## *EcoClim* – 2022

# Variations climatiques et points de bascule

D. Paillard LSCE - IPSL

didier.paillard@lsce.ipsl.fr









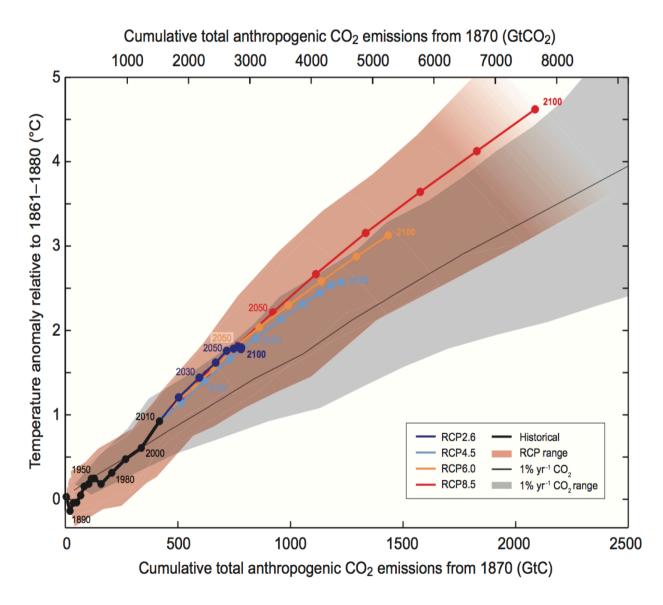


# Plan

- Dansgaard-Oeschger
- Heinrich
- Déglaciation, MWP, cycles glaciaires
- Boule de neige
- Points de bascule et climat futur
- En fait, quelle est la question?

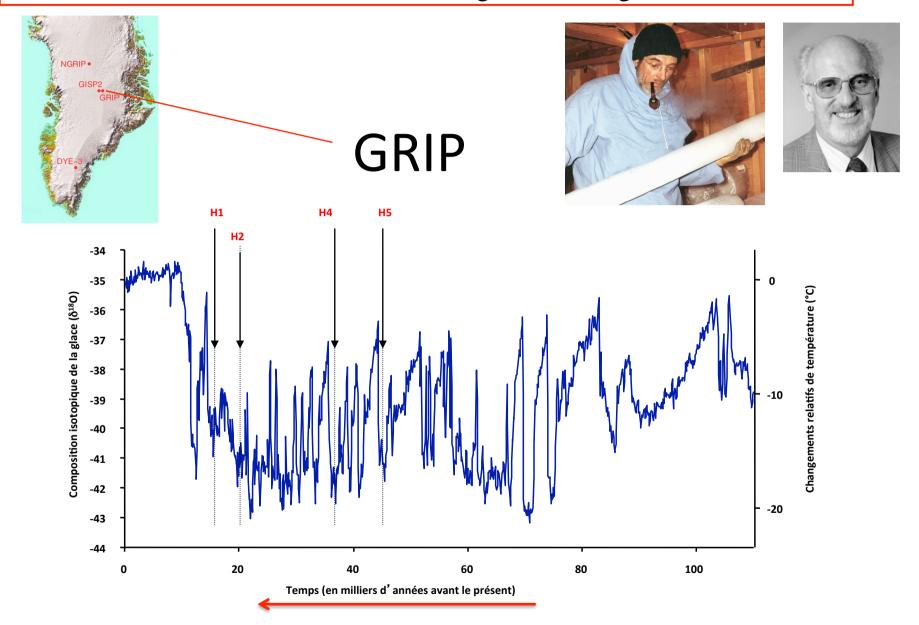
#### La température semble liée simplement (linéairement) aux émissions de CO<sub>2</sub>





(IPCC 2014)

