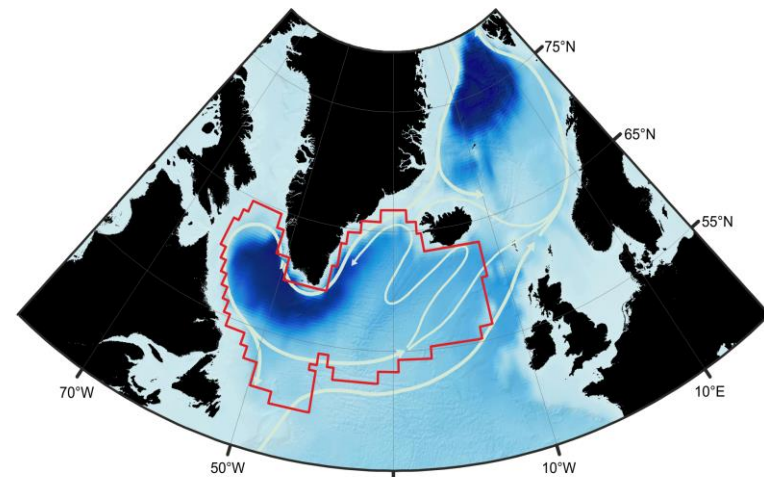


De la possibilité de changements abrupts

b Arrêt de la convection

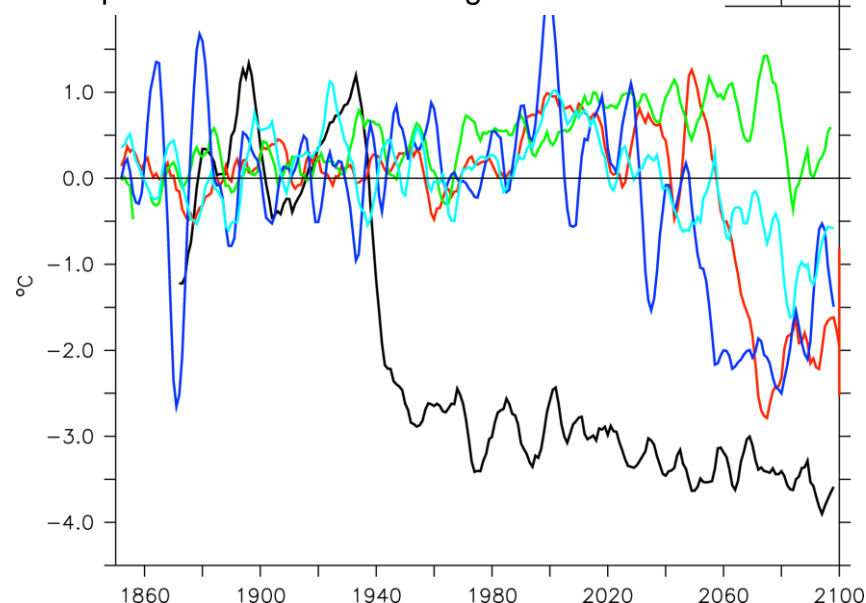


- ❖ Nous nous sommes focalisés sur la gyre subpolaire de l'Atlantique Nord (Sgubin et al., *Nat. Com.*, 2017)
- ❖ Nous avons trouvé de nombreux cas de refroidissement brutaux (2-3°C en moins de 10 ans !) dans les modèles



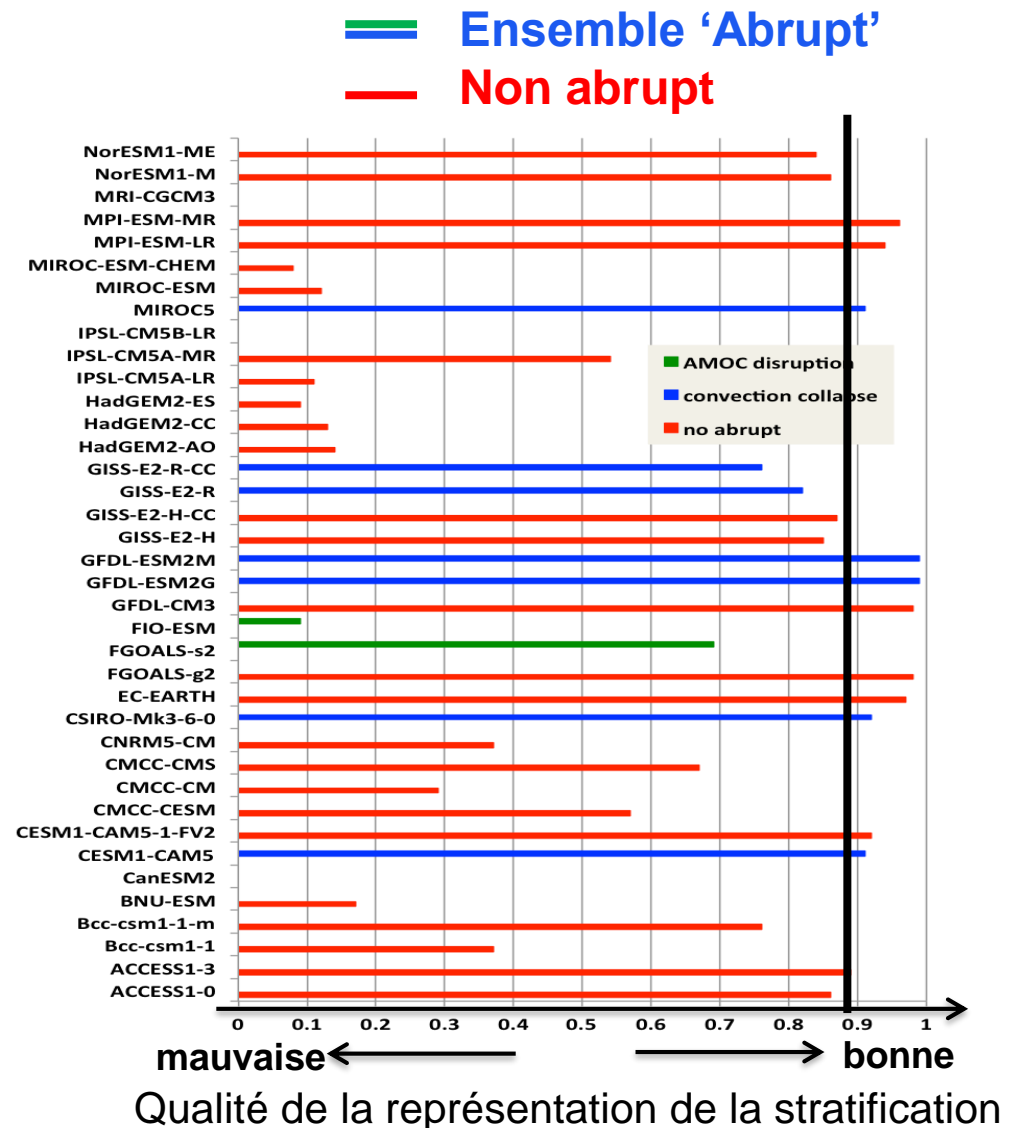
— MIROC5 — CSIRO-Mk360 — GFDL-ESM2G — CESM1-CAM5 — GISS-E2-R

Température dans la boîte rouge



De la possibilité de changements abrupts

- ❖ Si l'on considère tous les modèles à égalité, il y a **17% de chance d'avoir un tel changement dans le siècle à venir**
- ❖ On utilise la stratification en Atlantique Nord comme contrainte émergente
- ❖ Si on sélectionne les **11 meilleurs** modèles vis-à-vis de cette contrainte, le **risque monte à 45%**



