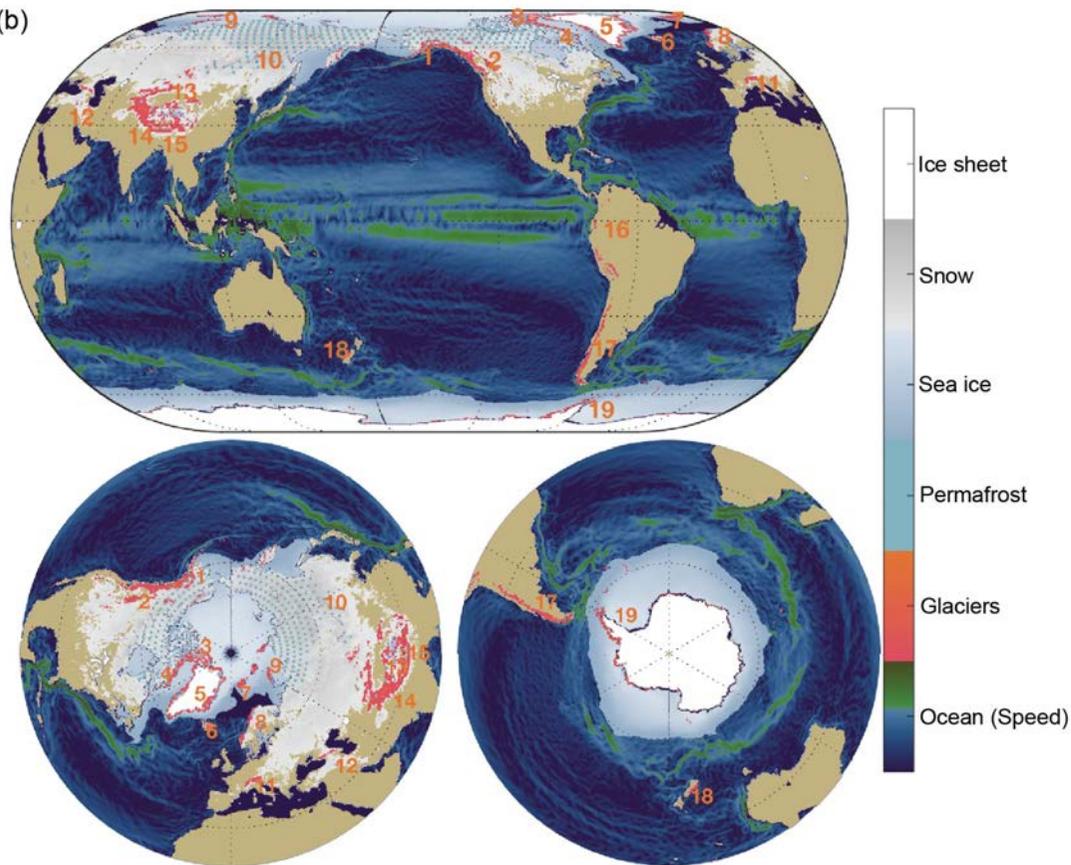


# Neige et glaces : leur rôle dans le système climatique

Gerhard Krinner, IGE/CNRS  
gerhard.krinner@cnr.fr

Disponible en tailles et goûts variés

(b)



Élément cryosphérique	Superficie (max., 10 <sup>6</sup> km <sup>2</sup> )	Épaisseur typique (mètres équivalent glace)
Calotte de glace antarctique	14	2200 m
Calotte de glace du Groenland	1.8	1500 m
Glaciers et petites calottes	0.7	200 m
Glace de mer arctique	3-16	1-2 m
Glace de mer antarctique	3-18	0.5-1 m
Neige	2-50	0.06 m
Pergélisol ("Permafrost")	16	0.7 m

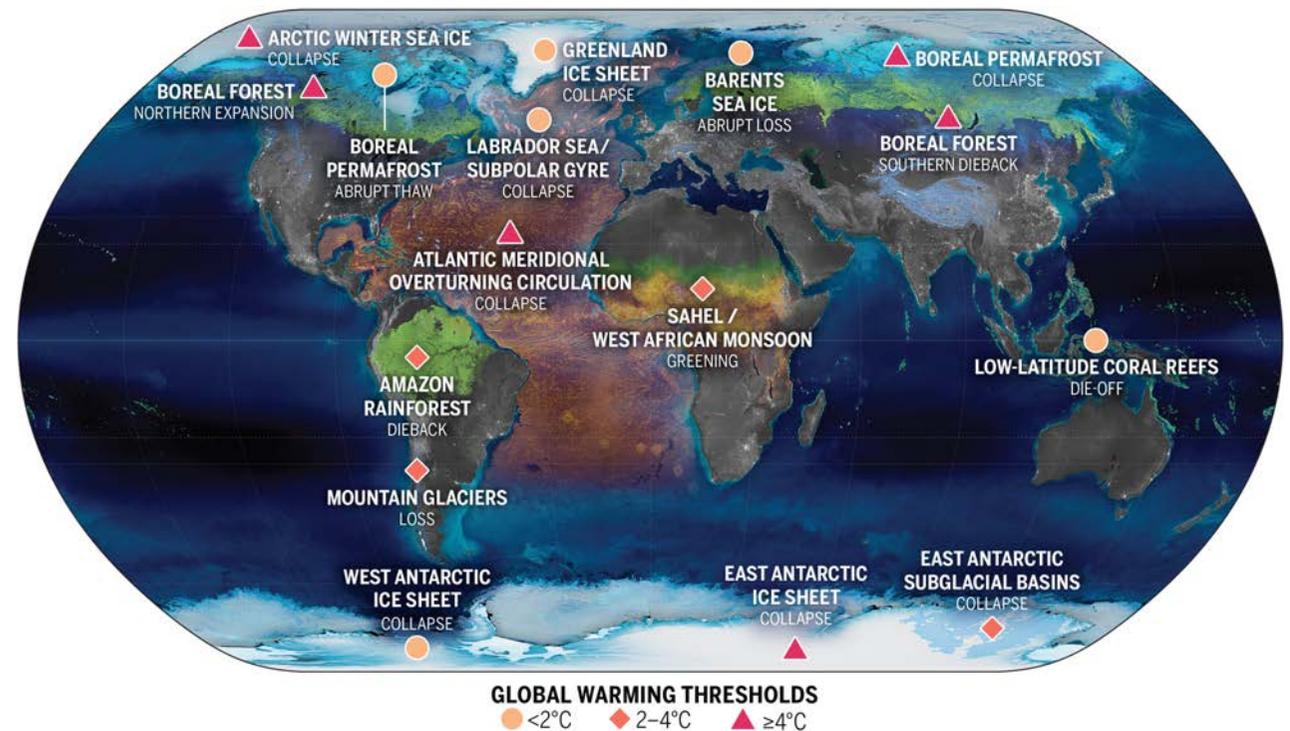
## Quelques remarques au sujet du concept de bascules climatiques

De nombreux « éléments de bascule » potentiels sont proposés, avec des « points de bascule » associés

Concept pas toujours bien défini et pas forcément très utile

Souvent plus utile d'évaluer :

- Irréversibilité
- Caractère abrupte
- Auto-amplification
- Potentiel de surprise



(McKay et al., Science 2022)

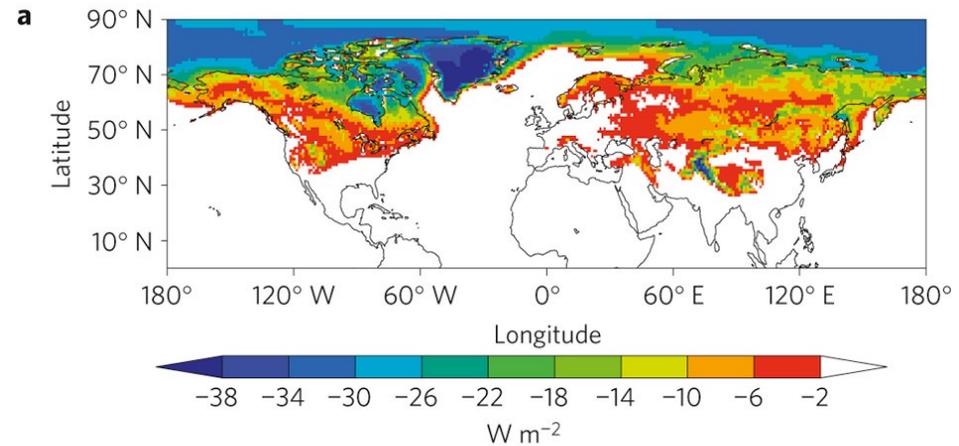
Earth System Component/Tipping Element	Potential Abrupt Climate Change?	Irreversibility if Forcing Reversed (Time Scales Indicated)	Projected 21st Century Change Under Continued Warming
Arctic Summer Sea Ice	No, <i>high confidence</i>	Reversible within years to decades, <i>high confidence</i>	<i>Likely</i> complete loss
Arctic Winter Sea Ice	Yes, <i>high confidence</i>	Reversible within years to decades, <i>high confidence</i>	<i>High confidence</i> in moderate winter declines
Permafrost Carbon	Yes, <i>high confidence</i>	Irreversible for centuries, <i>high confidence</i>	<i>Virtually certain</i> decline in frozen carbon; <i>low confidence</i> in net carbon change
Greenland Ice Sheet	No, <i>high confidence</i>	Irreversible for millennia, <i>high confidence</i>	<i>Virtually certain</i> mass loss under all scenarios
West Antarctic Ice Sheet and Shelves	Yes, <i>high confidence</i>	Irreversible for decades to millennia, <i>high confidence</i>	<i>Likely</i> mass loss under all scenarios; <i>deep uncertainty</i> in projections for above 3°C

(extrait IPCC AR6 WGI Tableau 4.10)

# Forçage radiatif de la cryosphère et rétroaction d'albédo

## a) Moyenne annuelle du forçage radiatif cryosphérique, 1979 à 2008 :

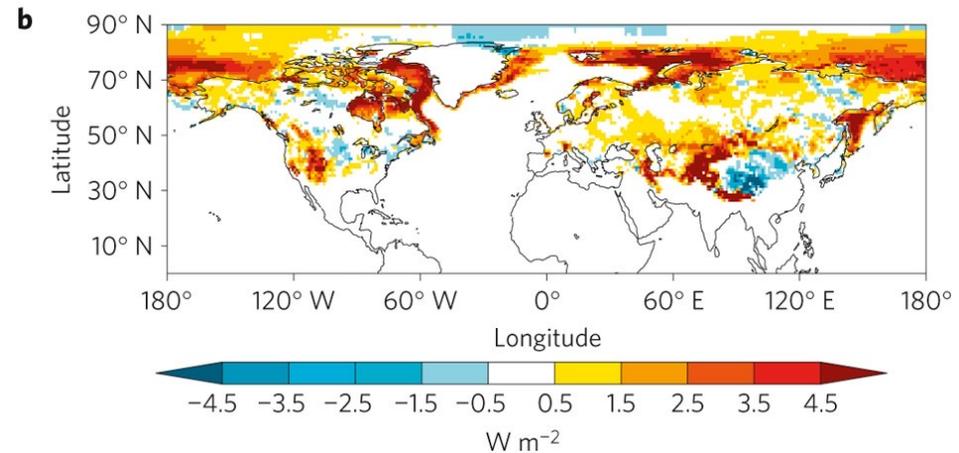
Forçage négatif signifie que la glace et la neige diminuent le flux visible net en haut de l'atmosphère



## b) Changement de 1979 à 2008:

Positif : signifie que l'effet refroidissant de la cryosphère a diminué depuis 1979

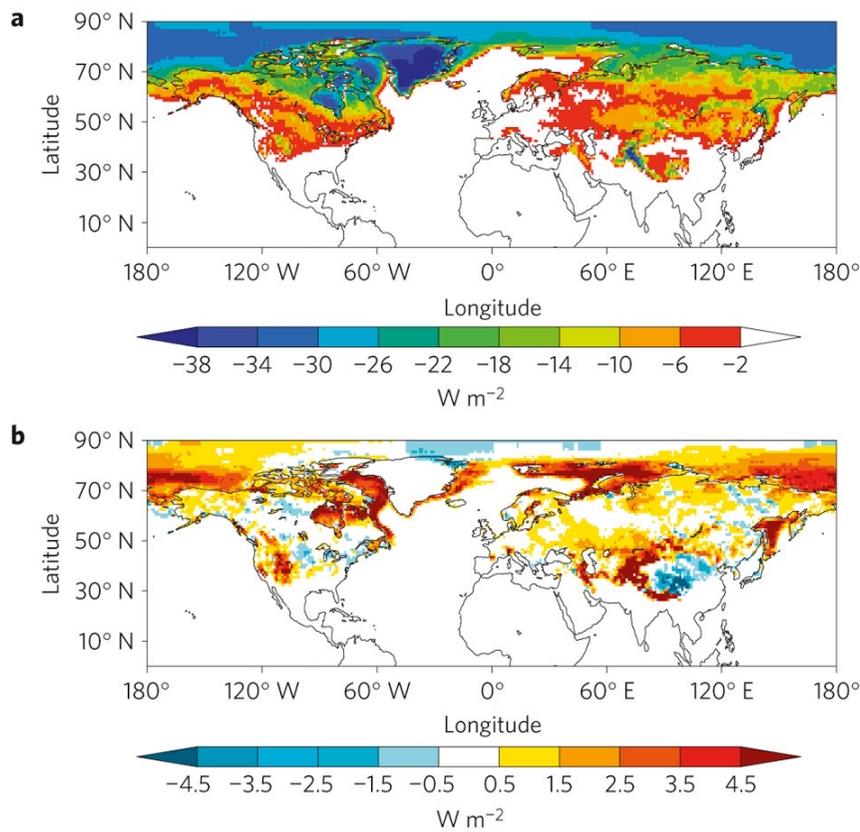
Moyenne hémisphérique :  $0.45 W m^{-2}$  sur cette période



(Flanner et al., 2011)

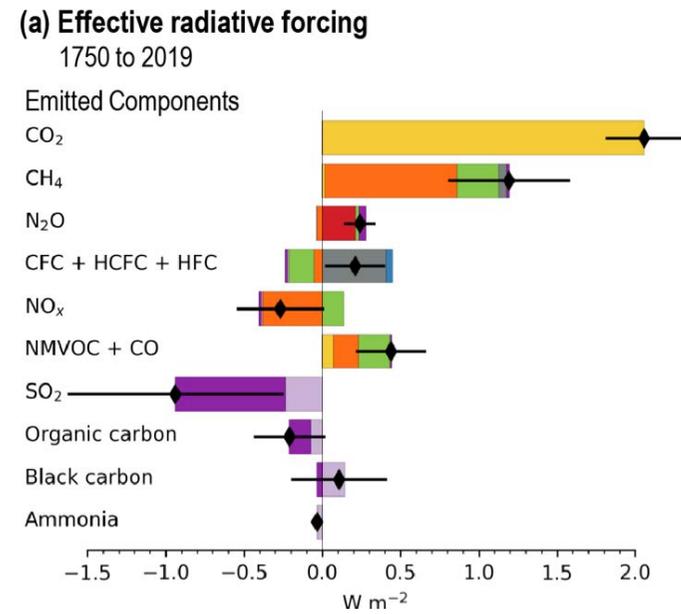
# Comparaison au forçage radiatif des gaz à effet de serre

Forçage radiative de la cryosphère et son évolution, 1979-2008



(Flanner et al., 2011)