# Les événements de "Dansgaard-Oeschger"



#### GIEC 2001 : apparition des "surprises climatiques"

#### Résumé technique du Groupe de travail I :

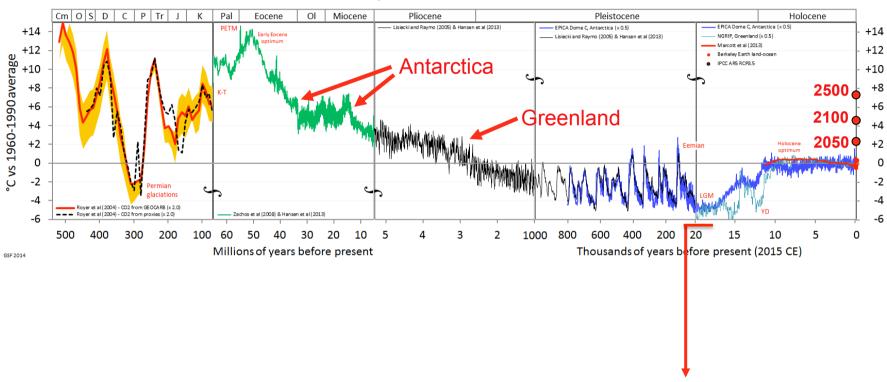
« Le forçage rapide d'un système non-linéaire a de grandes chances de nous réserver des surprises. »

#### « Changement climatique rapide

La non-linéarité du système climatique peut entraîner des changements climatiques rapides, appelés parfois événements brusques, voire surprises. Certains de ces événements brusques sont concevables, comme la réorganisation spectaculaire de la circulation thermohaline, la déglaciation rapide ou la fonte massive du pergélisol entraînant de rapides changements dans le cycle du carbone. D'autres peuvent être totalement imprévisibles, par exemple lorsqu'ils sont causés par un puissant forçage, en évolution rapide, d'un système non linéaire. »

# Les climats de la Terre

#### Temperature of Planet Earth

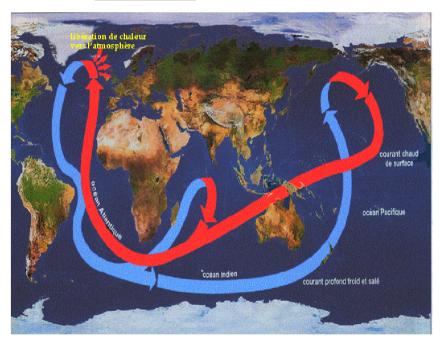


#### Dernière période glaciaire:

- événements de Dansgaard-Oeschger
- événements de Heinrich

# Les événements de "Dansgaard-Oeschger"

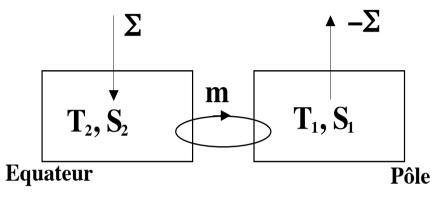
# **Bascule** bi-polaire



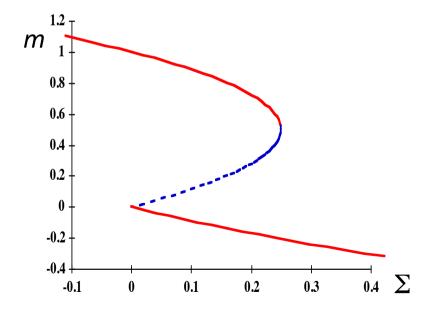


Le Jour d'après (The Day After Tomorrow)

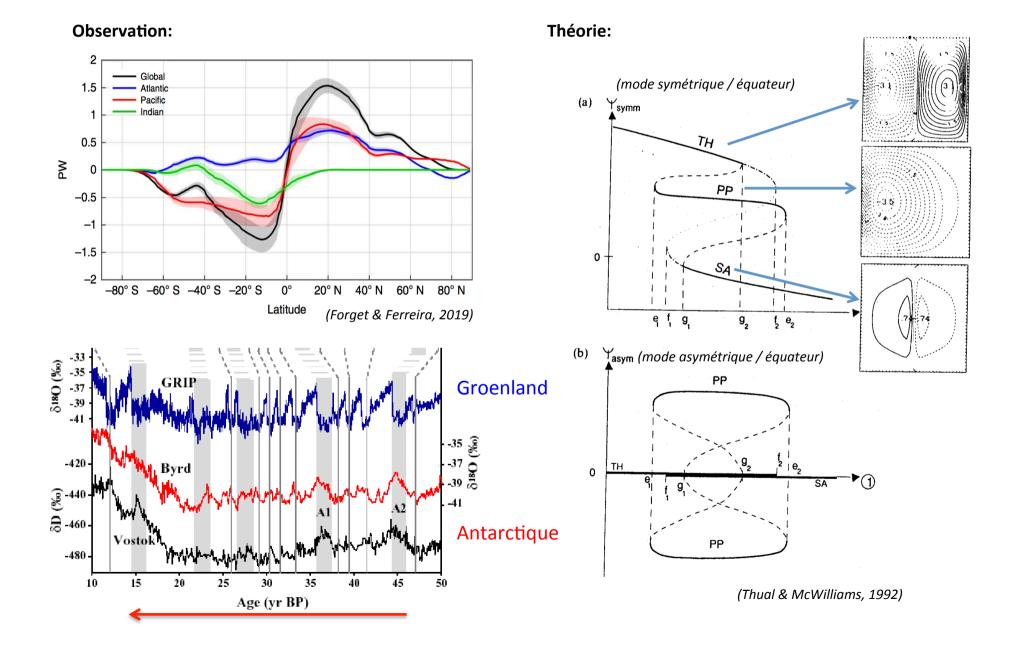
film catastrophe (2004)