Prévoir le climat

Conditions Initiales



Forçages externes

Météo

Prévis
saisonniers

Prévis
décennales

Projections
centennales

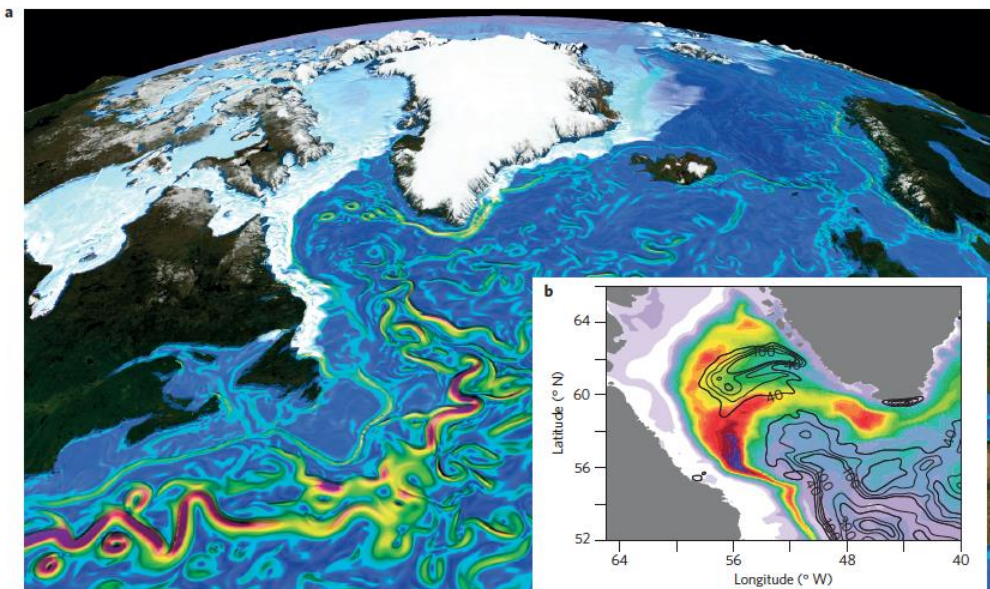
Cycles
glaciaire-
interglaciaire

jour semaine mois année décennie siècle millénaire

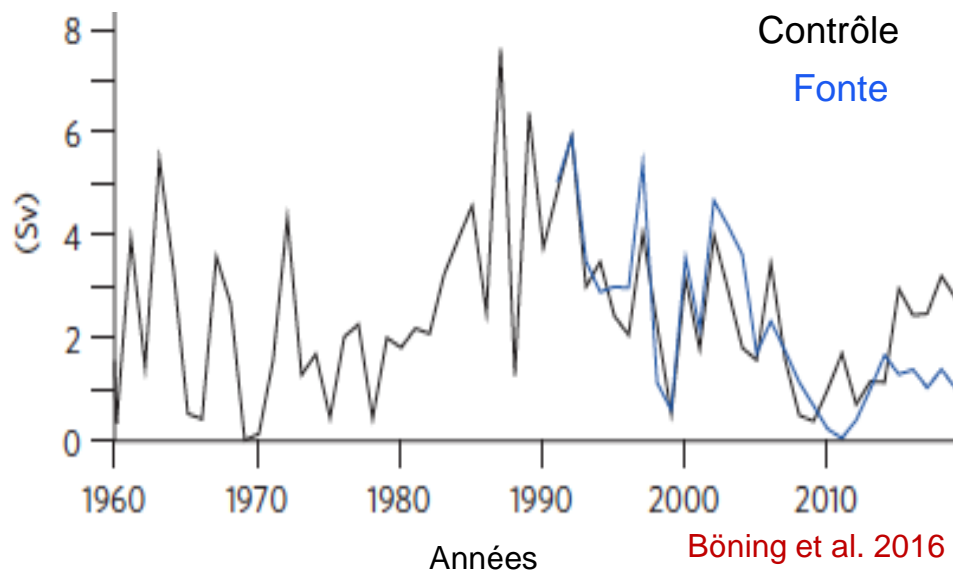
Echelle de temps

Inclure l'eau douce dans les prévisions décennales

- ❖ La fonte du Groenland affecte déjà la mer du Labrador (Böning et al. 2016)
- ❖ Inclusion de cette fonte passée et future dans le nouveau système de prévision décennale IPSL-EPOC dans des simulations rétrospectives et futures.



Formation eaux profondes en mer du Labrador



Böning et al. 2016

Conclusions

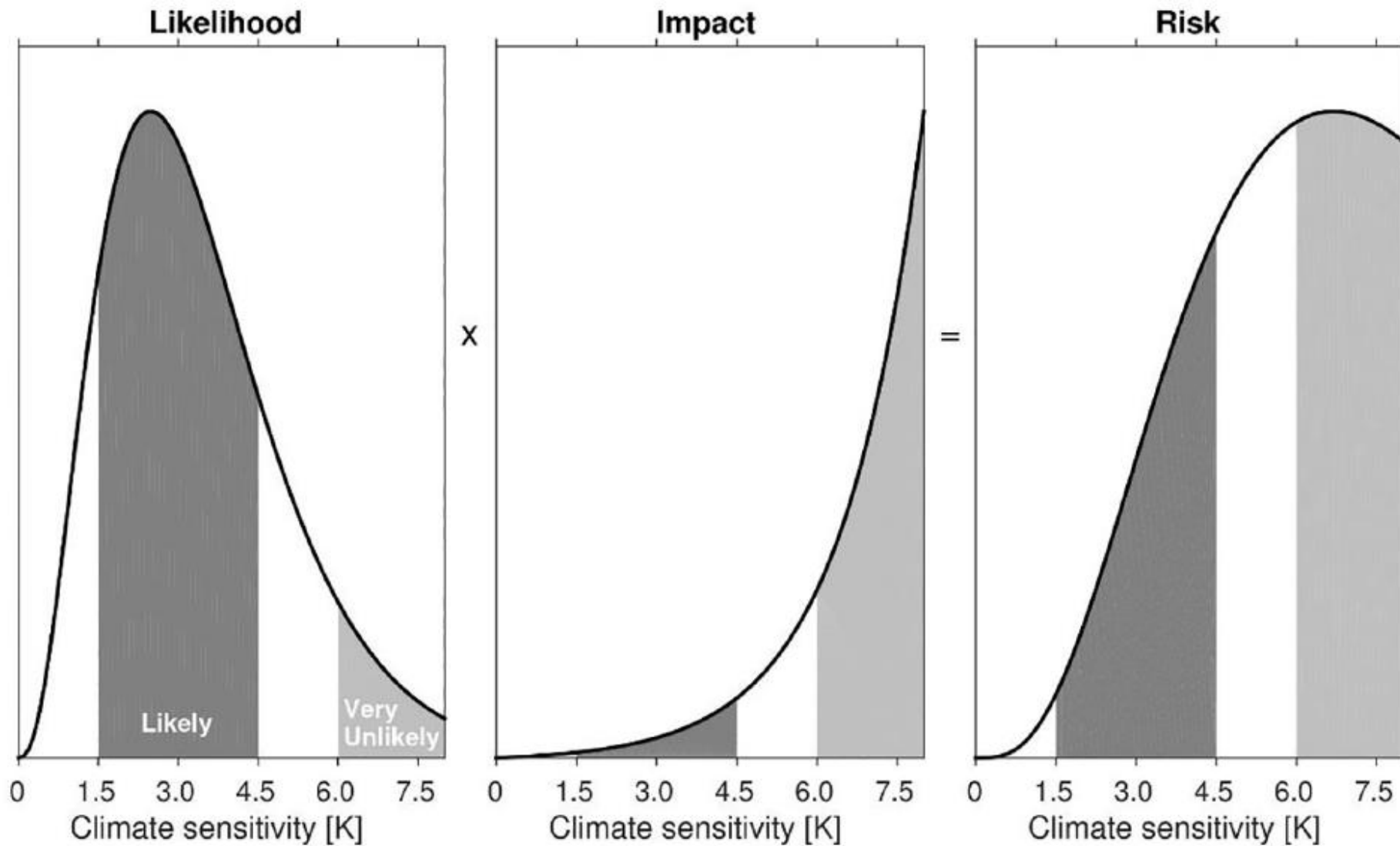
- ❖ **De nombreux points de bascule** dans le système climatique, entraînant des effets potentiellement irréversible et sur le long terme (calotte de glace et niveau marin)
- ❖ Ces seuils dynamiques expliquent en partie pourquoi il est **important de rester sous un seuil de réchauffement de 2°C environ**
- ❖ **Possibilité d'un changement rapide** (<10 ans) dans l'Atlantique Nord dans certaines projections de certains modèles
- ❖ La circulation de retournement va ***très certainement diminuer*** au cours de ce siècle (mais ***très probablement pas s'arrêter***) avec des impacts importants, en particulier dans la **zone sahélienne**.
- ❖ Les observations et la **prévision climatique décennale** sont des outils nécessaires pour anticiper de tels phénomènes.



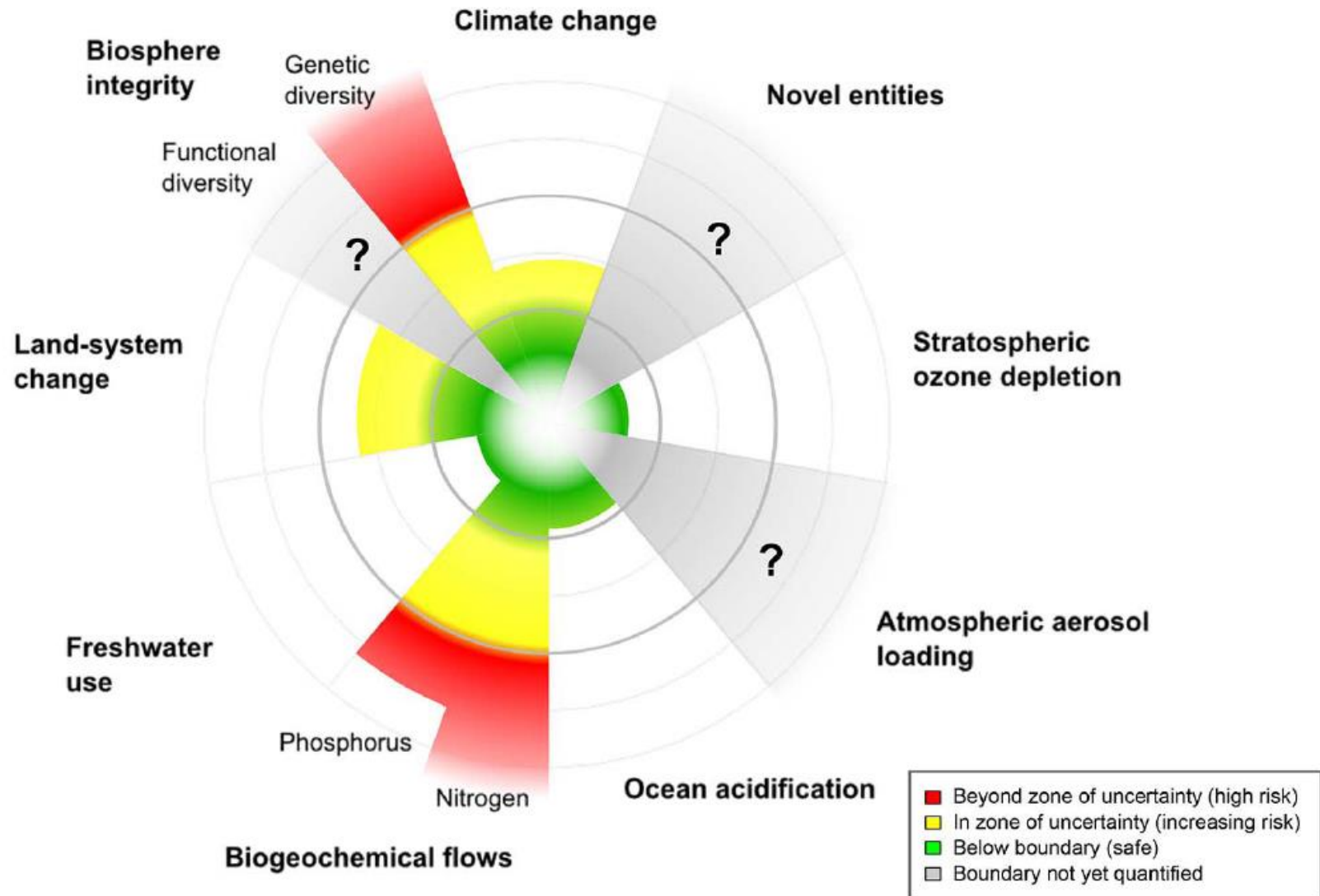
Merci !