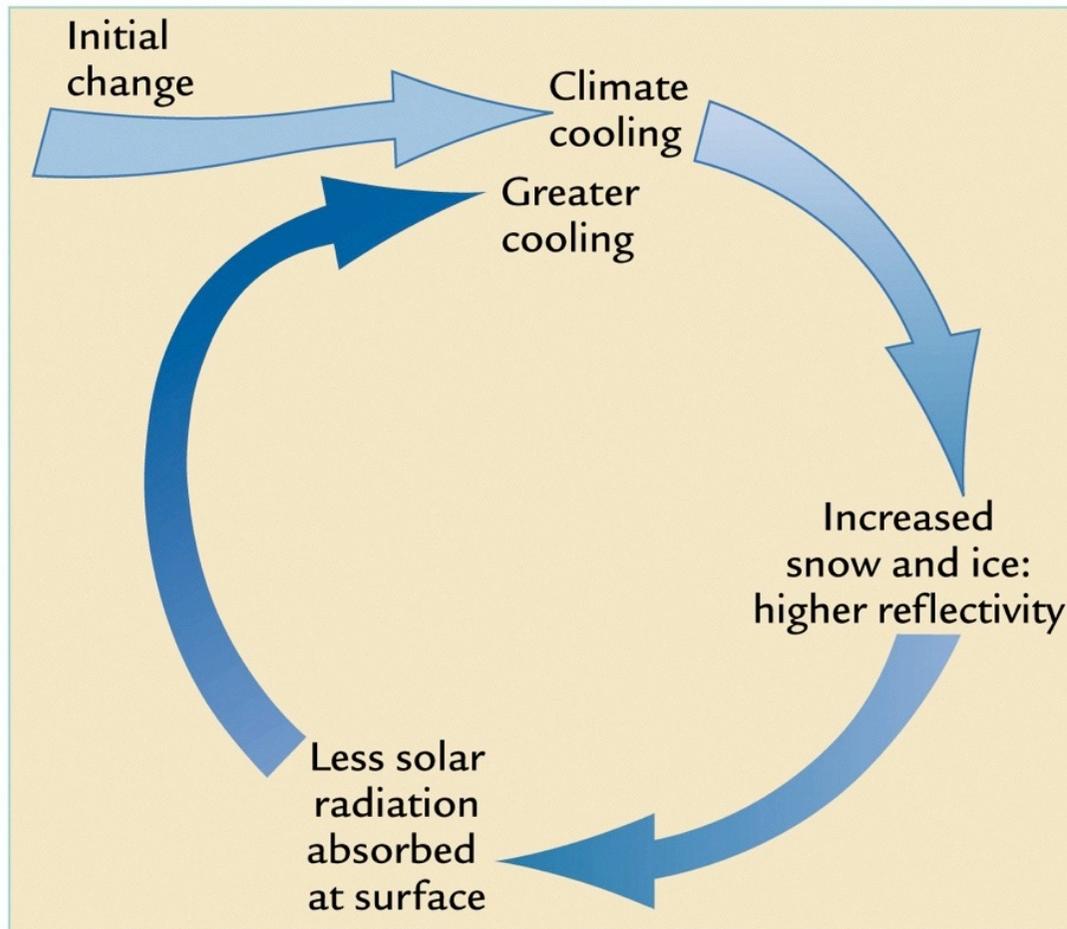
Forçage radiative des GES, 1750-2019



(IPCC AR6 WGI TS Figure TS.15 )

**Pas négligeable !**

## Rétroaction d'albédo : Amplifie les changements climatiques



(Ruddiman, 2003)

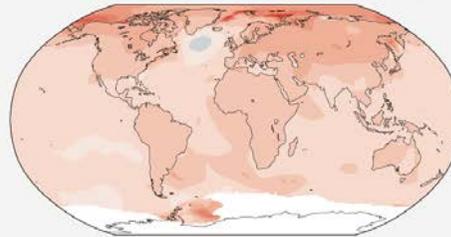
Peut aller jusqu'à l'englacement complet de la Terre dans des cas extrêmes

# Rétroaction d'albédo : Une des causes de l'amplification arctique prédite, observée et projetée pour le futur

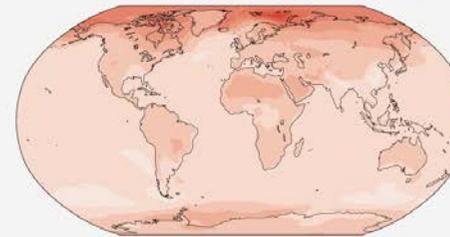
## (a) Annual mean temperature change (°C) at 1°C global warming

Warming at 1°C affects all continents and is generally larger over land than over the oceans in both observations and models. Across most regions, observed and simulated patterns are consistent.

Observed change per 1°C global warming



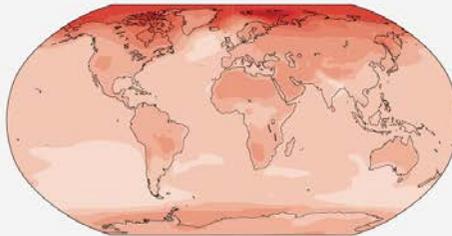
Simulated change at 1°C global warming



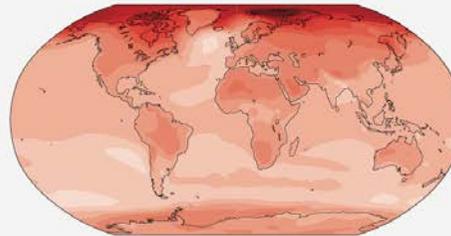
## (b) Annual mean temperature change (°C) relative to 1850-1900

Across warming levels, land areas warm more than ocean areas, and the Arctic and Antarctica warm more than the tropics.

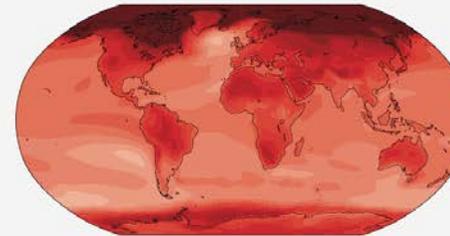
Simulated change at 1.5°C global warming



Simulated change at 2°C global warming



Simulated change at 4°C global warming



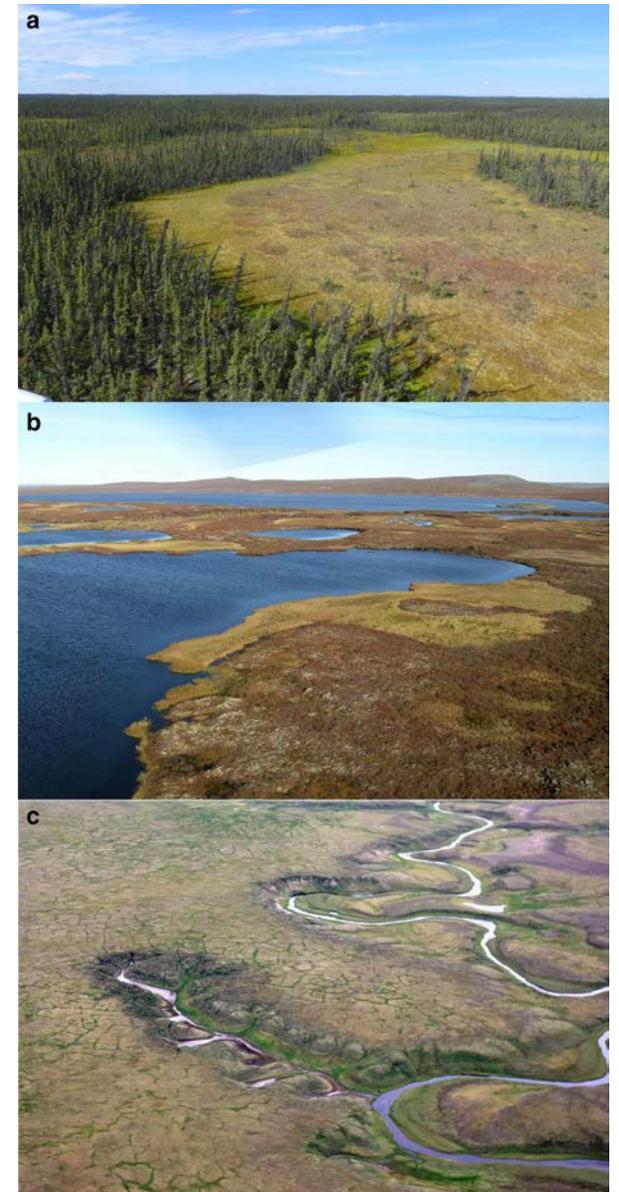
(IPCC AR6 WGI SPM)

# Pergélisols



## C'est quoi ?

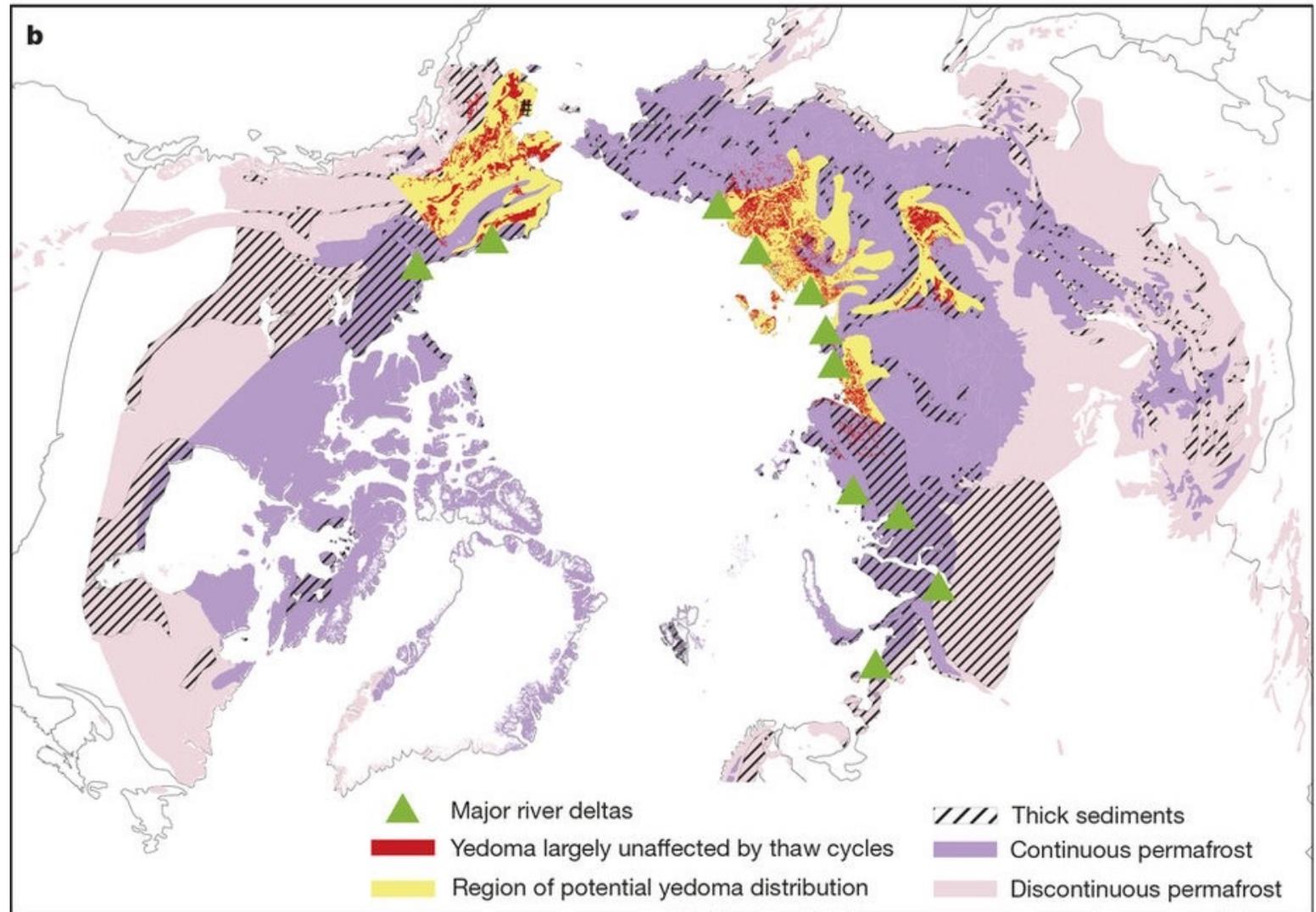
- Sol qui reste gelé en permanence plus que 2 années de suite
- Couche active à la surface : dégèle en été
- Gelé en profondeur toute l'année
- Surface : nue ou végétation
- De la matière organique tend à s'accumuler



(Olefeldt et al., 2015)

C'est où ?

16 millions de km<sup>2</sup>

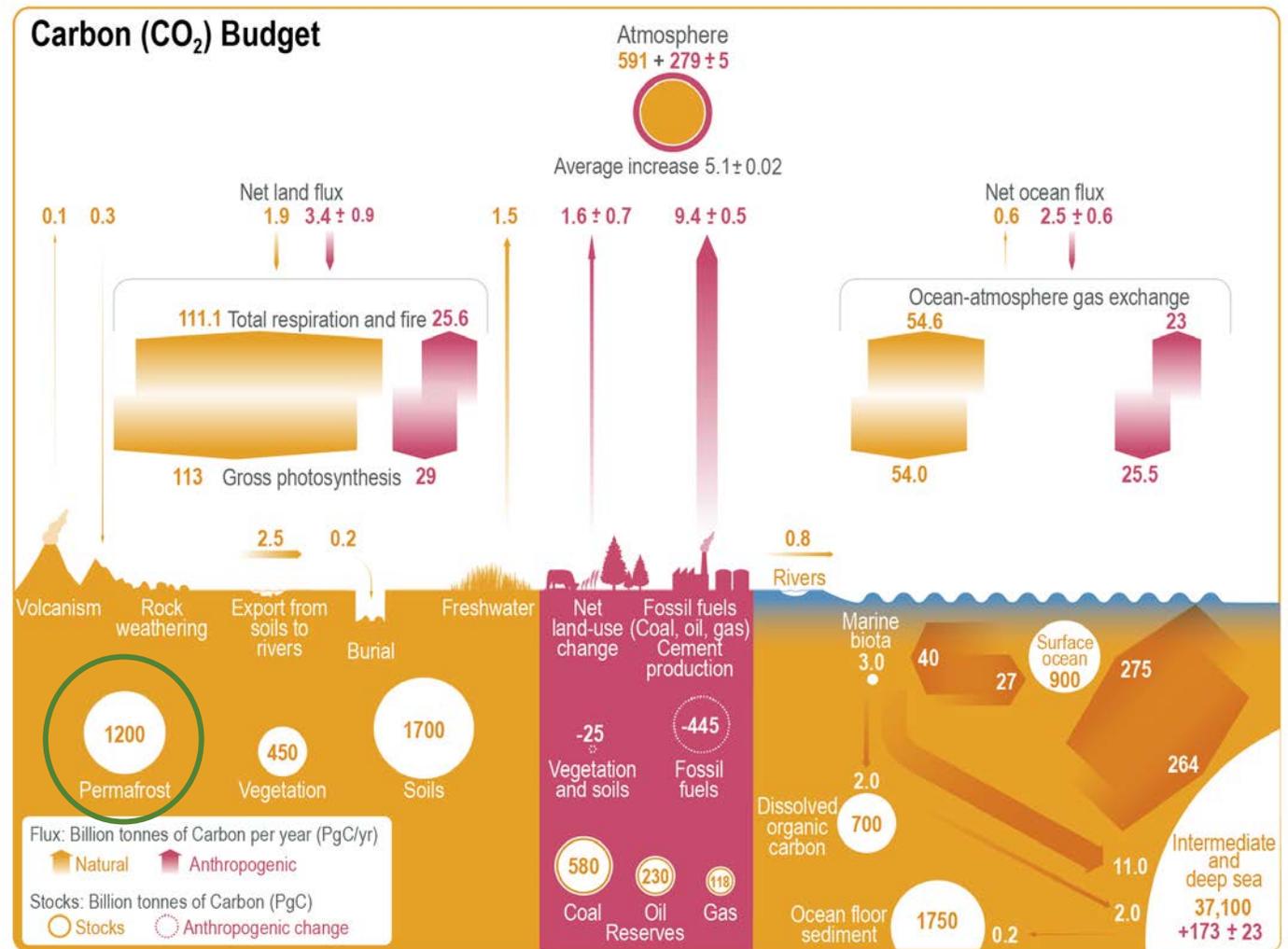


(Schuur et al., 2015)