$$\Sigma = |m| \Delta S = \mu | (\alpha \Delta T - \beta \Delta S) | \Delta S$$



#### L'asymétrie du transport de chaleur océanique dans l'Atlantique

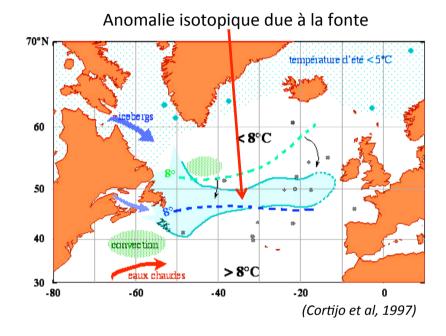


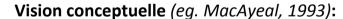


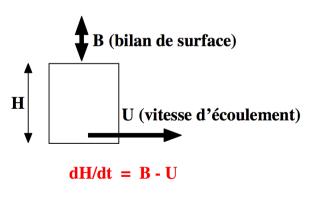
#### Les événements de "Heinrich"

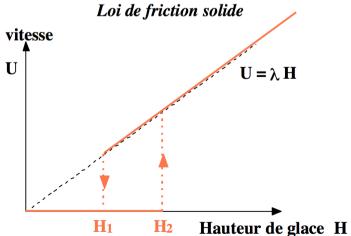


sédiment des niveaux de Heinrich





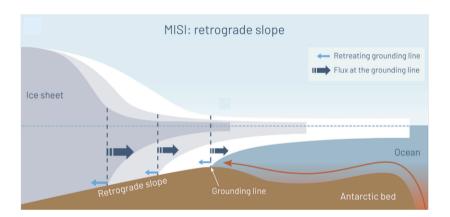




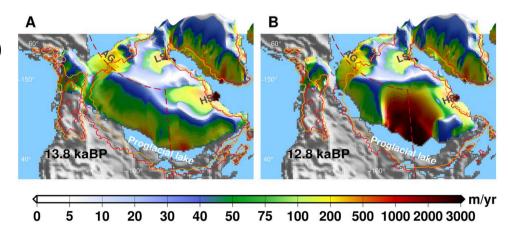
#### Dynamique des calottes de glace

#### De nombreuses sources possibles d'effets de seuil et d'hystérésis ("points de bascule")

- Rétroaction glace-albédo
- Glissement basal (...plus ça glisse, plus ça glisse)
- Marine Ice-Shelf Instability (MISI) (...plus ça fond, plus ça fond)