« L'avenir ce n'est pas ce qui va arriver, mais ce que nous allons faire » Henri Bergson

Low probability-high impact event

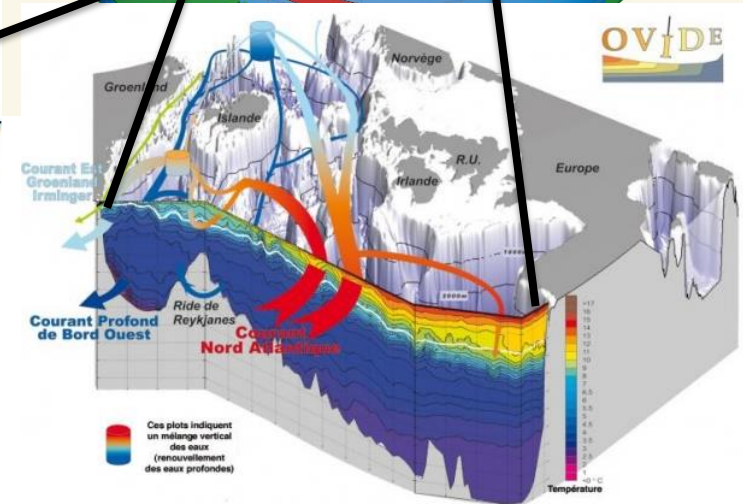
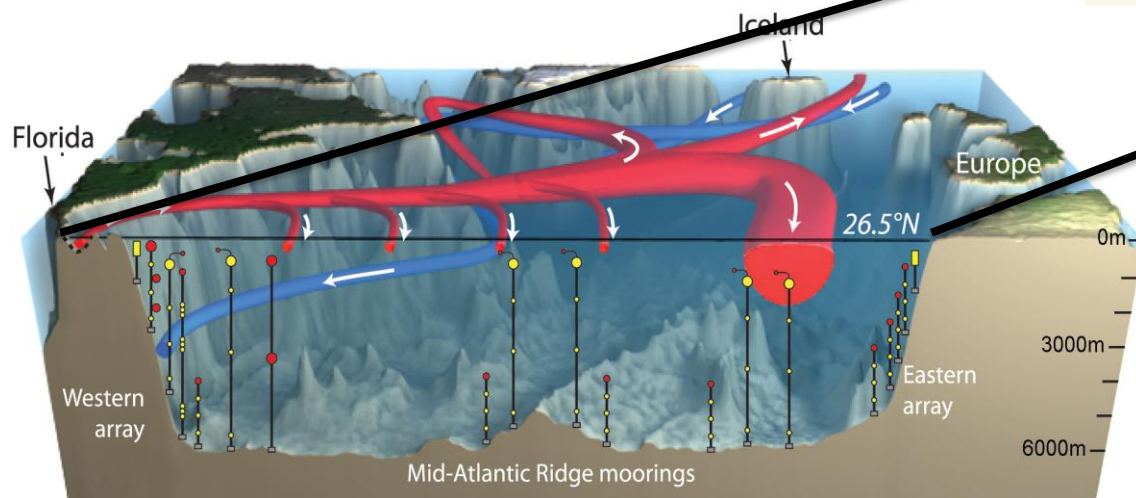
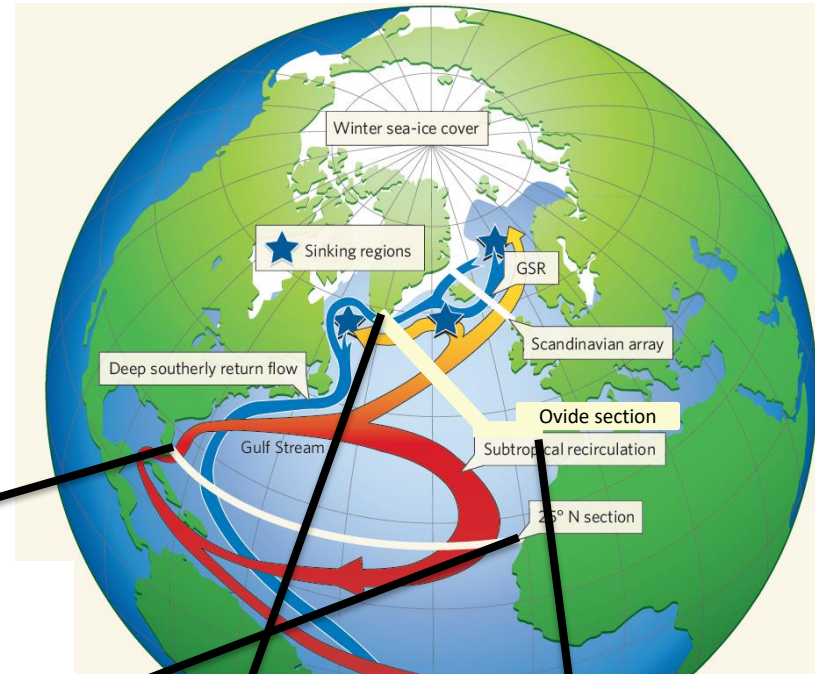


Limites planétaires



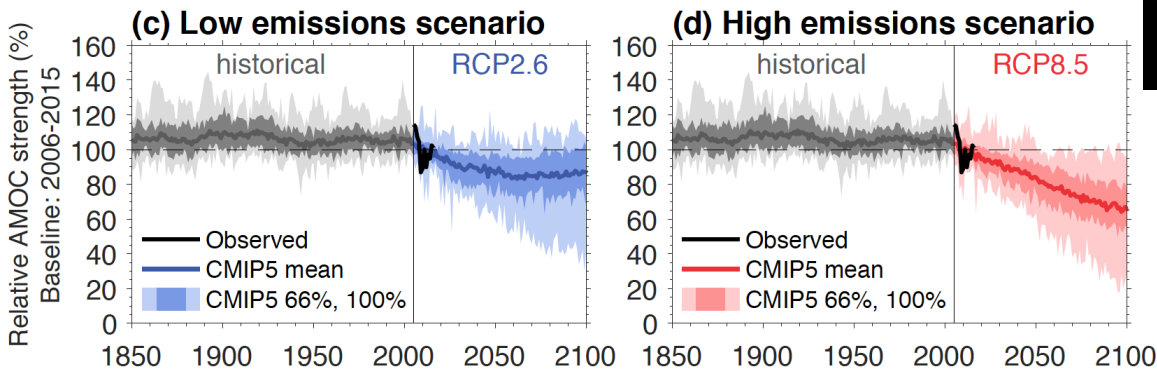
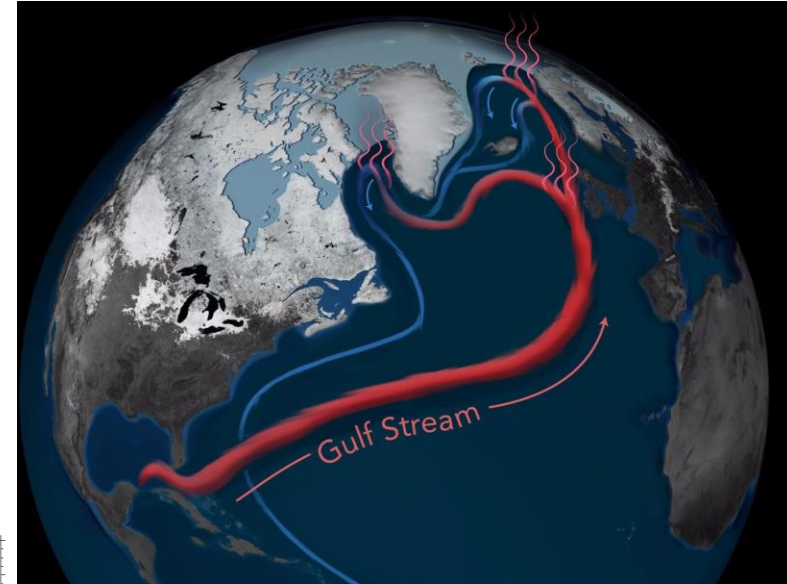
La circulation océanique de retournement (AMOC)