# Un énorme réservoir de carbone

Supérieur aux réservoirs prouvés d'hydrocarbures, plus que deux fois le contenu en carbone de l'atmosphère (CO<sub>2</sub>)

(IPCC AR6 WGI Ch.5)



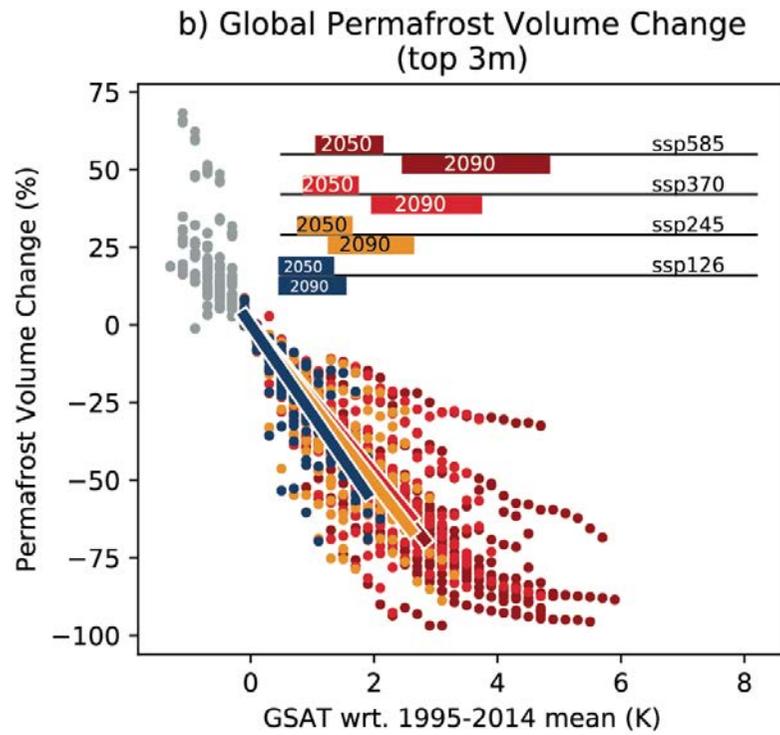
## Dégel du pergélisol



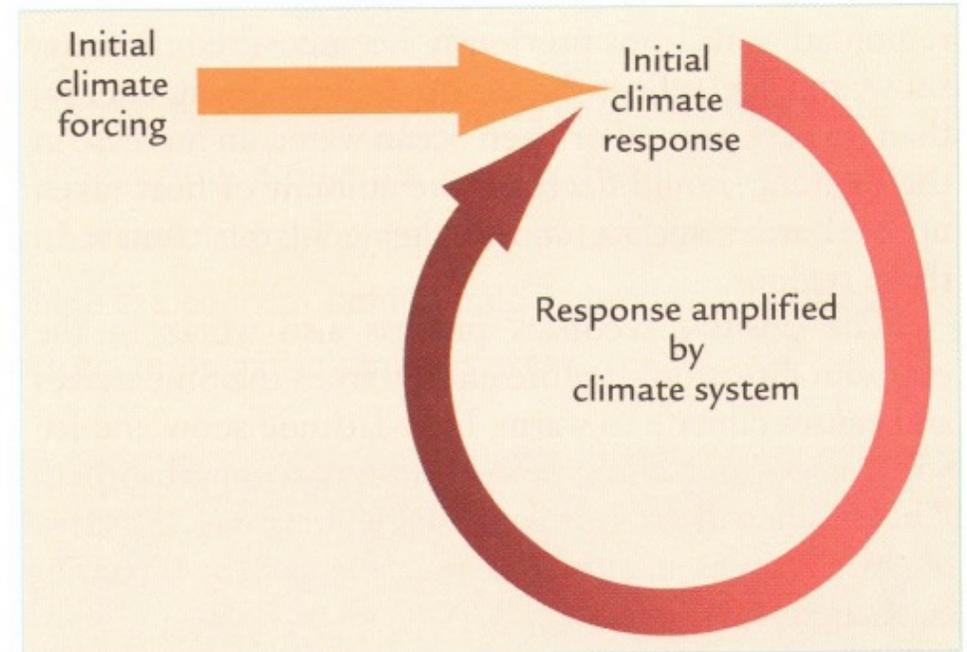
Le dégel peut causer :

- de la subsidence (la densité de l'eau est plus faible que celle de la glace)
- du thermokarst
- des émissions de CO<sub>2</sub> or méthane

## Rétroaction positive : réchauffement amplifié



(IPCC AR6 WGI Ch.9)



A Positive feedback

(Ruddiman, 2003)

# “La bombe de carbone du permafrost”

KATE YODER SCIENCE 03.15.26

## The Arctic's nature climate

Explore our content

nature > nature climate

Published: 25 Sept

Carbon Storage

### A permafrost

Claire C. Treat &



JEFFREY KERBY/NAT GEO IMAGE COLLECTION

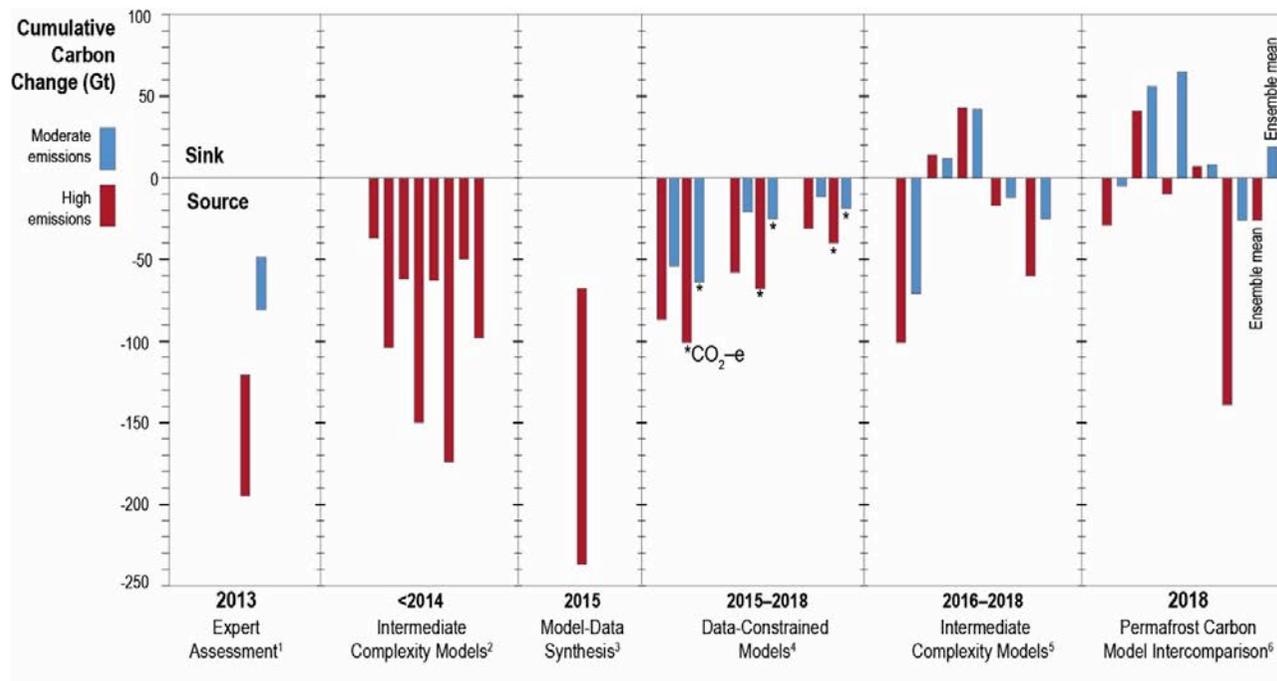
Climate and Environment

## The Arctic's carbon bomb might be even more potent than we thought

Permafrost is found mostly in the Northern Hemisphere, where it covers about ...

## Un consensus émergent

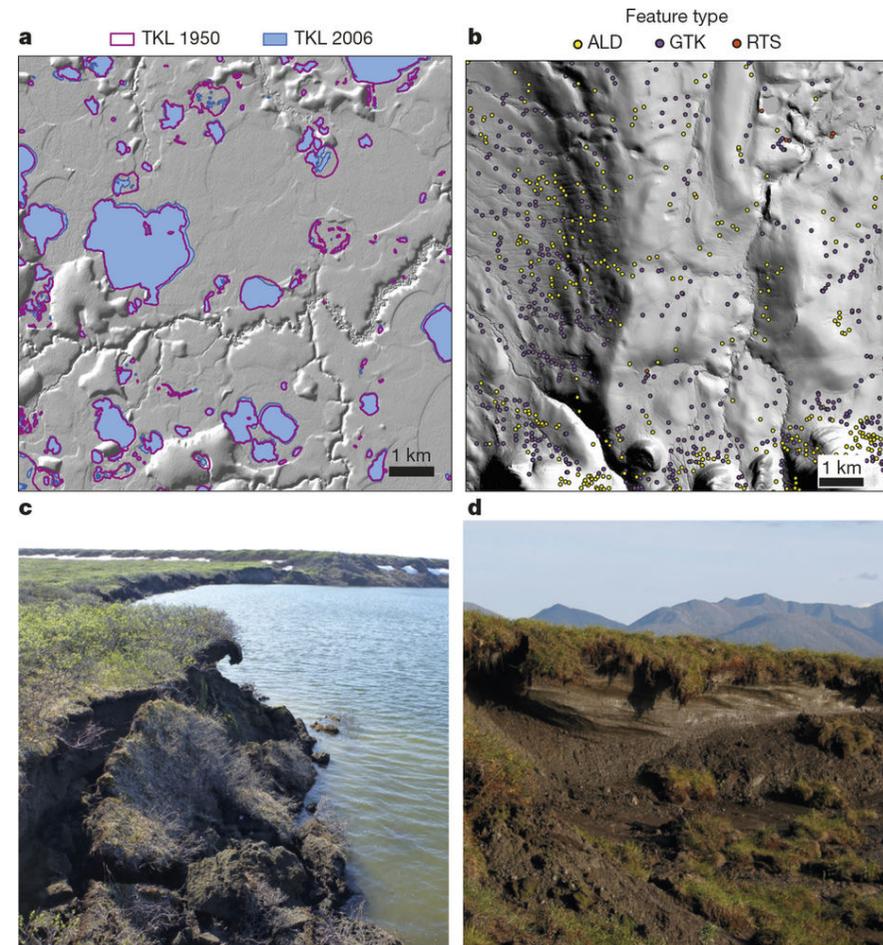
- Processus lent
- Pas de « bombe à carbone » lors de la dernière déglaciation
- Perte irréversible de carbone des pergélisols à long terme
- Amplification de jusqu'à 20% du réchauffement global (scénarios à faibles émissions)



Estimations du changement cumulatif de carbone net dans les sols de la régions de pergélisol circumpolaire en 2100 (IPCC SROCC, Ch. 3)

## Est-ce un « élément de bascule ? »

- Total :  $16 \cdot 10^6$  km<sup>2</sup>
- Forte hétérogénéité
- Région à risque de dégel abrupte :  $2.5 \cdot 10^6$  km<sup>2</sup>
- Subsidence locale, thermokarst
- Processus abrupte, mais local
- Emissions de CO<sub>2</sub> ou CH<sub>4</sub>
- Dégel abrupte favorisé par météo extrême (chaud, pluie)

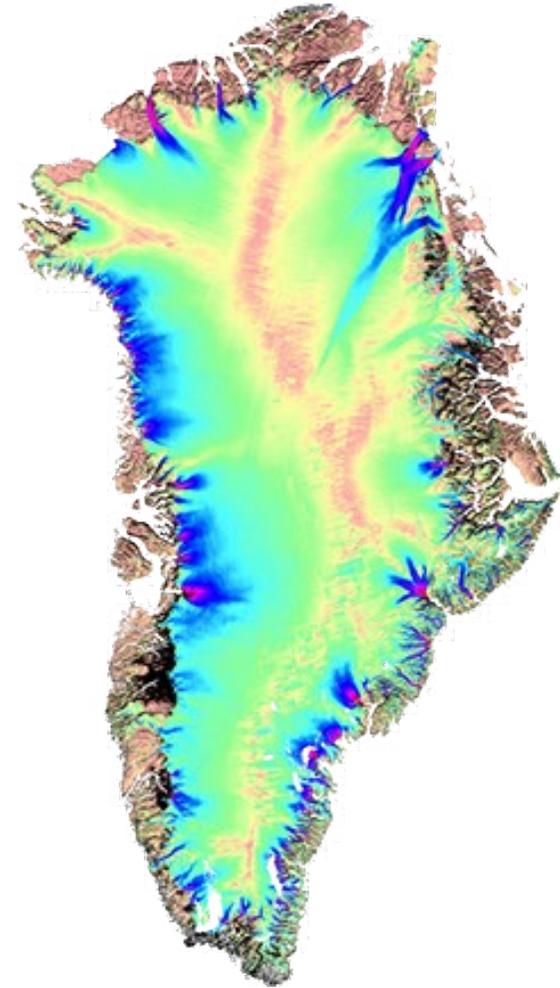
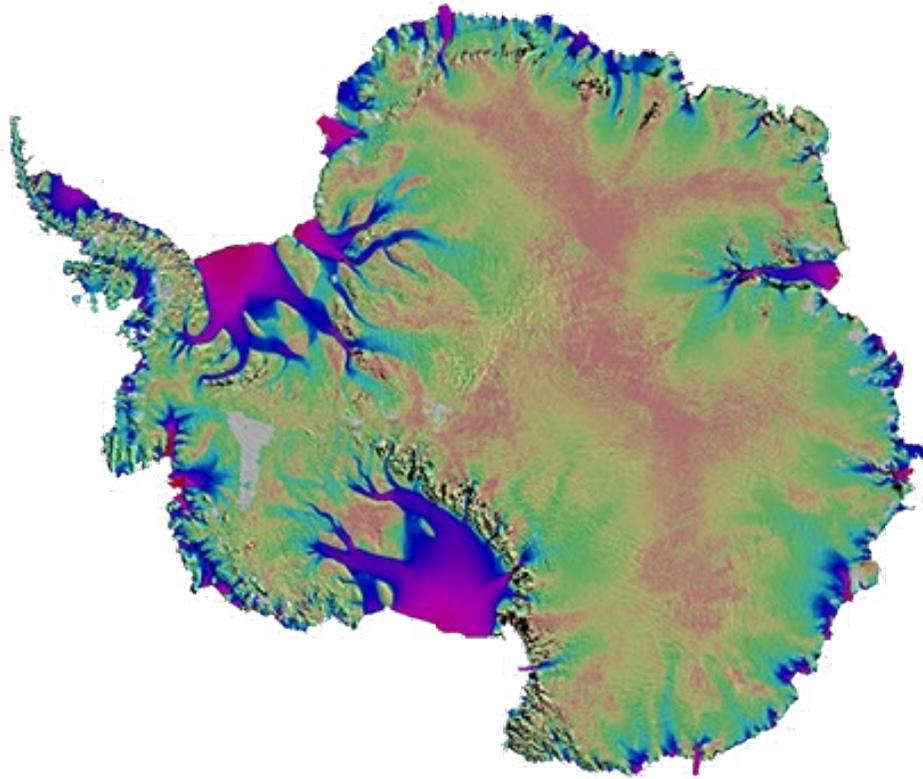


(Schuur et al., 2015)

## Calottes de glace

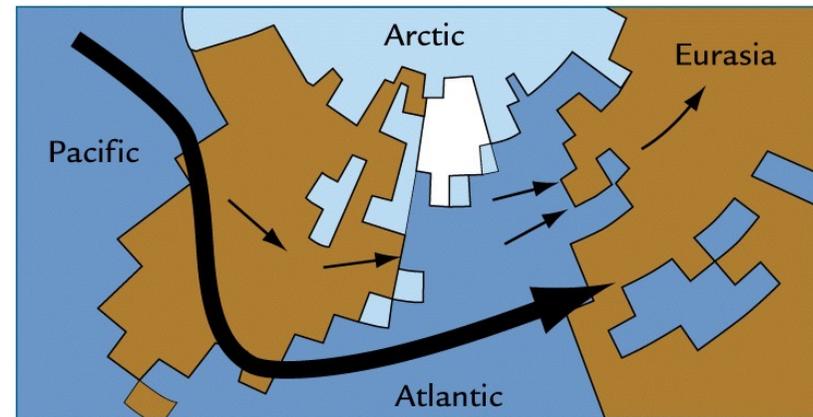
Groenland : ~ 7 m équivalent de niveau des mers