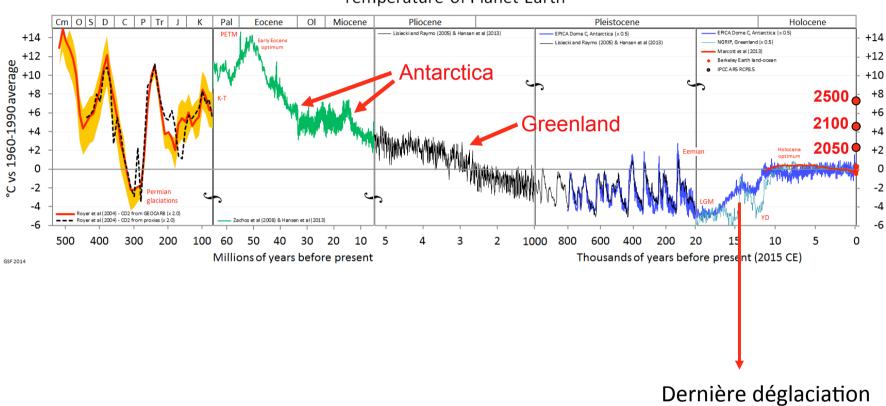


- Marine Ice-Cliff Instability (MICI)
- Proglacial lake ice sheet instability (PLISI)

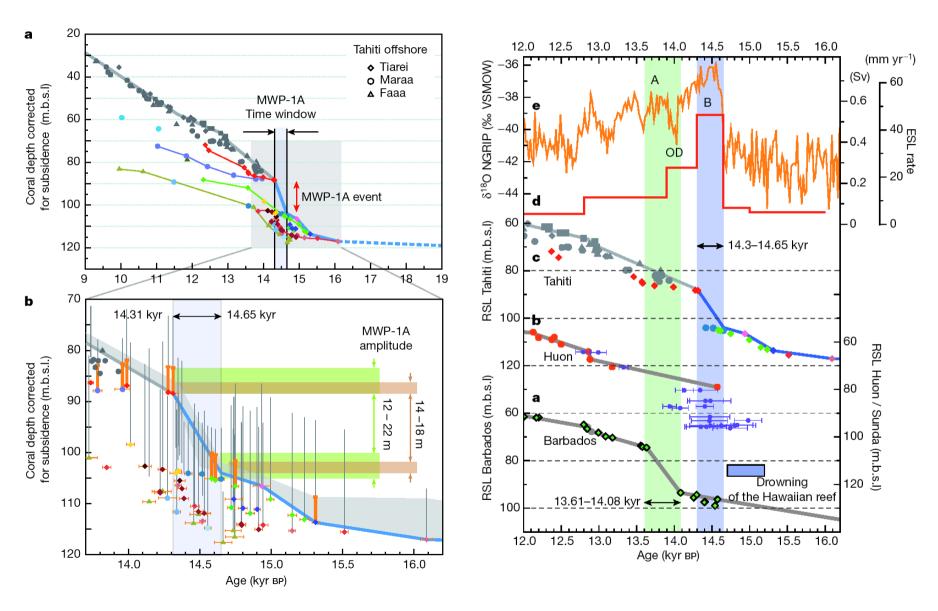


# Les climats de la Terre

#### Temperature of Planet Earth



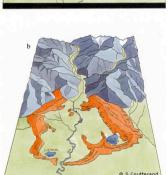
#### L'énigme du « Meltwater Pulse 1A » ~ 4 à 5 m / siècle



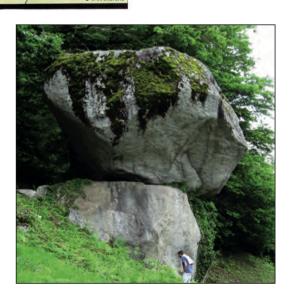
(Deschamps et al., Nature 2012)

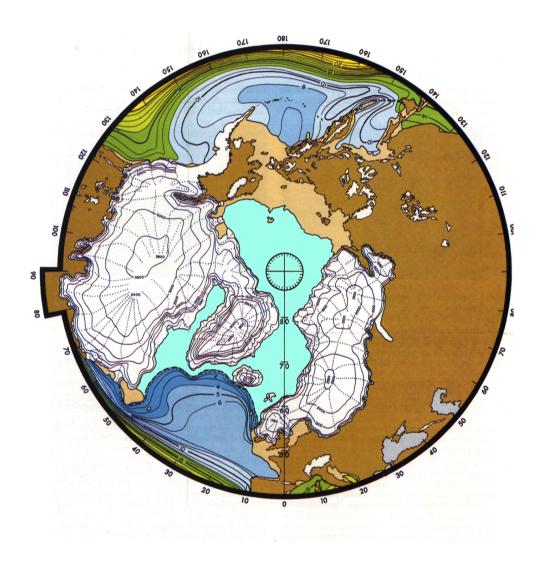
# Les cycles glaciaires











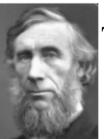
# Glaciations: deux théories physiques depuis le 19ème siècle