- ❖ Mesuré au mois de Juin tous les deux ans (section OVIDE) entre le Portugal and la pointe du Groenland
- ❖ A 26°N en continu (section RAPID)

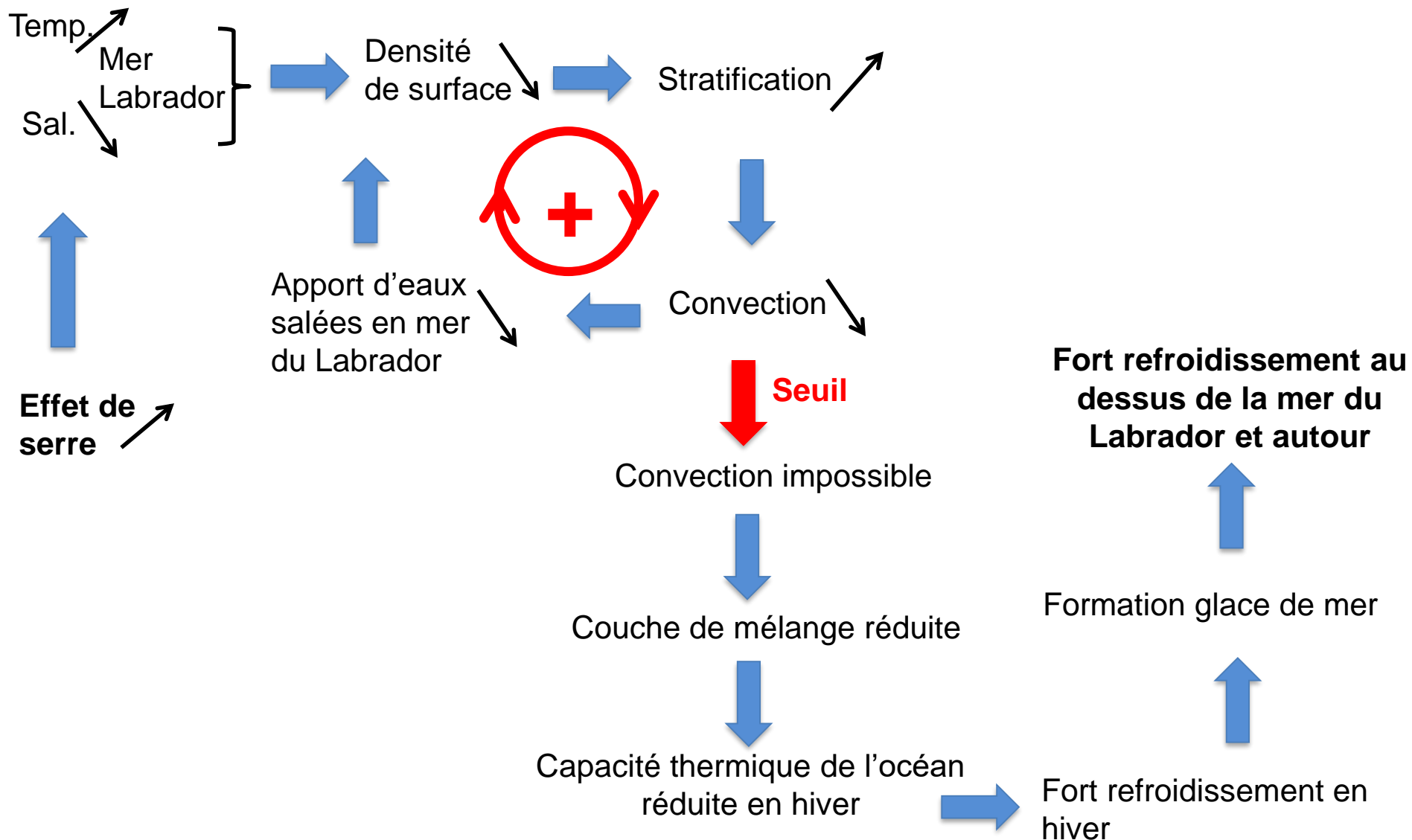


Changement de circulation en Atlantique Nord

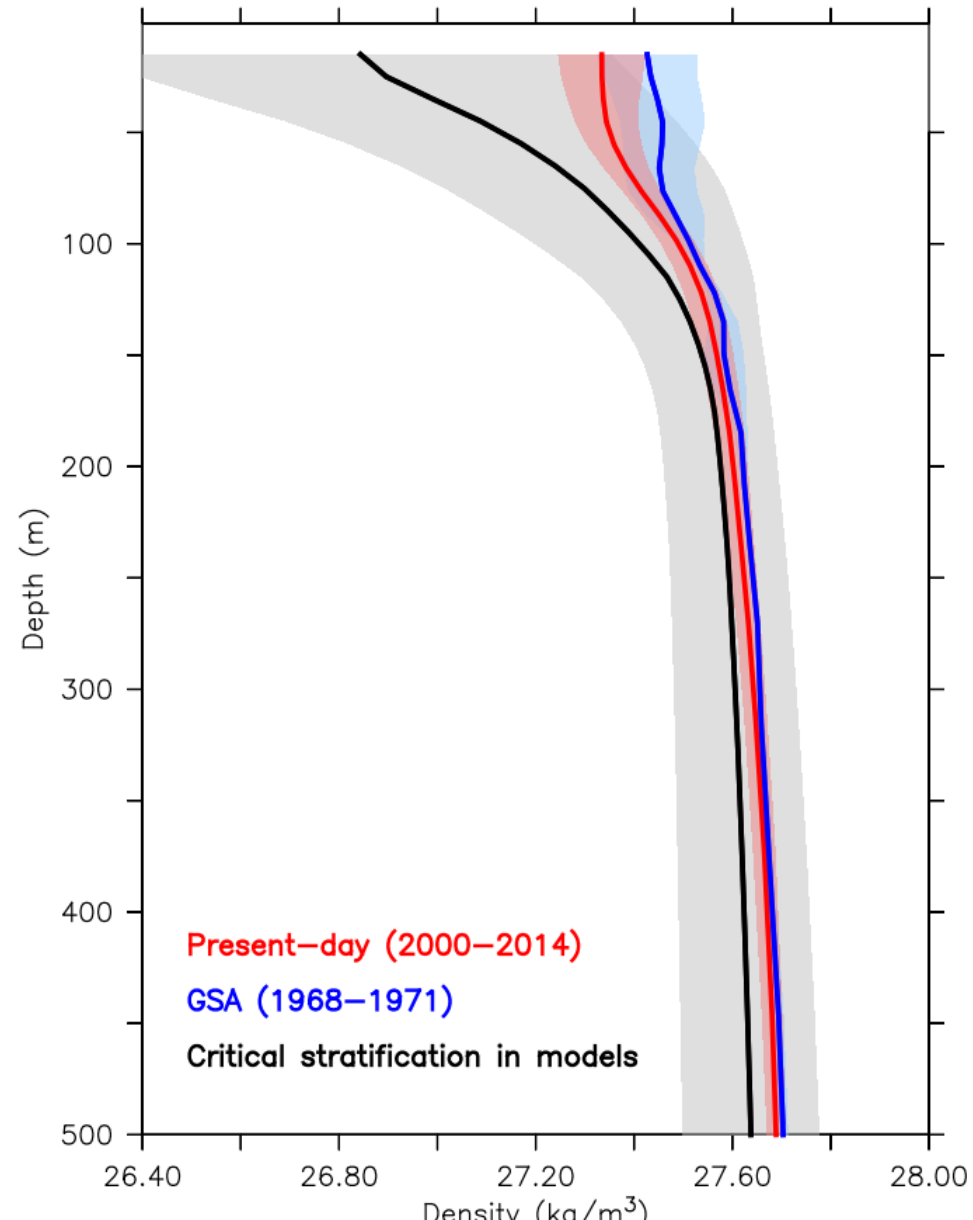
- La circulation est peut être déjà en train de diminuer
- Cette diminution va se poursuivre quelque soit le scénario
- Le risque d'arrêt total croit avec les émissions