Antarctique : ~ 58 m équivalent de niveau des mers

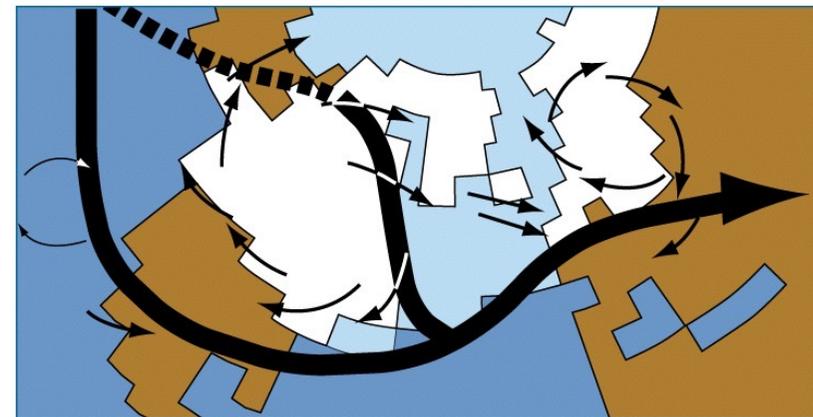


Les grandes calottes de glace peuvent « créer leur propre climat » et influencer la circulation atmosphérique à grande échelle

Exemple : Calottes de glace Laurentide et Fennoscandienne au Dernier Maximum Glaciaire, il y a 21000 ans



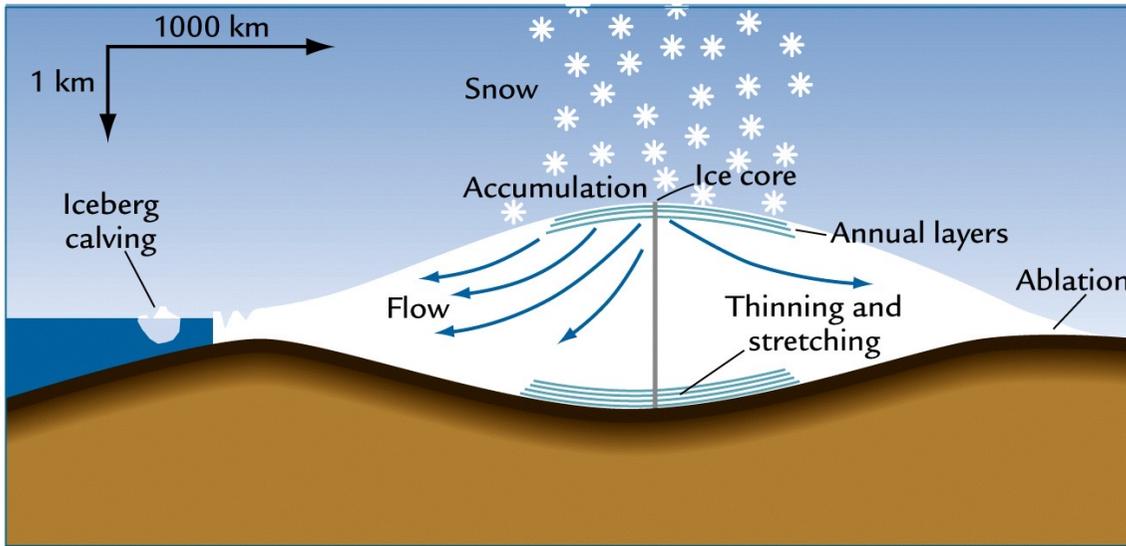
A Modern winters



B Glacial winters



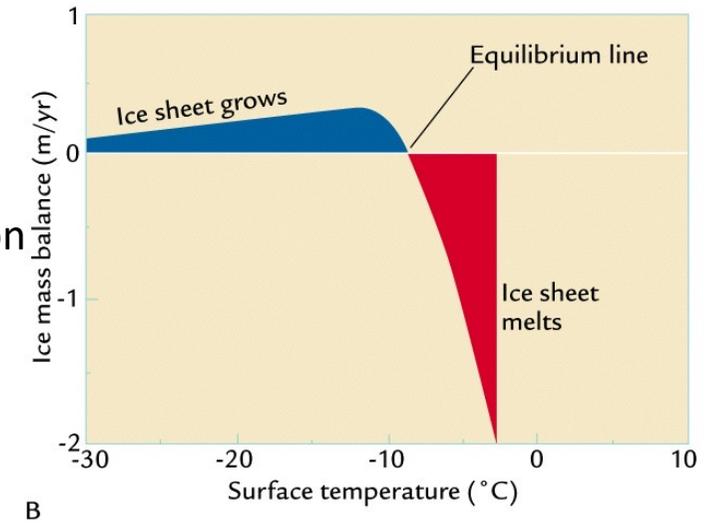
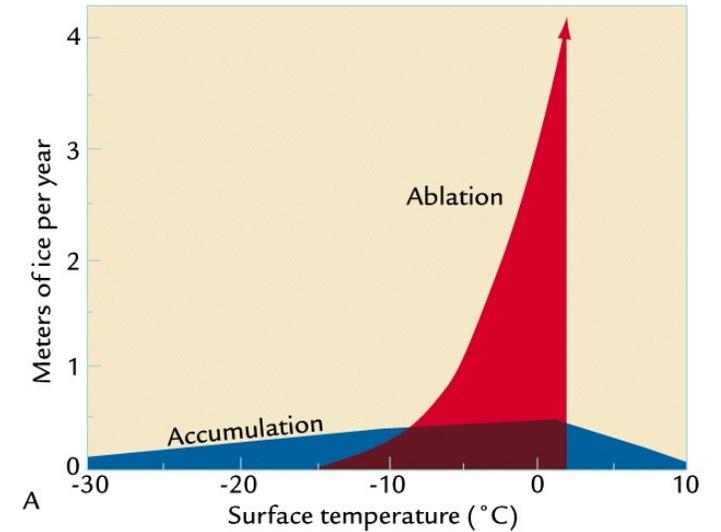
# Bilan de masse



B Continental ice sheets

- Accumulation (précipitation)
- Ablation (fonte, sublimation)
- Flux de glace
- Vêlage (icebergs)

Accumulation et ablation en fonction de la température moyenne (schématiquement)  
**Forte sensibilité à la température d'été !**

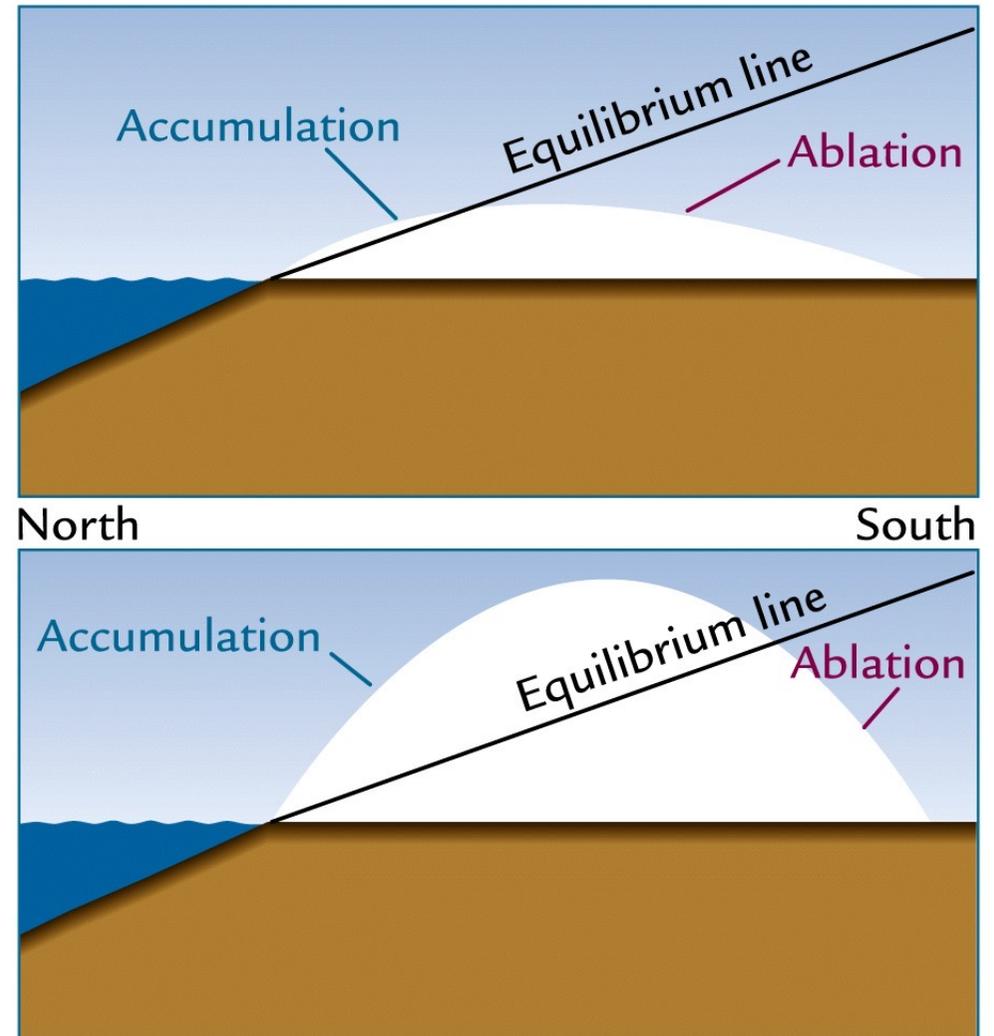


(Ruddiman, 2003)

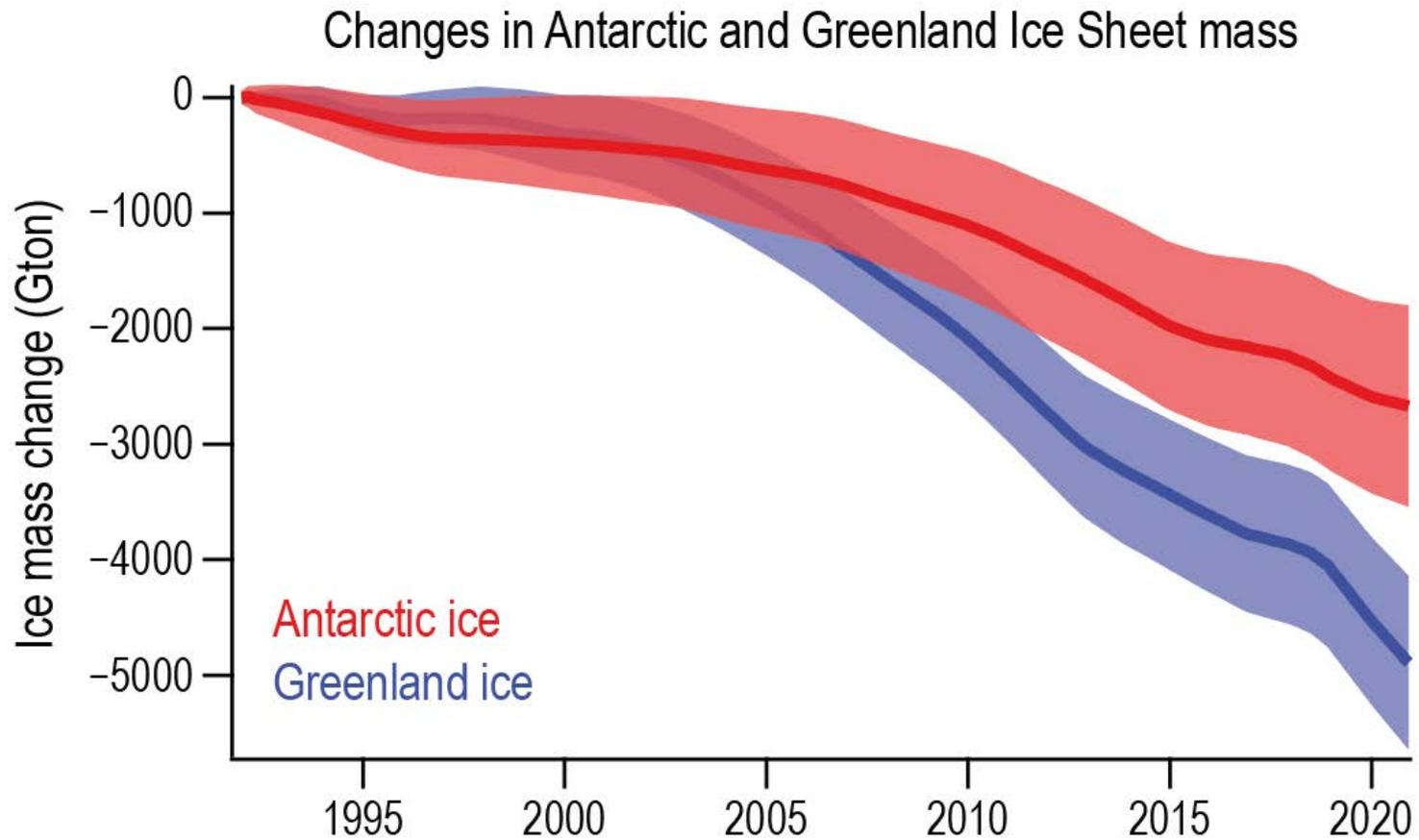
**Ligne d'équilibre** : Endroit où Accumulation = Ablation

La ligne d'équilibre dépend du climat, notamment des **températures d'été**

**Plusieurs équilibres possibles**

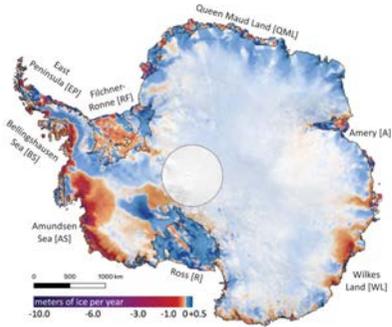


## Perte de masse observée des grandes calottes de glace

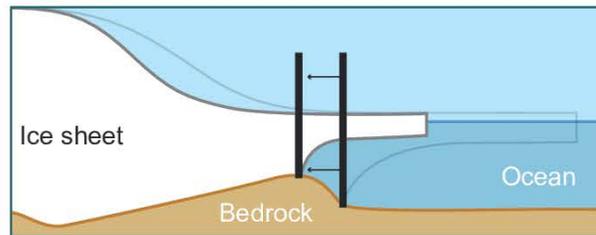


Pertes pas uniquement à cause de la fonte « gentille » en surface !