Mécanisme



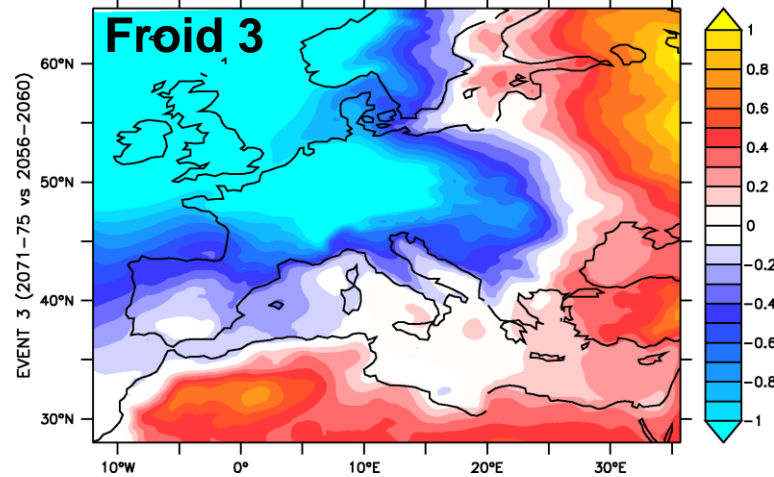
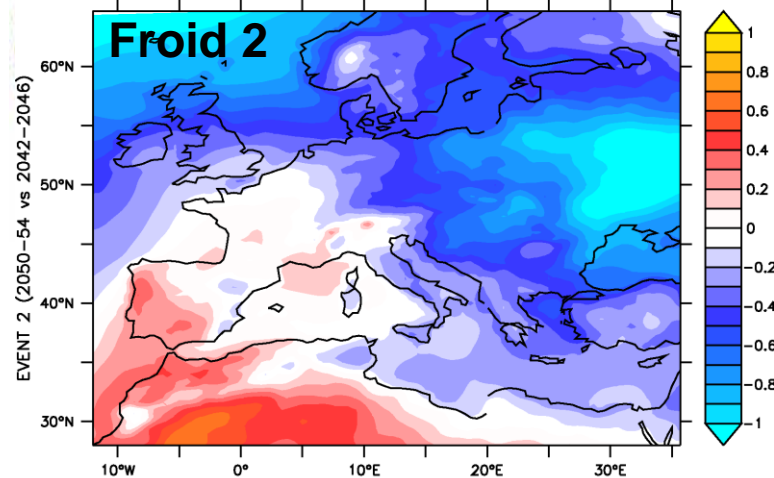
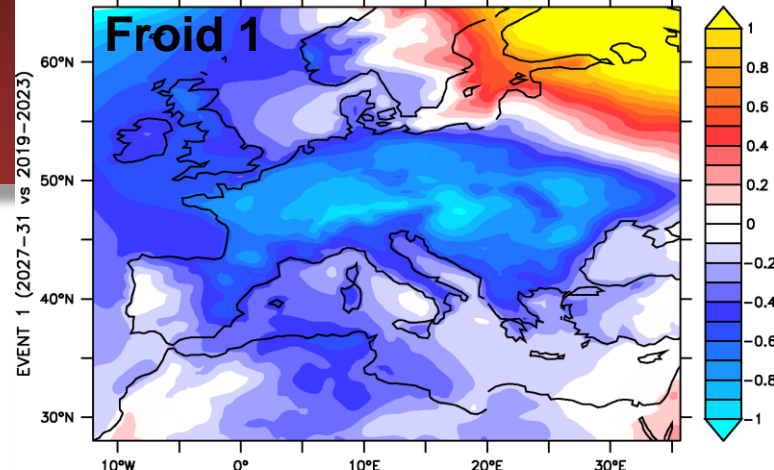
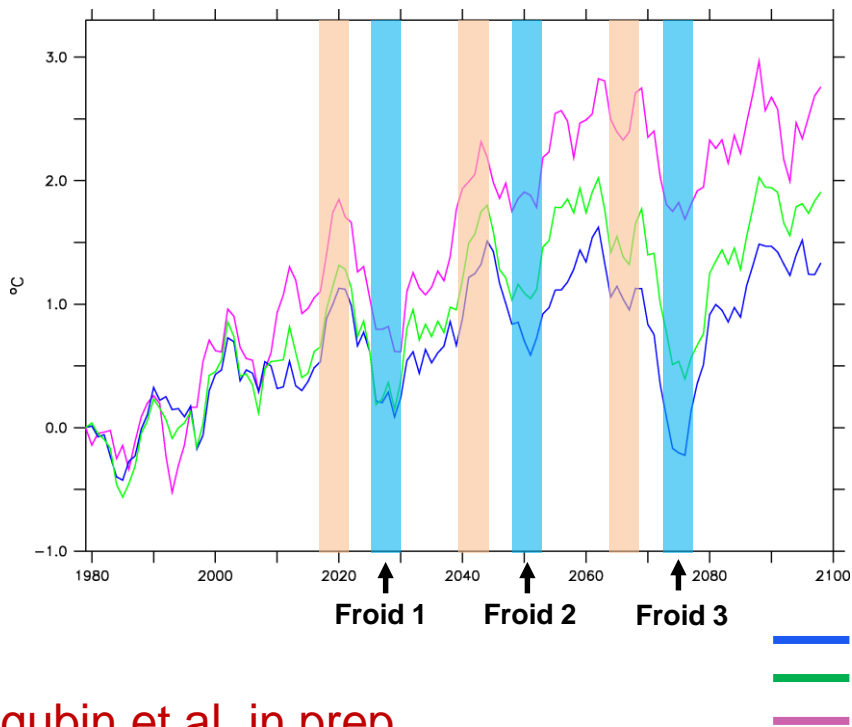
Proximité bascule en mer du Labrador



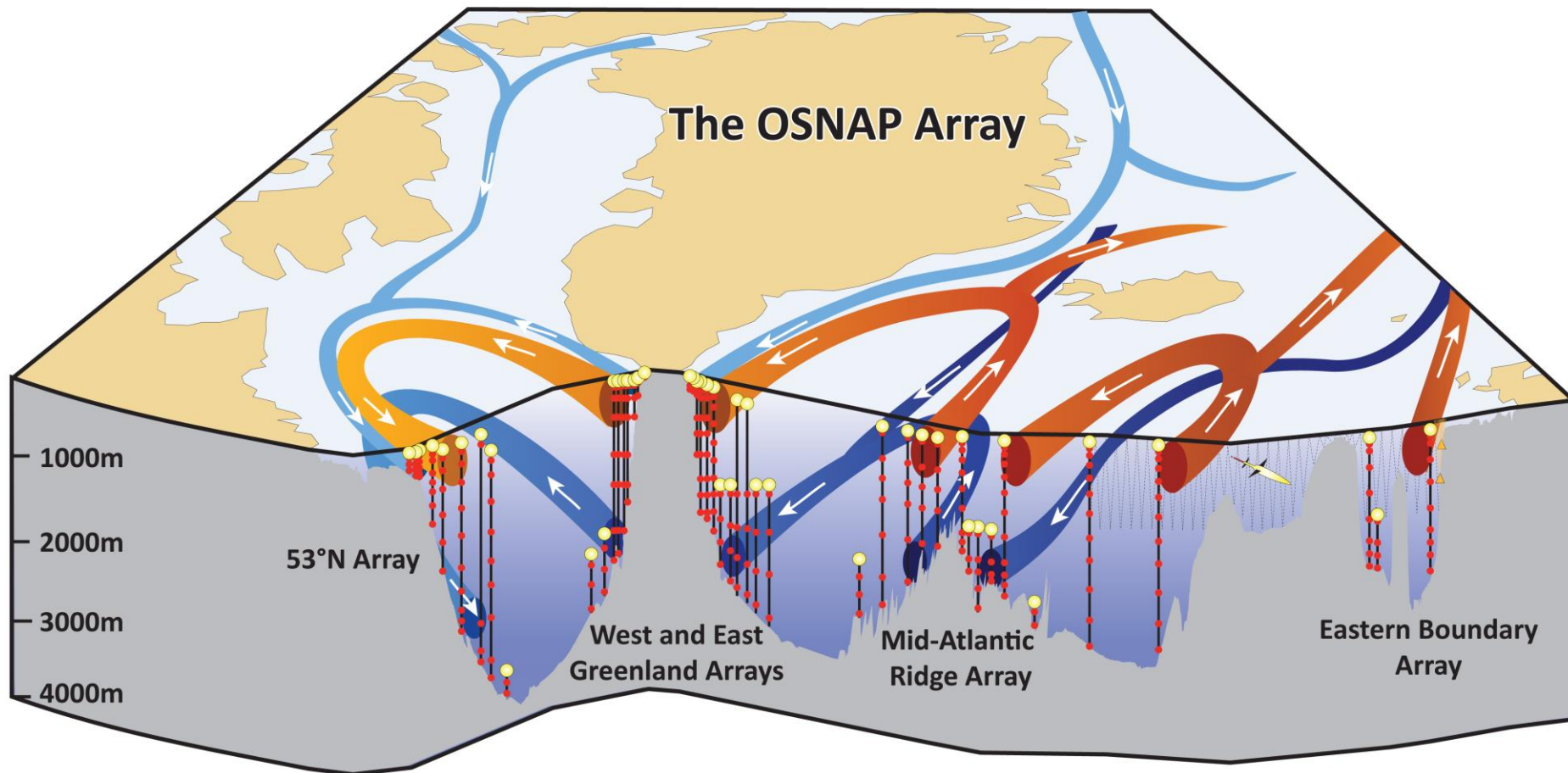
Impact d'un refroidissement brutal

- ❖ Modèle CSIRO-Mk3-6-0 (Australie) downscalé dynamiquement grâce au projet CORDEX avec le modèle régional SMHI-RCA4 (Suède)
- ❖ Scénario d'émission RCP4.5

Température annuelle en Europe



Nouvelle section OSNAP



Dernier millénaire

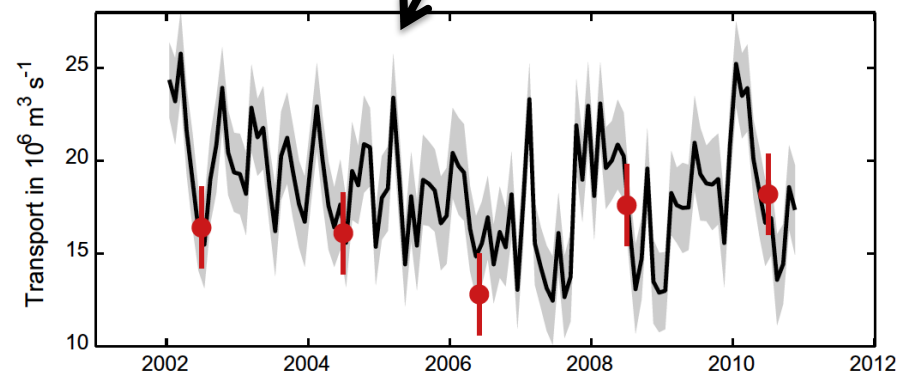
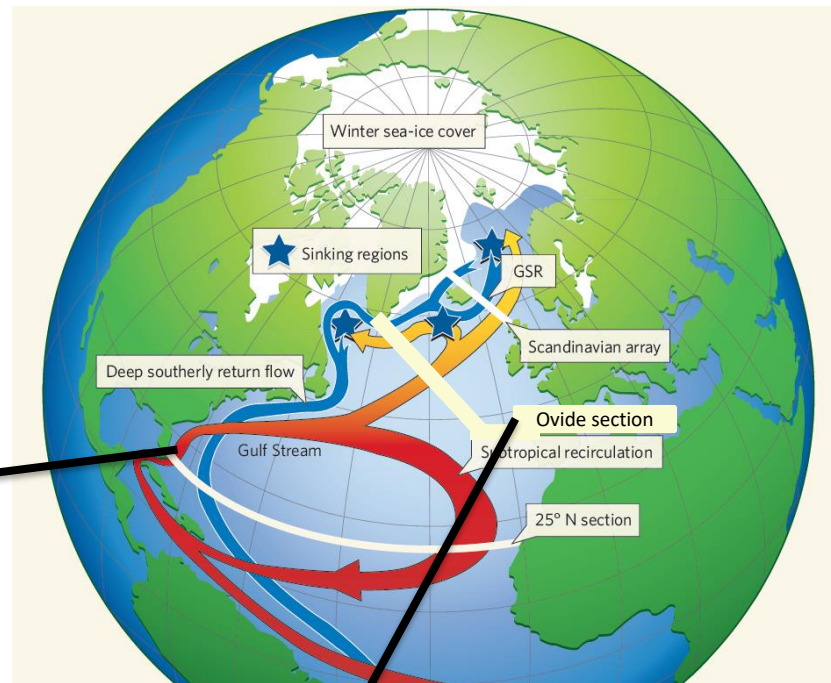
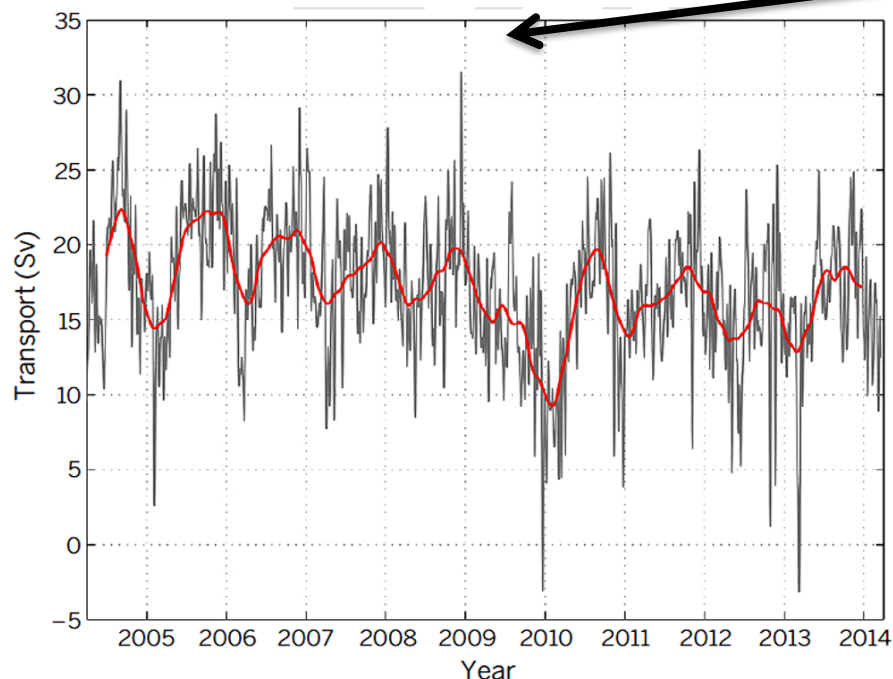
- ❖ Un changement rapide du gyre subpolaire pour expliquer le petit âge de glace (Sicre et al. 2008, Miller et al. 2009, Moreno-Chamaro 2017, Moffa-Sanchez et al. 2017)
- ❖ Michel et al. (in prep.): Reconstruction du principal mode de variabilité en Atlantique Nord : la circulation océanique était plus rapide à l'optimum médiéval

Bruegel : Les chasseurs dans la neige (1565)