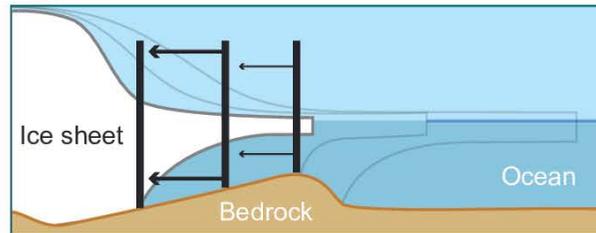
## Deux types d'auto-amplification de la fonte des calottes de glace



### Melting driven by ocean temperature



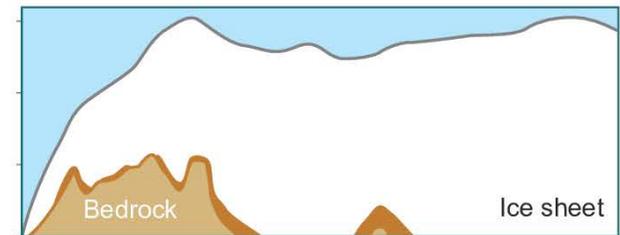
When bedrock dips seaward or is flat, the retreat stops when warming stops. When ice sheet retreats, **less ice** is released into ocean



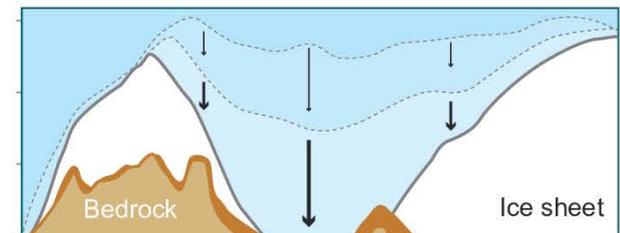
When bedrock dips landward the retreat is quick and self-sustained. When ice sheet retreats, **more ice** is released into ocean – ice sheet retreats further

Irréversible et potentiellement abrupte

### Melting driven by air temperature



The ice sheet is very thick therefore its surface is very high and the air at high altitude is very cold



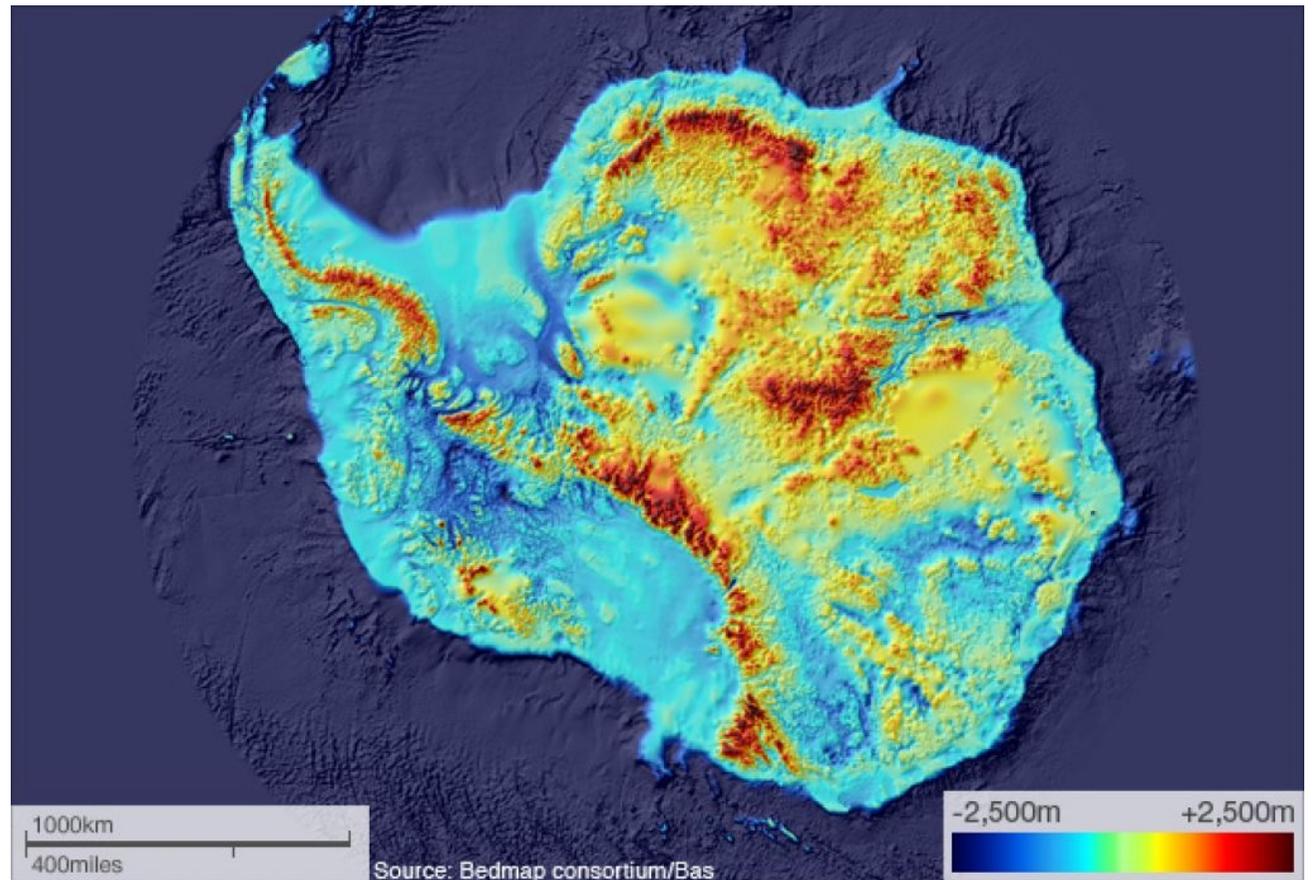
As the ice sheet melts, its **surface goes down** until it reaches a threshold, where the surrounding air is warmer and melts the ice even more quickly

Potentiellement irréversible, pas abrupte

(IPCC AR6 WGI Ch 9)

## Calottes marines

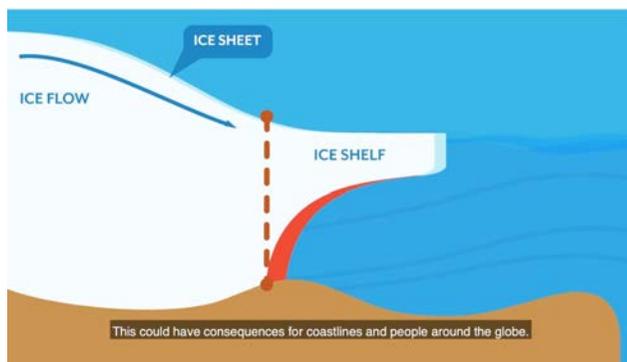
La calotte de glace  
Antarctique est en  
grande partie basée sous  
le niveau des mers



(Fretwell et al., 2013)

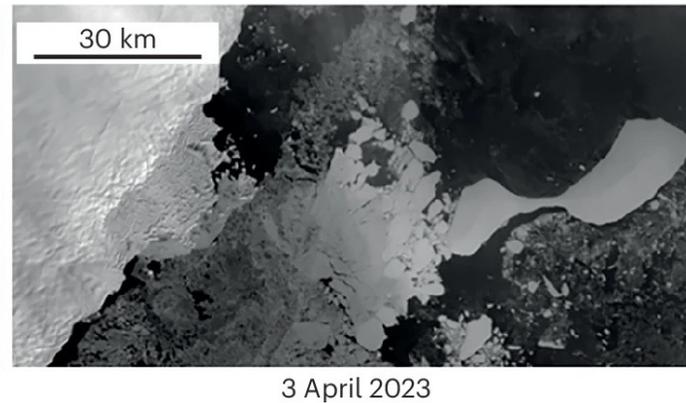
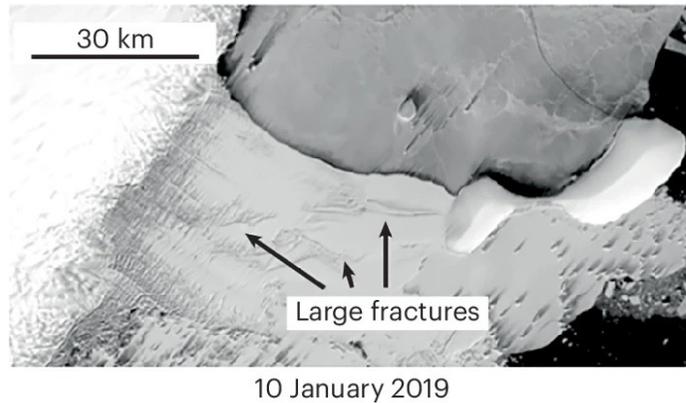
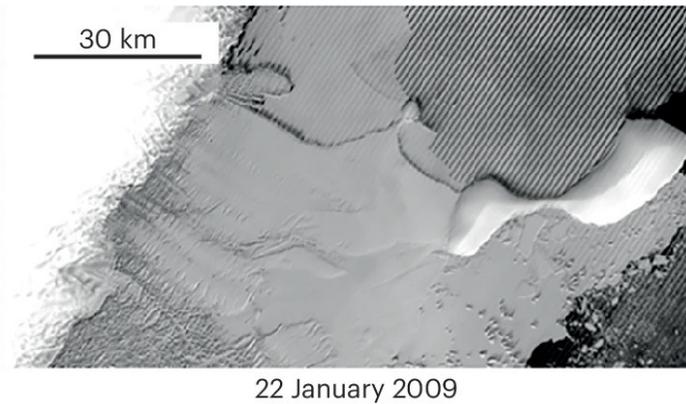
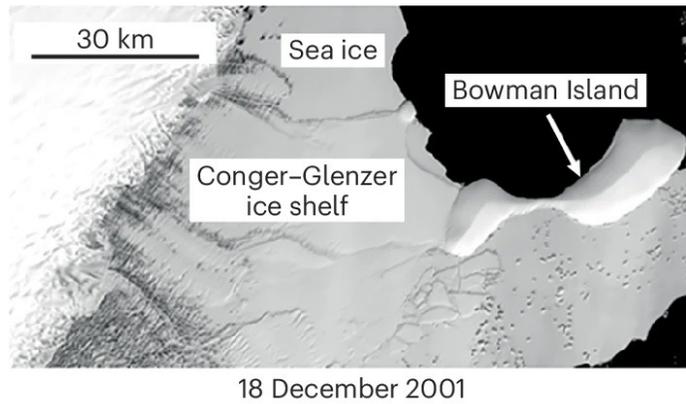
## Désintégration d'une plate-forme glaciaire

Début « classique » d'une instabilité d'une calotte marine



Processus apparemment abrupte qui se déroule en réalité sur des décennies

Amincissement graduel, perte d'appui mécanique, formation de fractures, désintégration finale



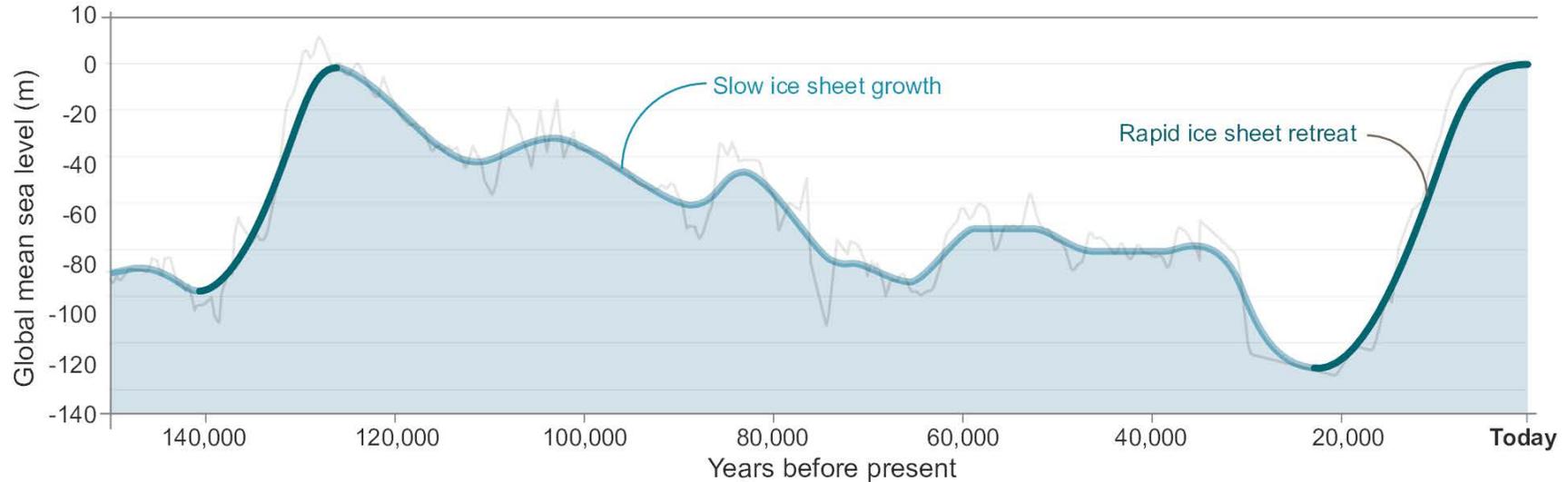
(Alley, 2024)

## Irréversibilité

Irréversibilité liée aux échelles de temps :  
temps de construction d'une calotte  $\gg$  temps d'effondrement/fonte

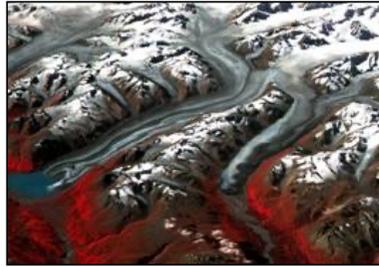
### FAQ 9.1: Can melting of the ice sheets be reversed?

Once ice sheets are **destabilised**, it takes them tens of thousands of years to re-grow.  
These changes strongly affect **sea level**.

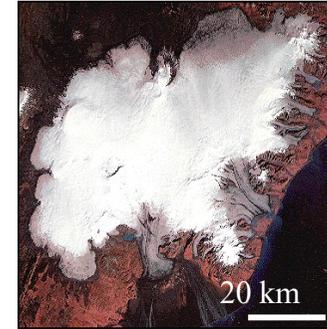


# Glaciers

C'est où ?



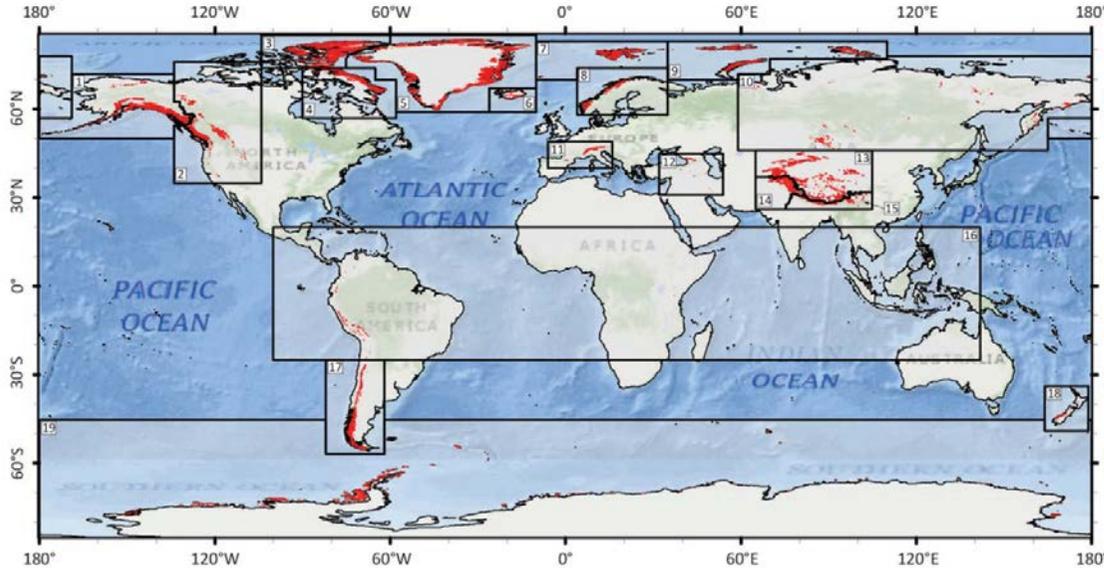
Alaskan icefields



Vatnajökull  
(Iceland)



Kilimandjaro



(Pfeffer et al., 2014;  
Farinotti et al., 2019)

Area = 700 000 km<sup>2</sup>  
Mean thickness = 150 m  
Number : >200 000?

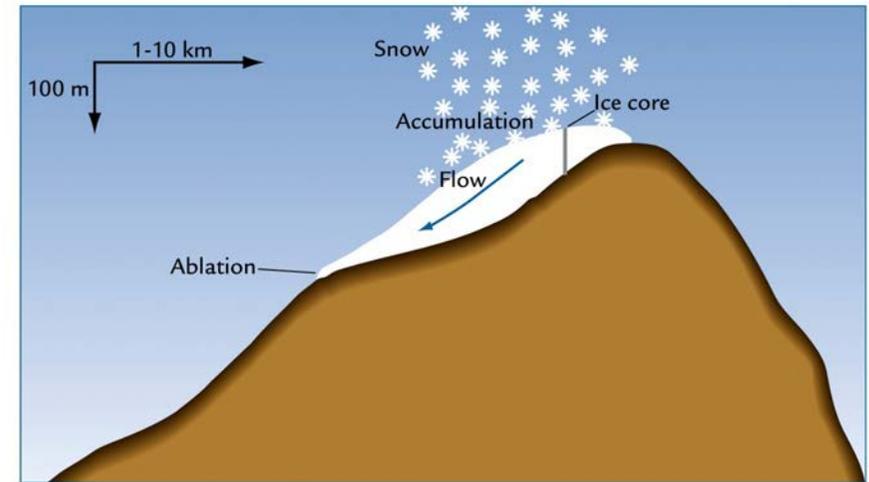
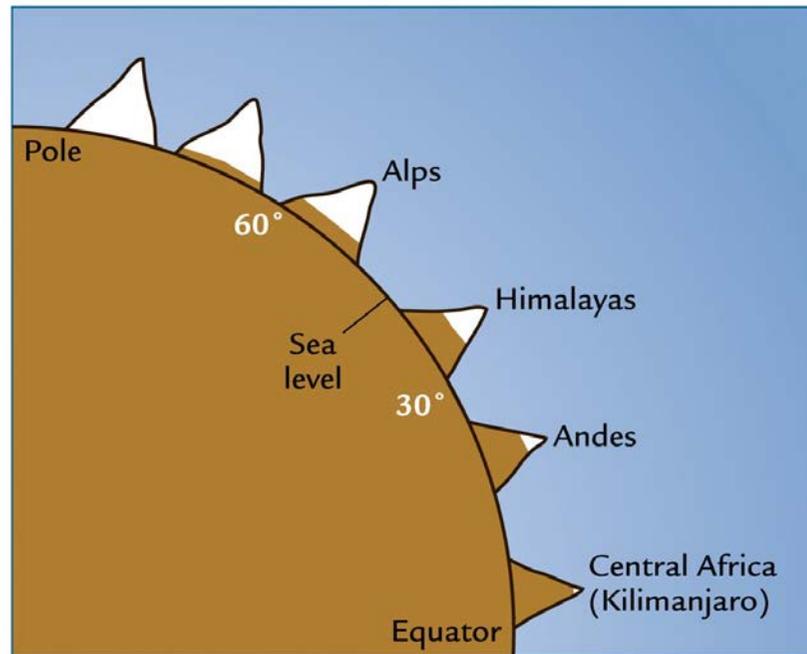


Mer de Glace

## Comment ça marche ?

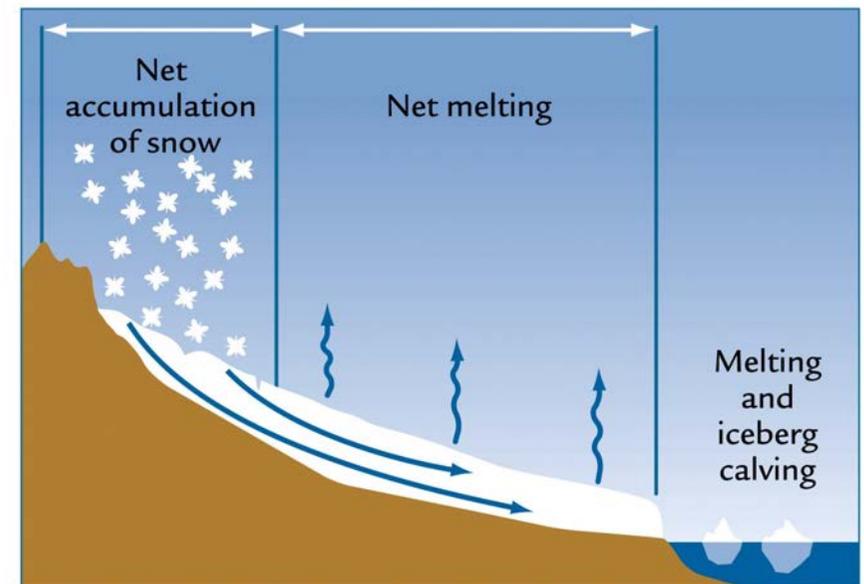
Mêmes concepts de base que pour les calottes de glace :

- Bilan de masse
- Accumulation
- Ablation
- Flux
- Ligne d'équilibre



A

Mountain glaciers

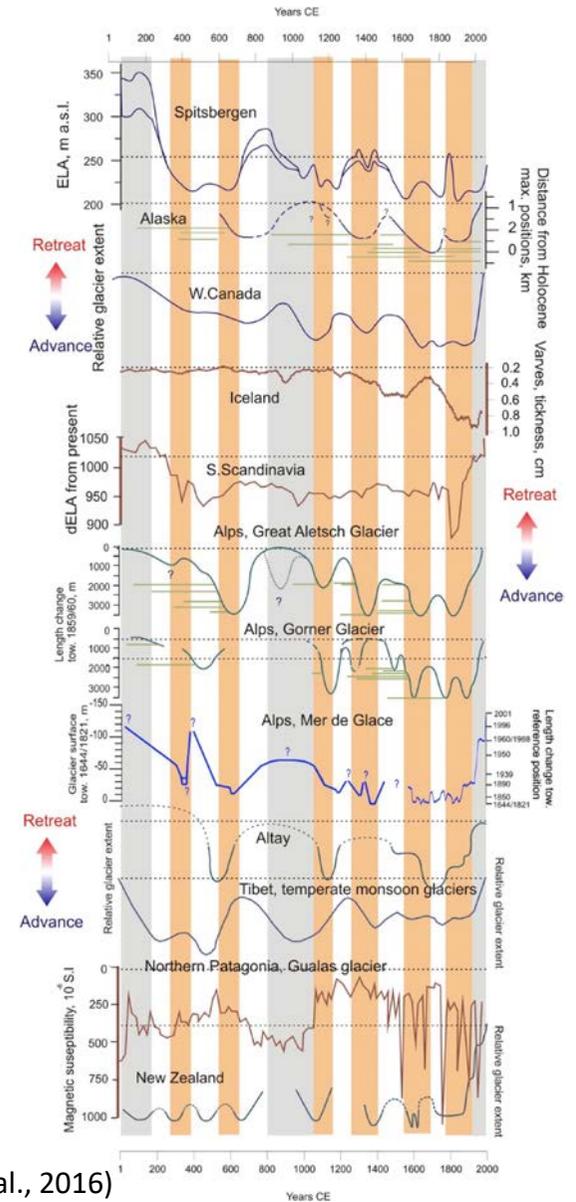
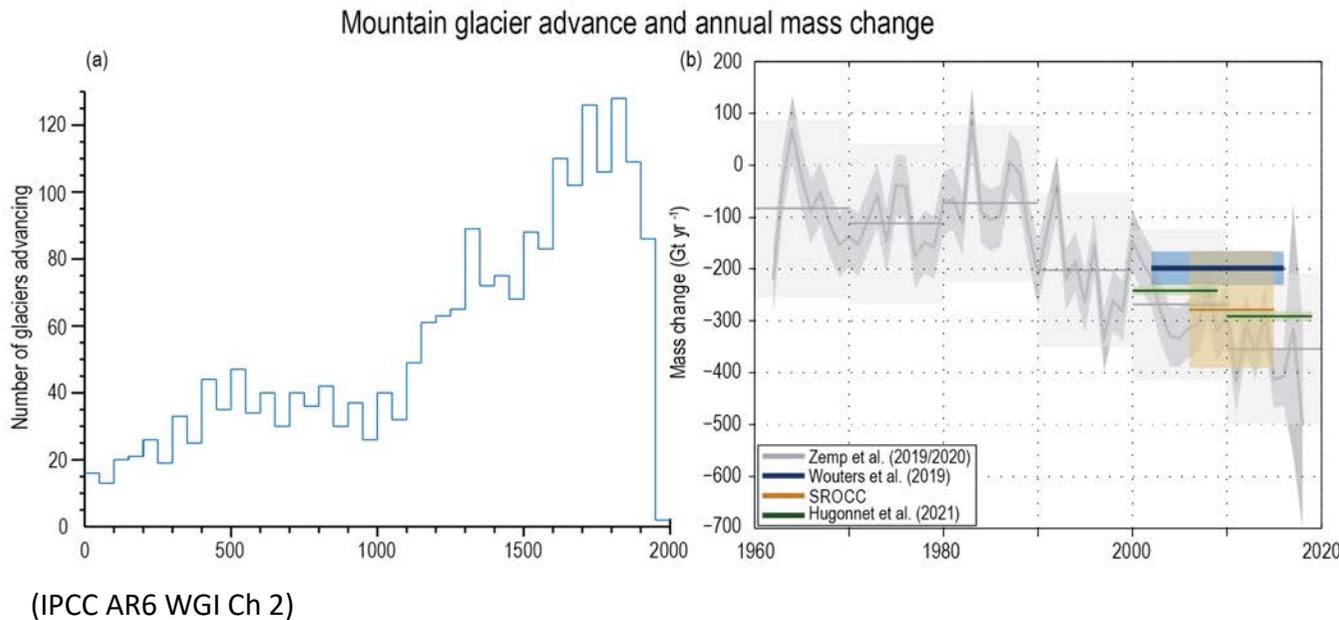


# Une histoire variée, un recul sans précédent « récent »

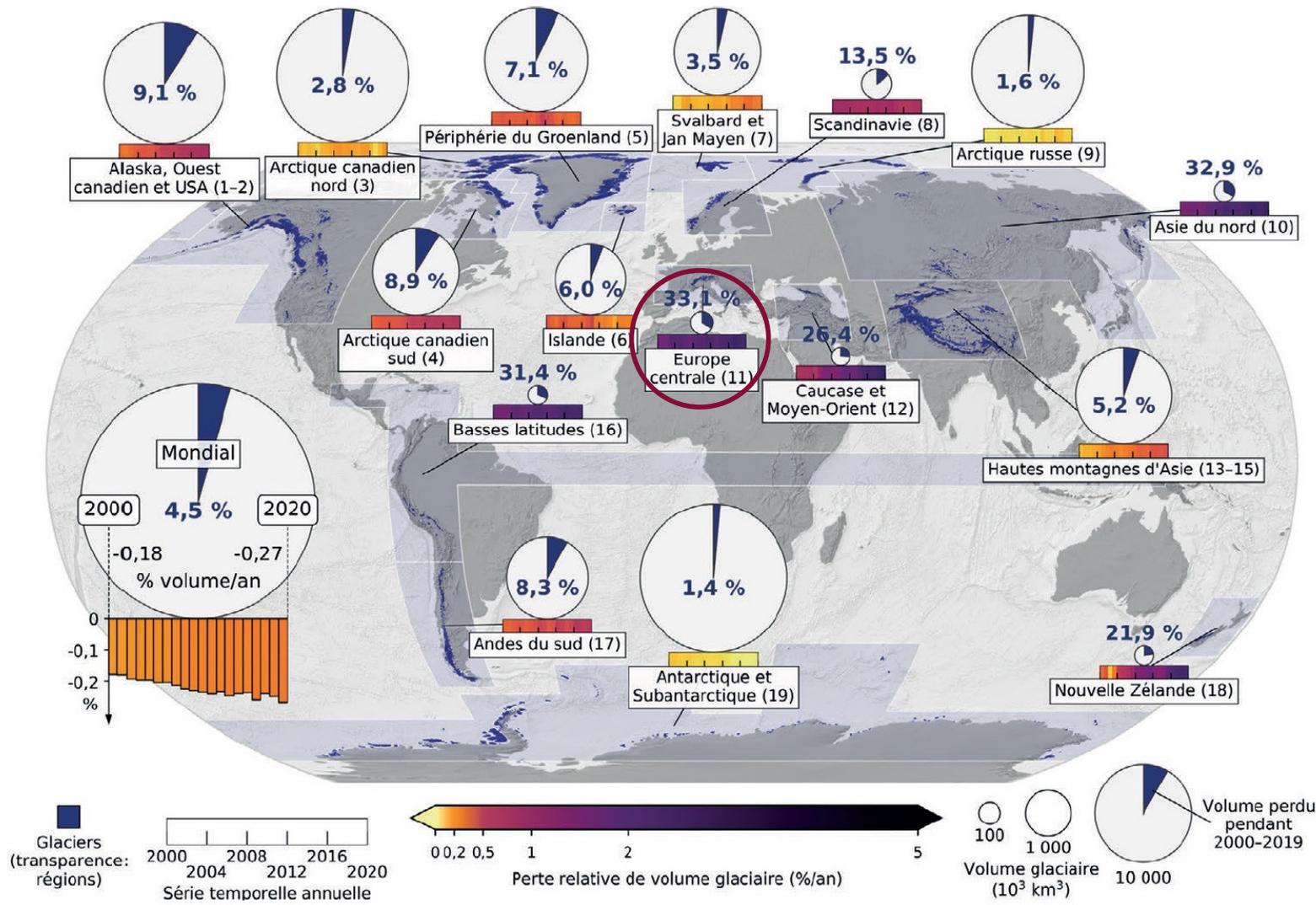
A très long terme, ré-englacement des Alpes depuis ~ 6000 ans : étés plus froids (variations de l'orbite de la Terre)

Aux plus courtes échelles de temps, fortes variations entre régions

Recul global récent sans précédent



# Perte de masse

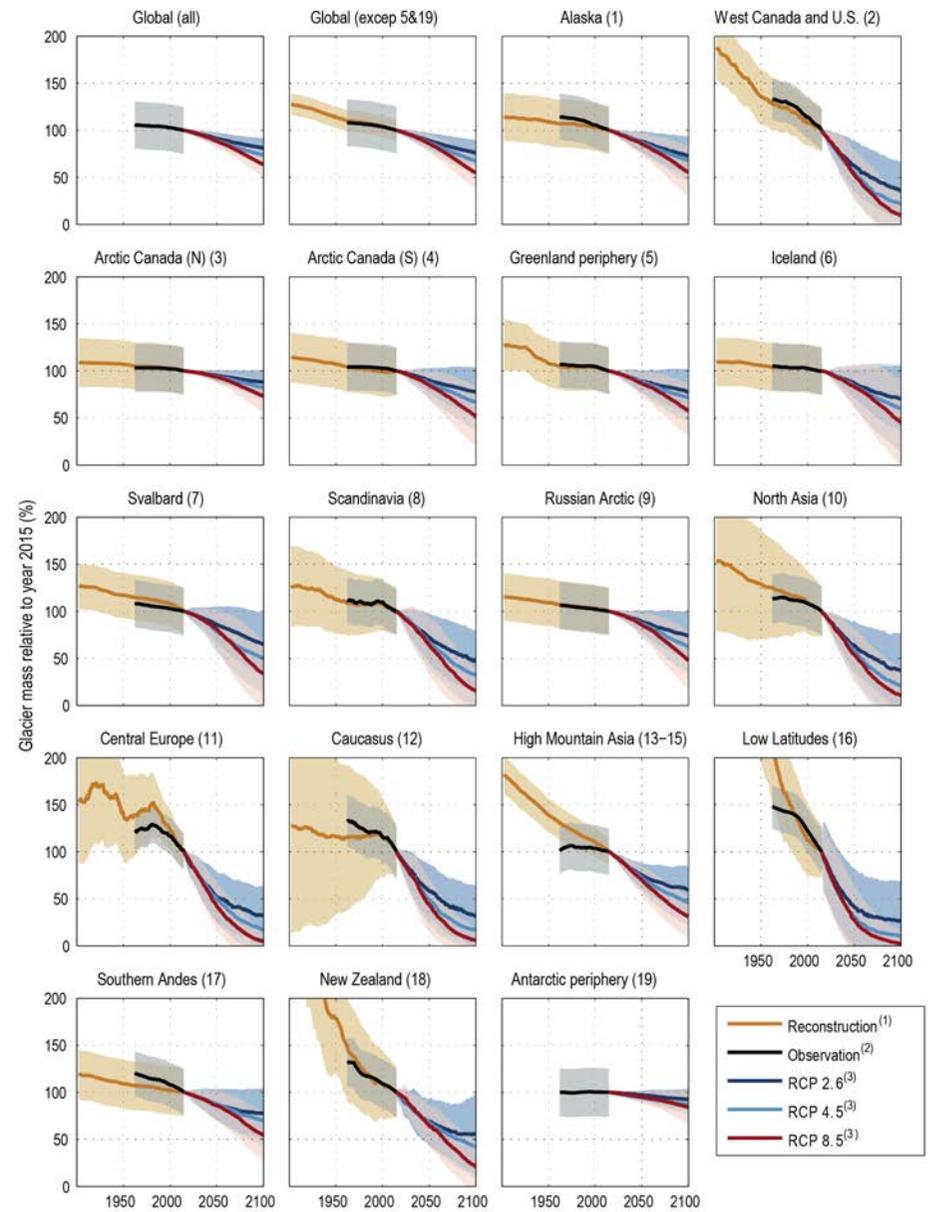


Europe : 33 % du volume total des glaciers perdu entre 2000 et 2020

(Hugonnet et al., 2022)