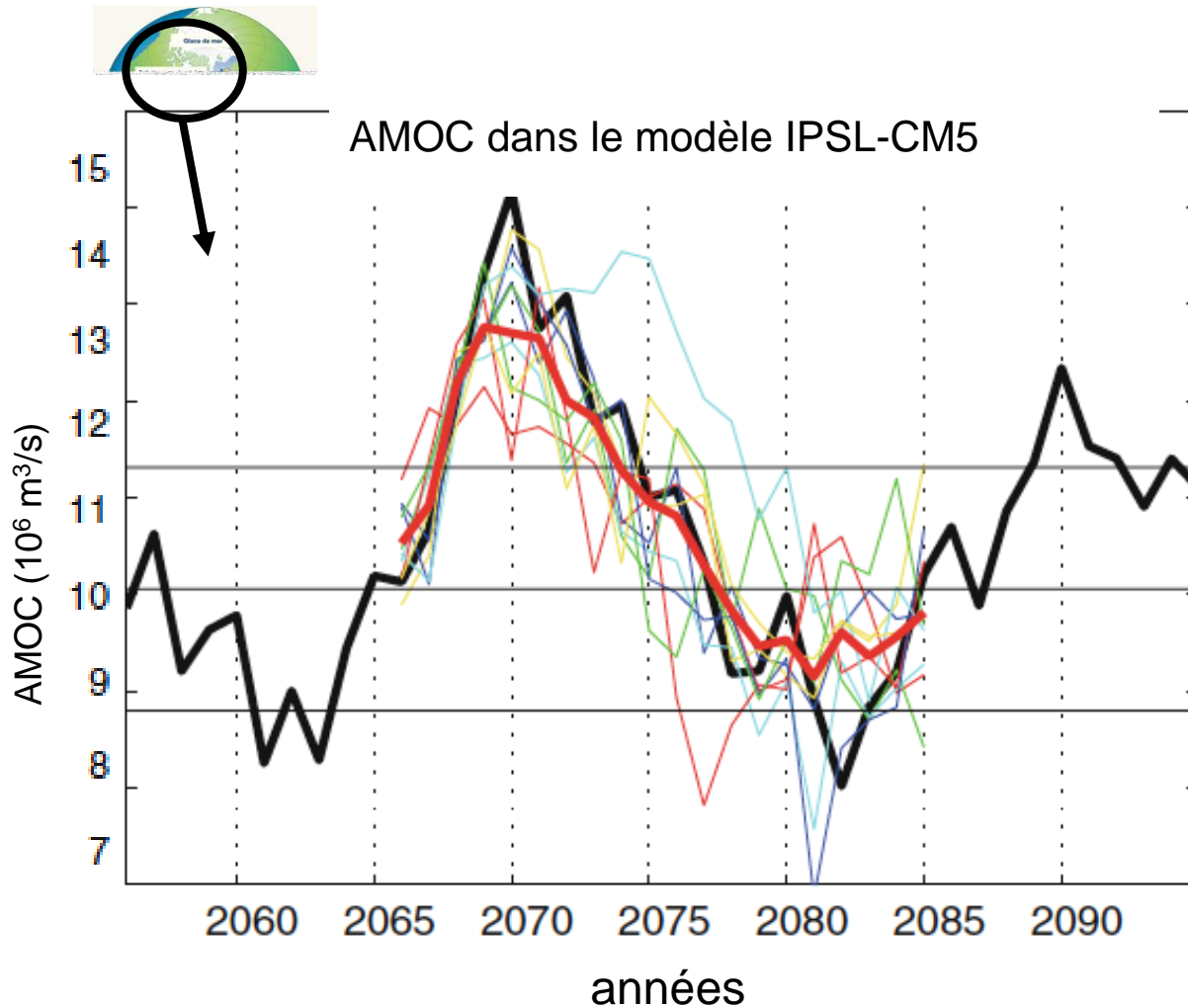
Evolution récente de l'AMOC

Pas de tendances nettes sur 15 ans



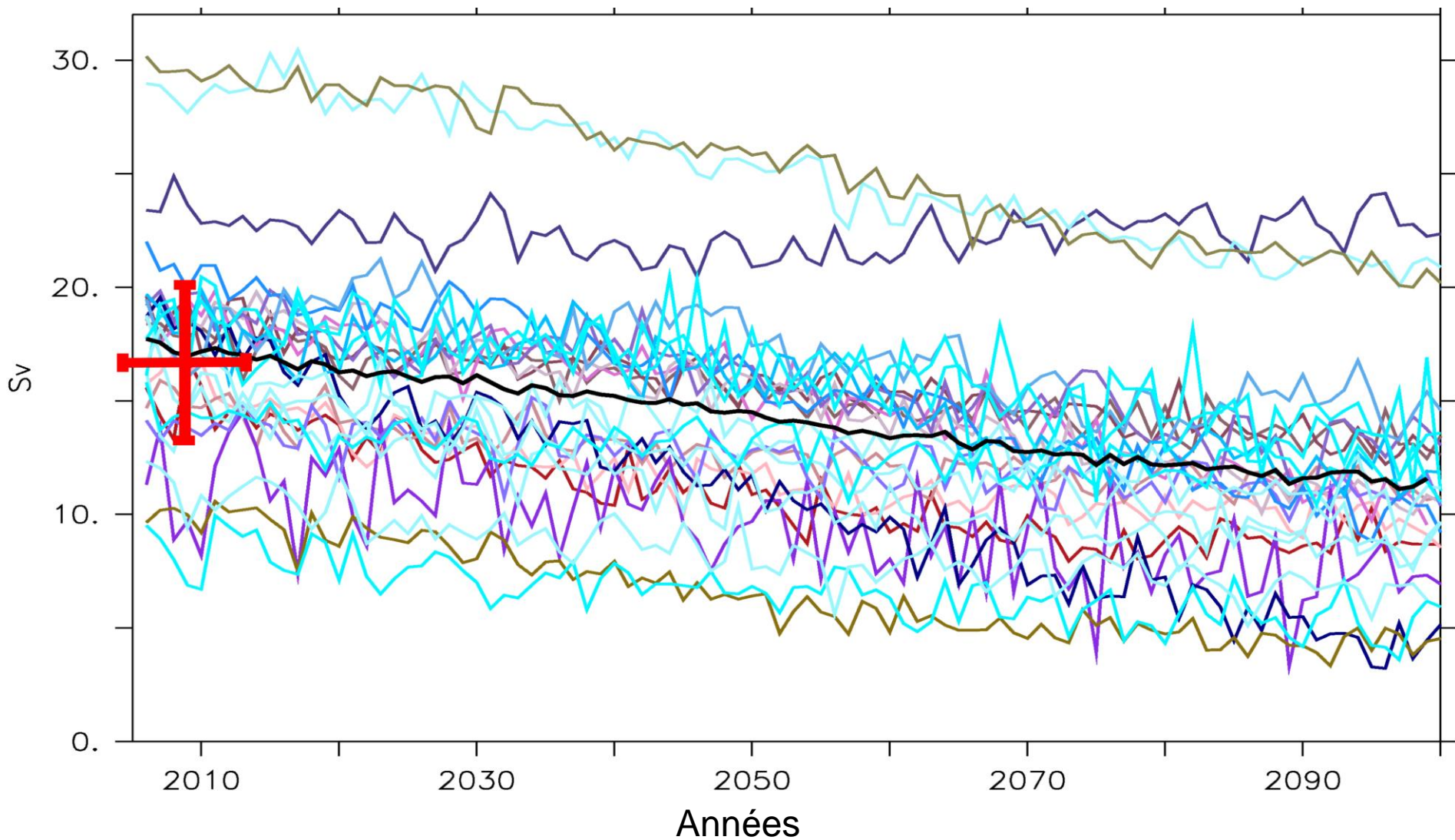
Perspectives de recherche en cours et à venir

Prévision décennale



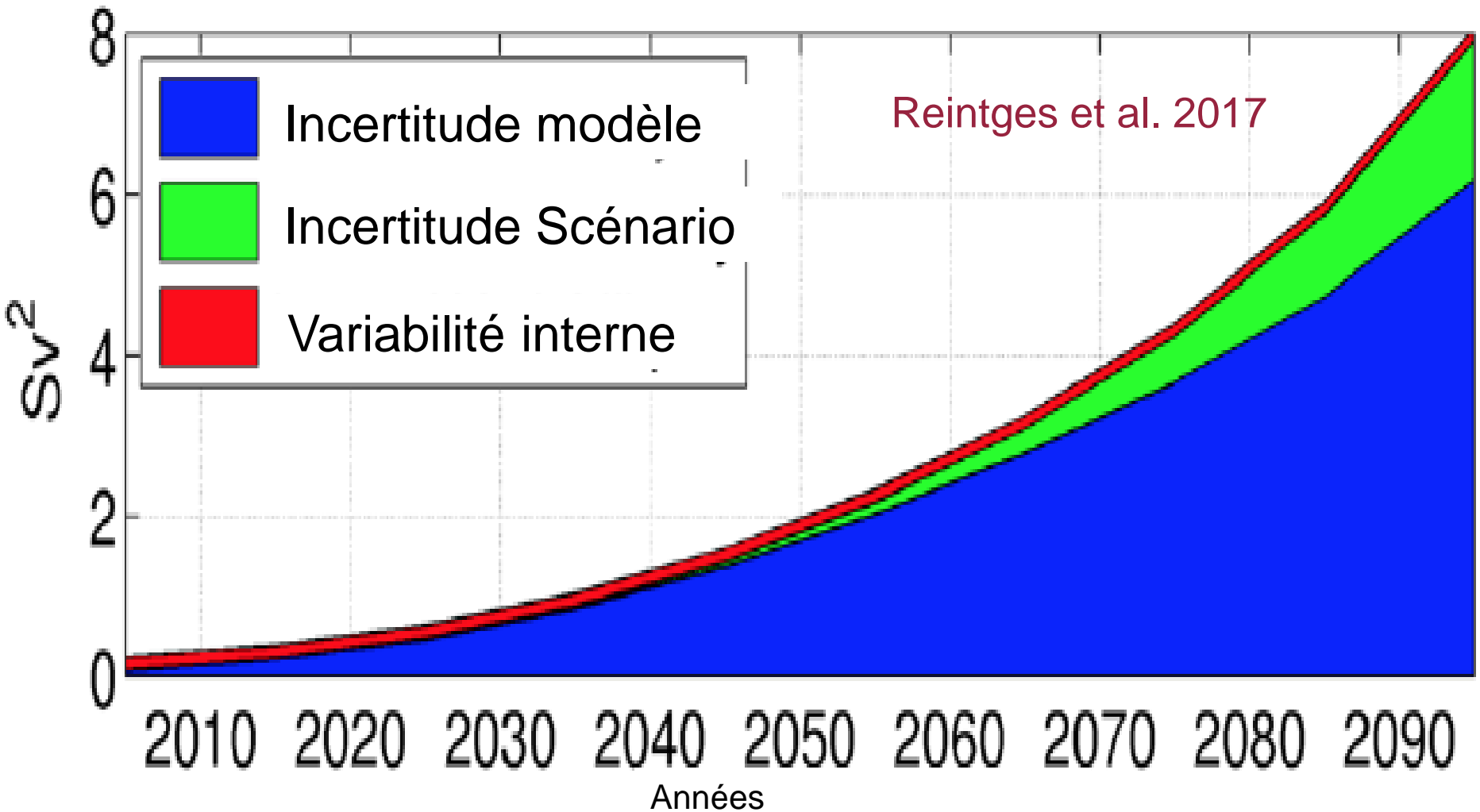
Coup de froid sans forcer

Projections AMOC à 26°N pour un scénario RCP85



Sources d'incertitudes

Source incertitudes AMOC à 30°N (RCP45 et RCP85)