# Projections globales

Pertes dans toutes les régions, particulièrement fortes dans les zones où les glaciers sont petits



(IPCC AR6 WGI Ch.9)

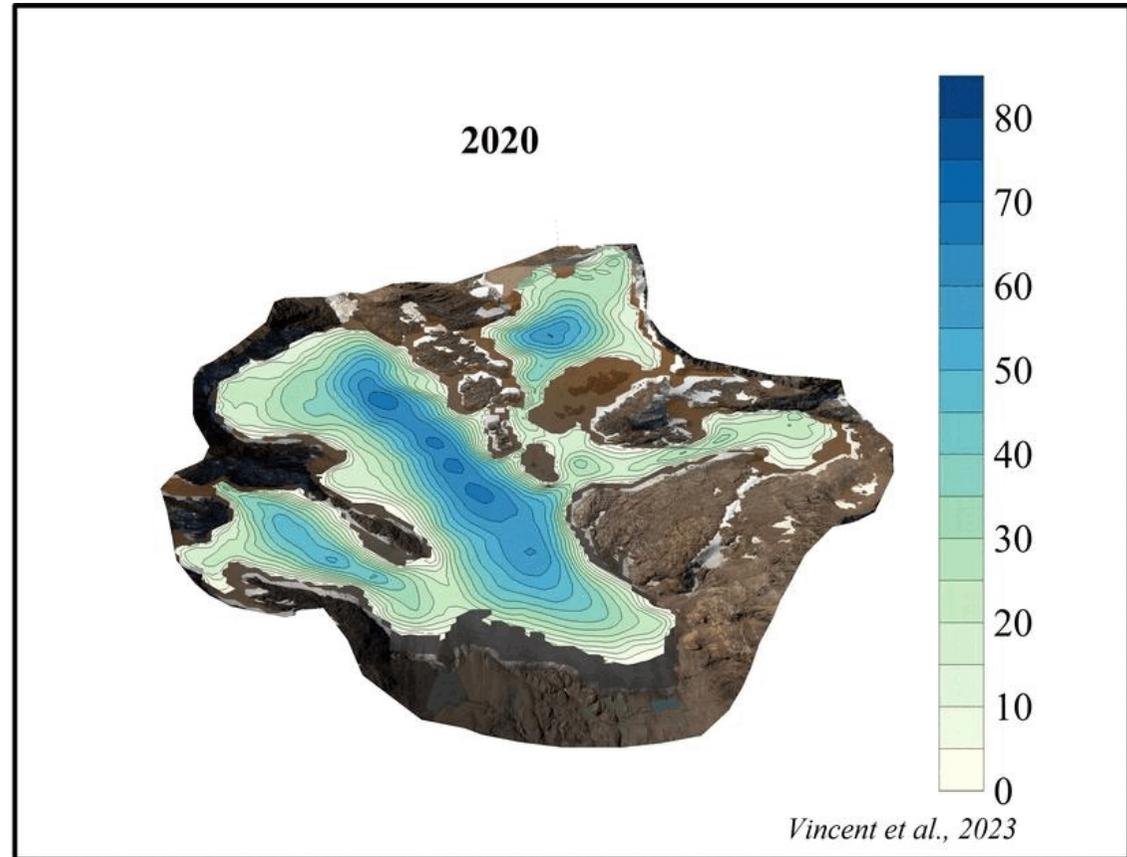
## Le Glacier de St Sorlin : Evolution future dans un scenario “moyen”

(RCP4.5, type “+3°C en 2100”)

2022



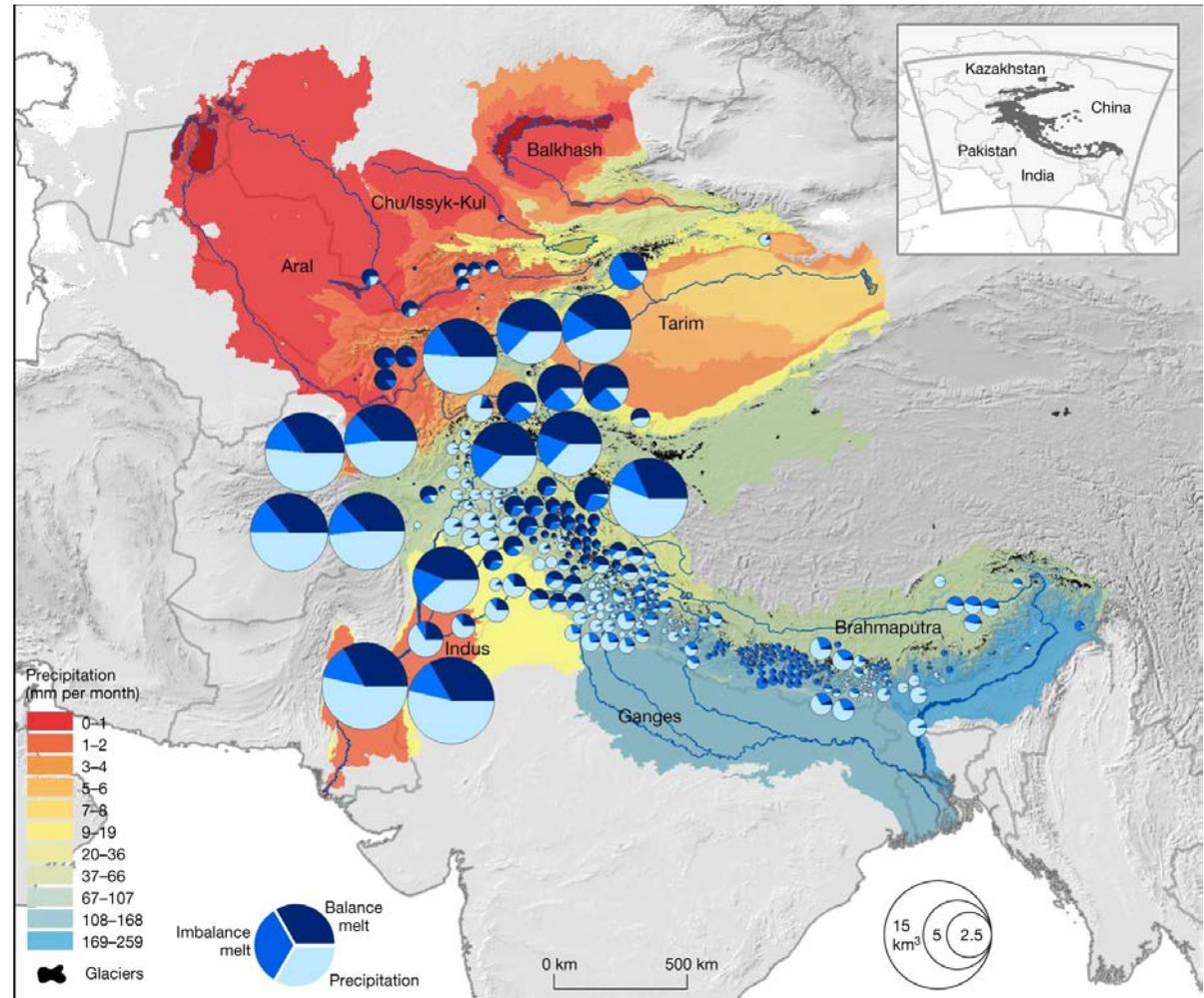
2020



## Les glaciers comme ressource d'eau

Les glaciers sont des ressources en eau fiables en cas de sécheresse pour la partie occidentale de l'Asie

Contribution relative de la fonte des glaciers et des précipitations au débit des rivières en Asie de haute montagne pour une année de sécheresse



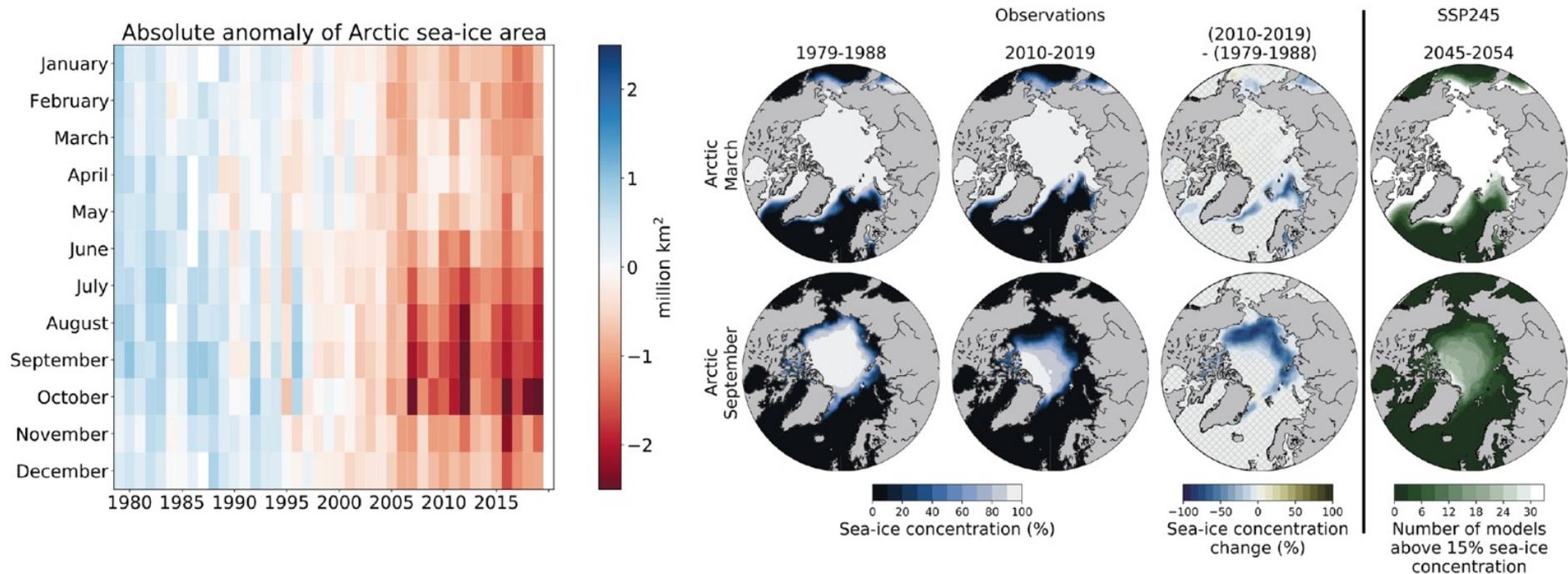
[Pritchard, Nature, 2019]

# Glace de mer

Diminution très claire en Arctique

## Arctic sea-ice historical records and CMIP6 projections

Anomaly time series, maps of seasonal sea-ice concentration and changes, and projected sea-ice metrics in SSP2-4.5

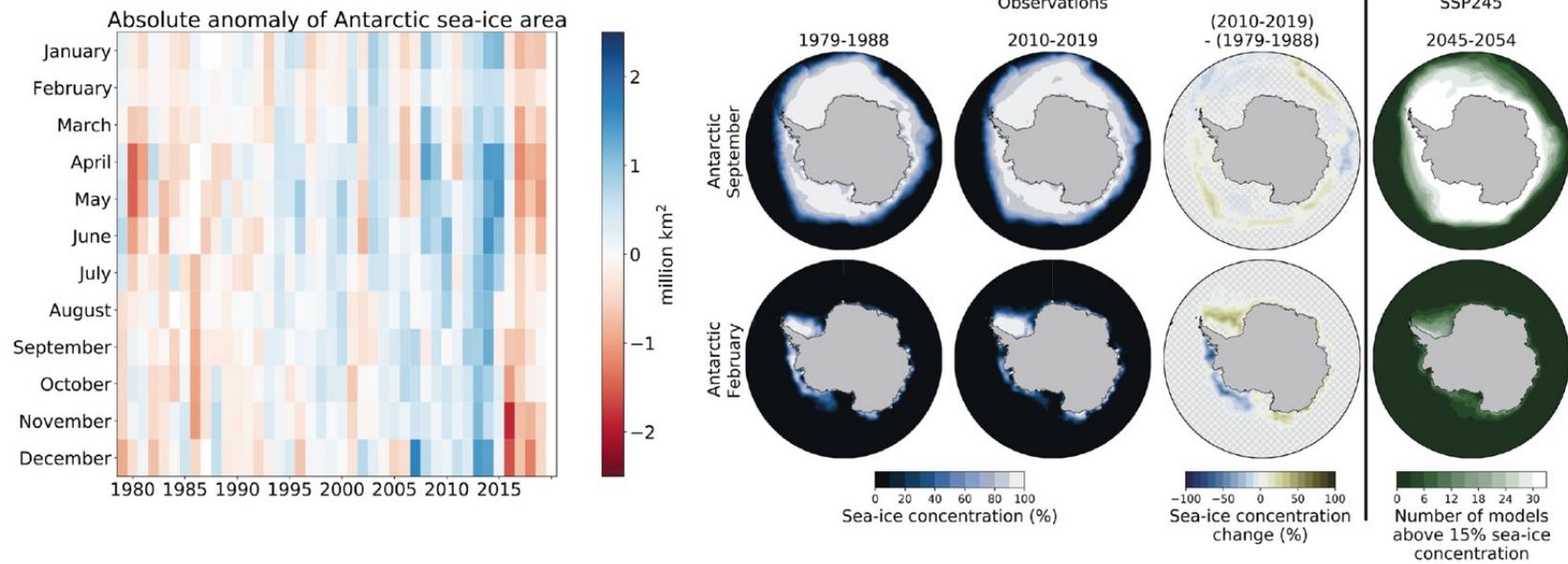


(IPCC AR6 WGI Ch.9)

Situation beaucoup moins claire en Antarctique

### Antarctic sea-ice historical records and CMIP6 projections

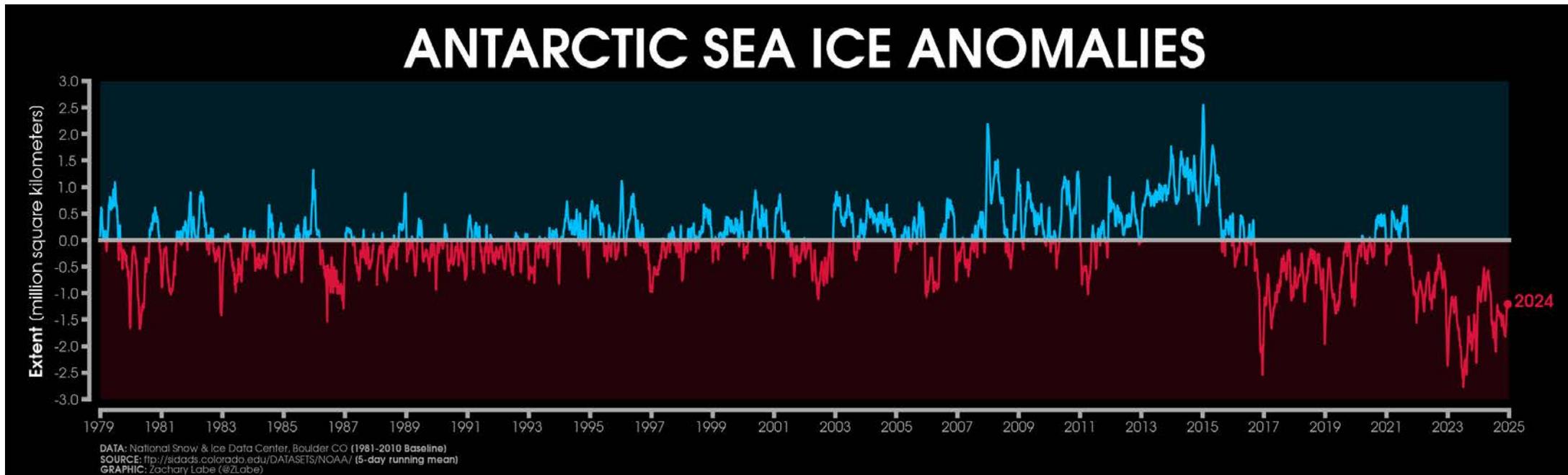
Anomaly time series, maps of seasonal sea-ice concentration and changes, and projected sea-ice metrics in SSP2-4.5



(IPCC AR6 WGI Ch.9)

Forte variabilité régionale et temporelle

Diminution « récente » (depuis 2017) attendue depuis longtemps

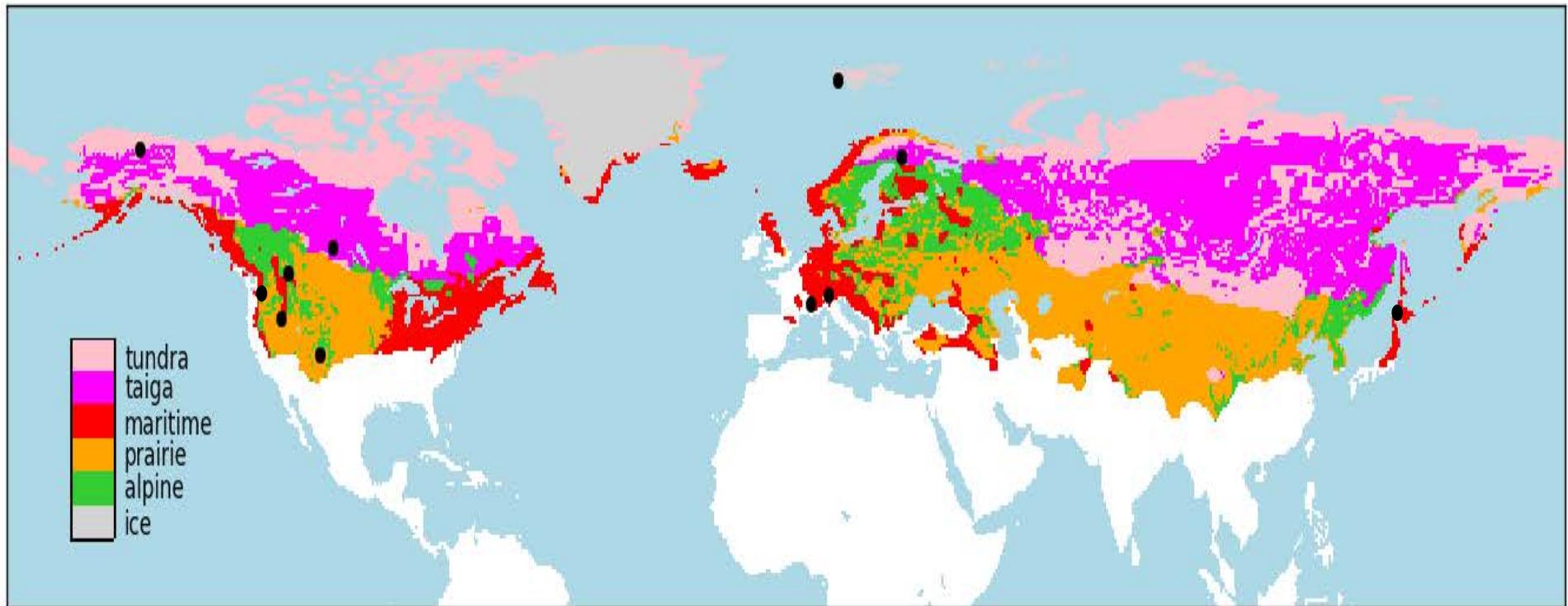


(Zack Labe)

Changements futurs réversibles, probablement pas abrupts (dans la limite du changement climatique attendu au cours des 100 prochaines années)

## Neige saisonnière

Élément dominant de la cryosphère en termes de superficie : jusqu'à 50 millions de km<sup>2</sup>



Classification des types de neige par Sturm et al. (1995)

# Changements observés

Tendances opposées entre grandes régions dans la première moitié du 20<sup>e</sup> siècle

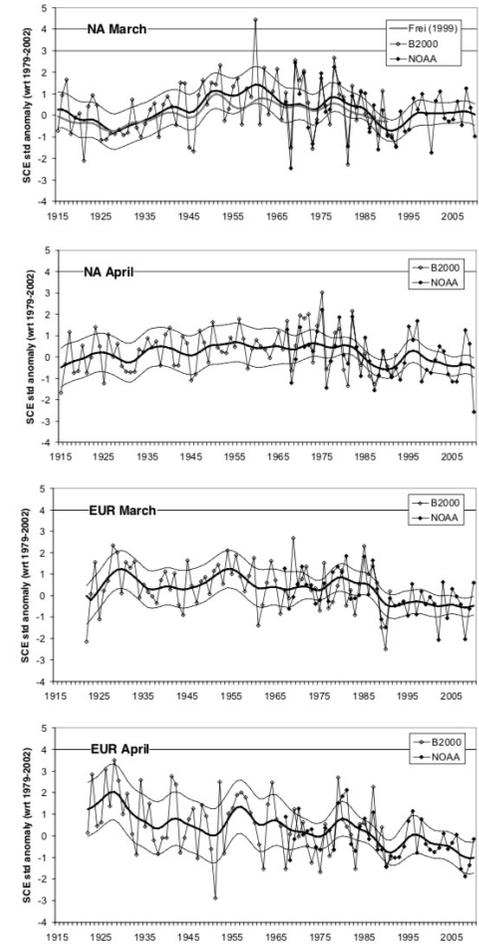
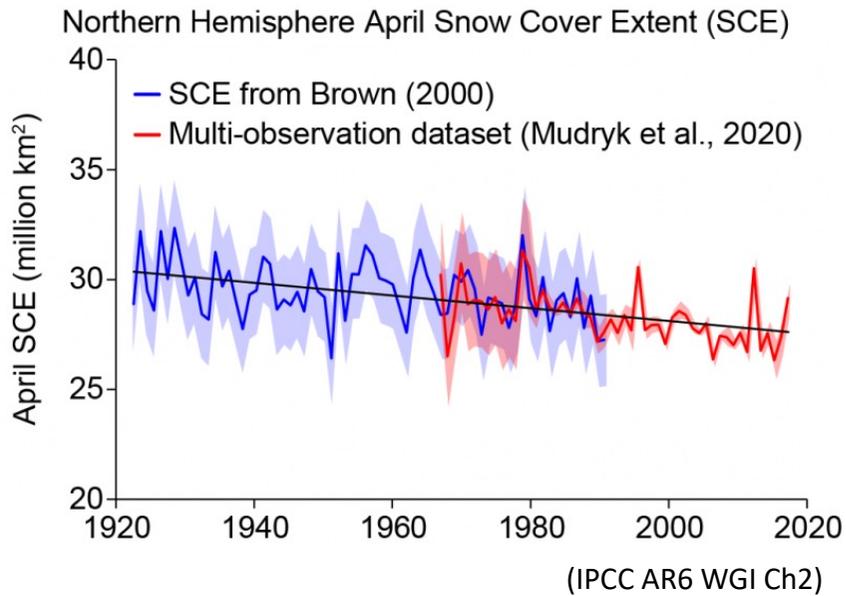
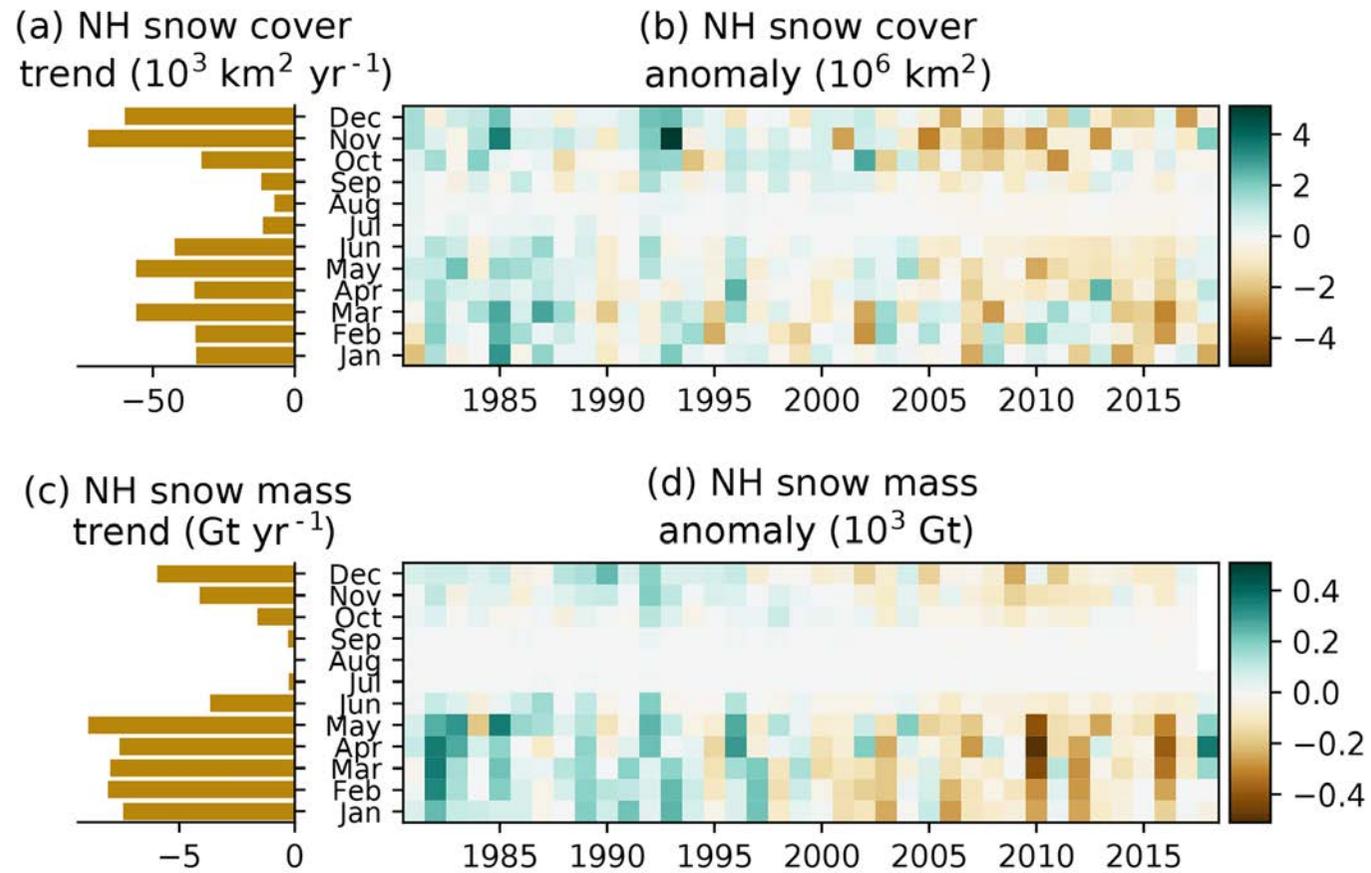


Fig. 4. Variability in NA and EUR March and April SCE anomalies over the periods of available data with 13-term filtered values of the mean and 95% confidence interval. The grey smoothed line in NA March is filtered values of the Frei et al. (1999) reconstruction. The width of the smoothed confidence interval is also influenced by the interannual variability in SCE.

(Brown & Robinson, 2011)

Combinaison de multiples produits de satellite et réanalyses



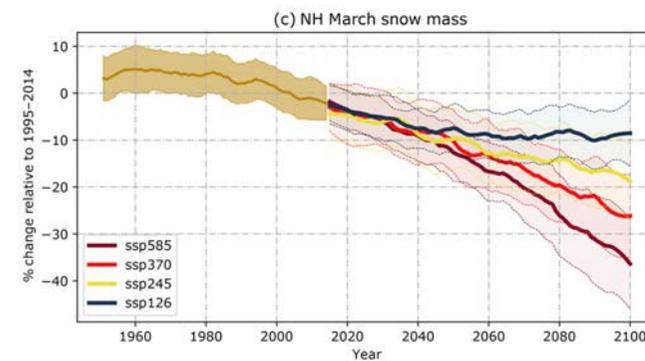
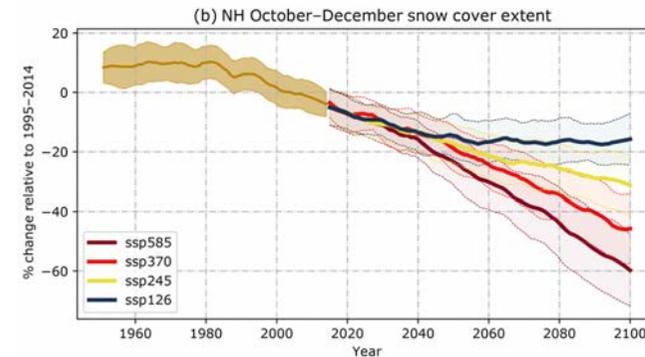
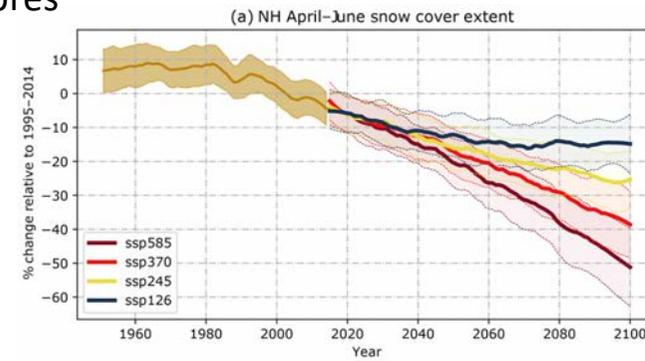
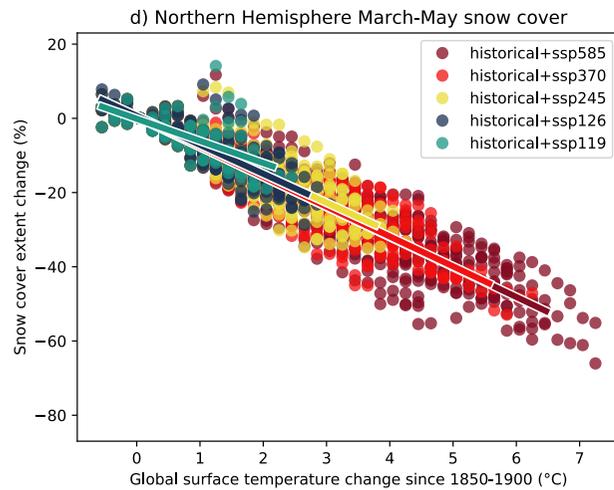
(Mudryk et al., 2020)

## Projections futures

Les scénarios divergent après environ 20 ans (à droite)

Couverture de neige au **printemps**, hémisphère nord : essentiellement une fonction linéaire de la température moyenne globale.

Sensibilité  $\approx -8\%/^{\circ}\text{C}$



Aucune irréversibilité, pas de changement abrupte

(Mudryk et al., 2020)