Résumé des épisodes précédents

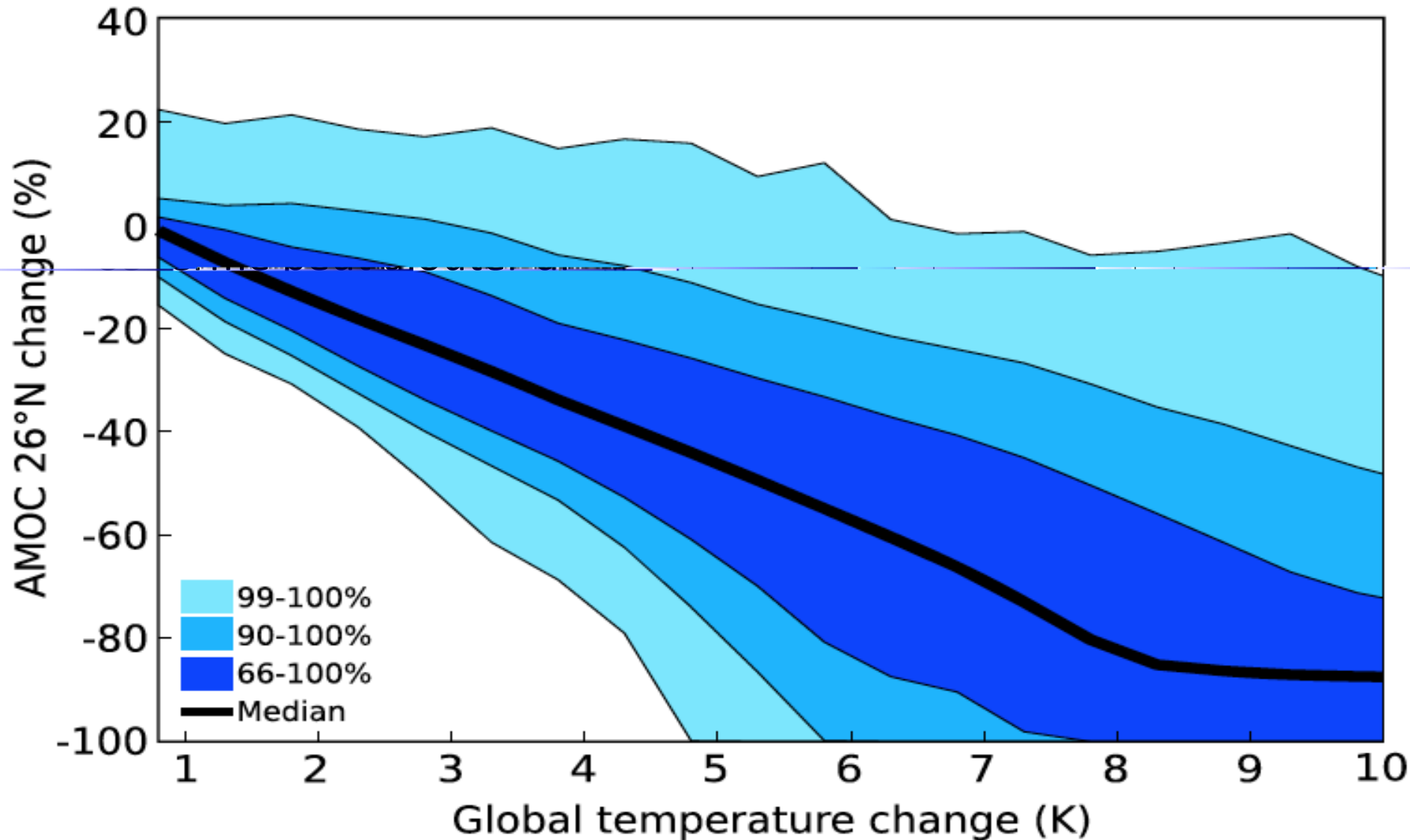
Nouveau cycle du GIEC (2015-2021)

- ❖ Membre du Groupement d'Experts Intergouvernementaux sur le Climat (GIEC) depuis 2016
- ❖ Participant au rapport spécial sur « l'océan et la cryosphère dans une climat qui change »
- ❖ Chapitre 6 : Extrêmes, changements abrupts et gestions des risques
- ❖ Parution prévue en 2019

Et la fonte du Groenland ?



Réponse de l'AMOC à la fonte du Groenland

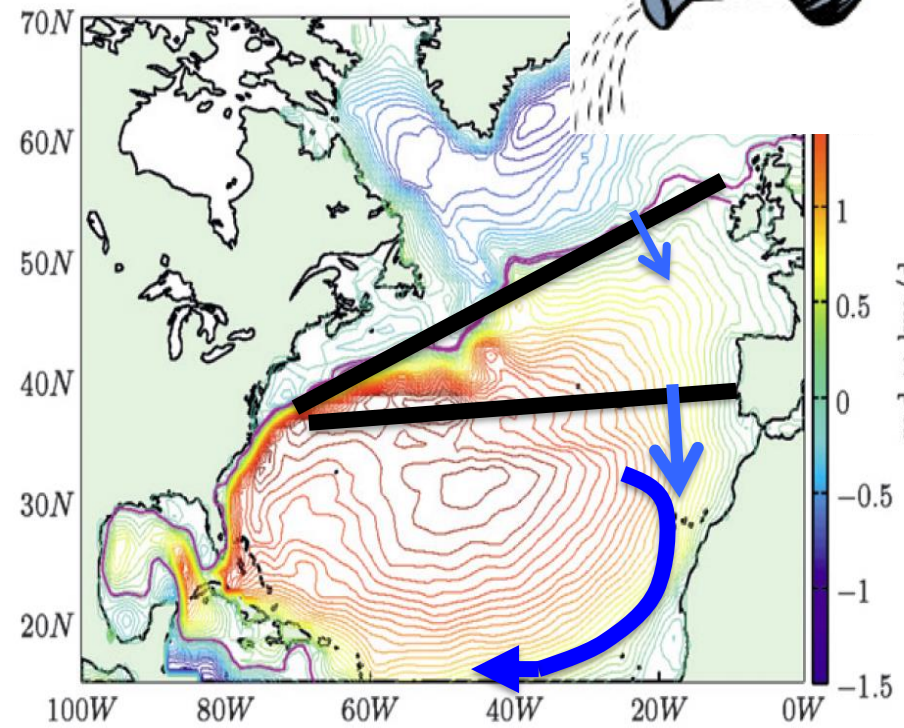


Evaluation des modèles

- ❖ Dispersion de la réponse à un flux d'eau européens (Swingedouw et al. 2013) par une mauvaise représentation des gyres
- ❖ Les plus sensibles semblent être les plus continentales
- ❖ Liu et al. (2017) : les modèles semblent rétroaction positive souvent mal estimée

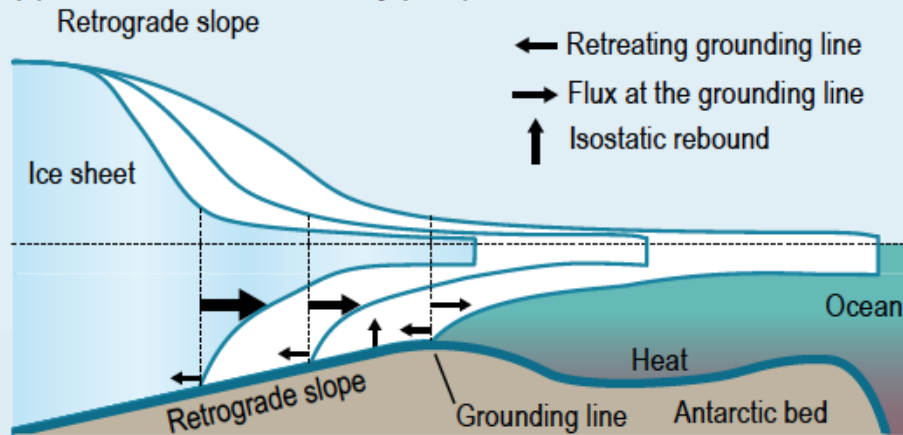


les modèles par une mauvaise



SROCC Chapter 3

(a) Marine Ice Sheet Instability (MISI)



(b) Marine Ice Cliff Instability (MICI)

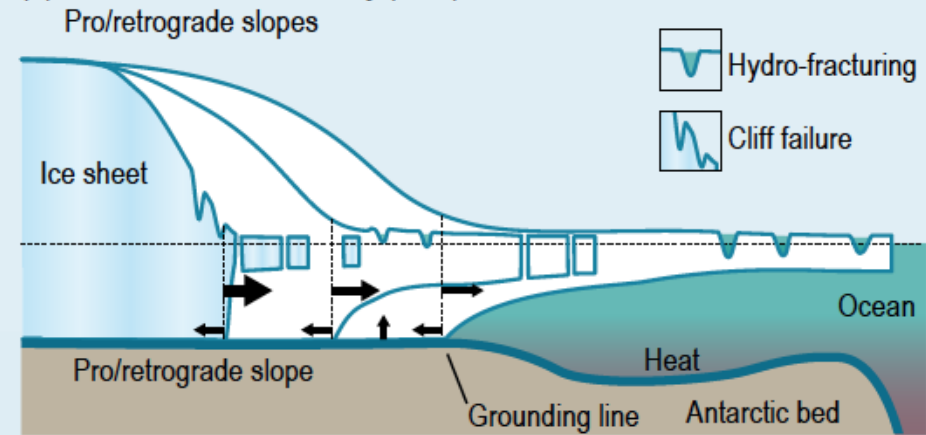


Figure CB8.1 | Schematic representation of Marine Ice Sheet Instability (MISI, a) and Marine Ice Cliff Instability (MICI, b) from Pattyn (2018). **(a)** thinning of the buttressing ice shelf leads to acceleration of the ice sheet flow and thinning of the marine-terminated ice margin. Because bedrock under the ice sheet is sloping towards ice sheet interior, thinning of the ice causes retreat of the grounding line followed by an increase of the seaward ice flux, further thinning of the ice margin, and further retreat of the grounding line. **(b)** disintegration of the ice shelf due to bottom melting and/or hydro-fracturing produces an ice cliff. If the cliff is tall enough (at least ~800 m of total ice thickness, or about 100 m of ice above the water line), the stresses at the cliff face exceed the strength of the ice, and the cliff fails structurally in repeated calving events. Note that MISI requires a retrograde bed slope, while MICI can be realised on a flat or seaward-inclined bed. Like MISI, the persistence of MICI depends on the lack of ice shelf buttressing, which can stop or slow brittle ice failure at the grounding line by providing supportive backstress.