(J. Fourier, 1824)

# Astronomie

(3ème mouvement de la Terre, Hipparque, 127 BC)

Ebelmen, 1845



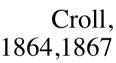
Tyndall, 1861, 1863

Arrhenius, 1896



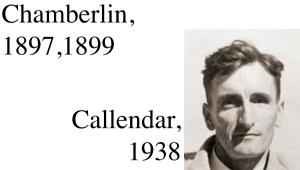
Ekholm, 1901

Adhémar, 1842









Milankoviç, 1920, 1941



Calder, 1974

# Glaciations: deux théories physiques depuis le 19ème siècle

(J. Fourier, 1824)

 $CO_2$ 

Astronomie

(3ème mouvement de la Terre, Hipparque, 127 BC)

Ebelmen, 1845

Géologues et chimistes reconnus

Ekholm, 1901

Adhémar, 1842

Croll, 1864,1867



Mathématiciens amateurs, ingénieurs, journaliste

Calder, 1974

Chamberlin, 1897,1899

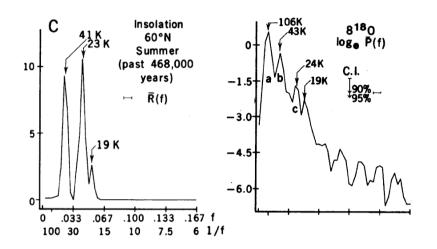
1896



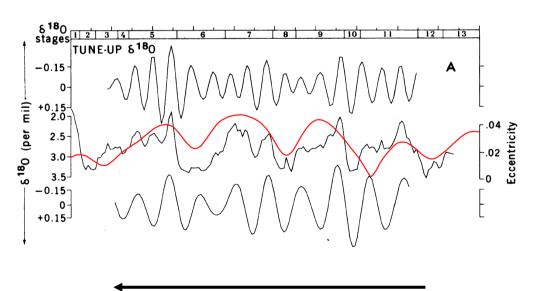


# Hays et al., 1976

Variations in the earth's orbit: **pacemakers** of the ice ages



1 – Une signature très claire des périodicités astronomiques (19ka, 23ka, 41ka)



time

2 – Le cycle dominant (100ka) n'est pas lié directement au forçage, mais lié « in some way » aux changements d'excentricité.

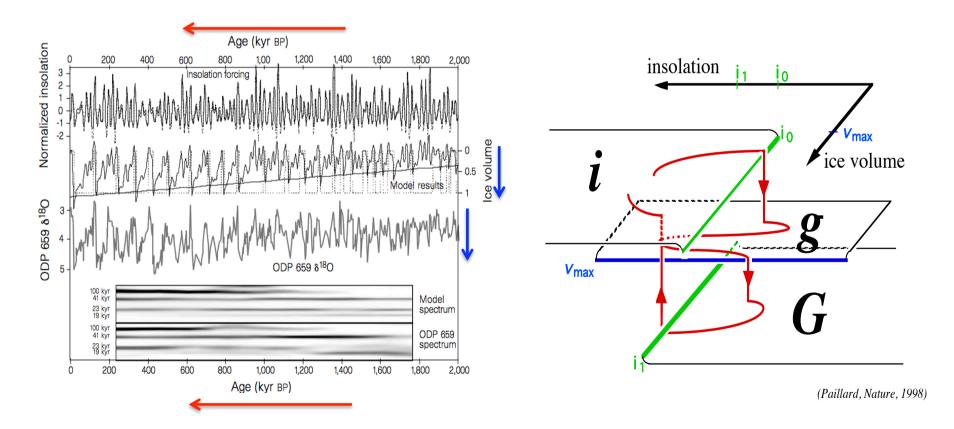
the 100,000-year climate cycle is driven in some way by changes in orbital eccentricity. As before, we avoid the obligation of identifying the physical mechanism of this response, and instead characterize the behavior of the system only in general terms. Specifically, we abandon the assumption of linearity

#### Seuils et hystérésis ont un rôle pour expliquer les cycles glaciaires

#### Permet "d'expliquer" simplement :

- l'origine des cycles à 100,000 ans
- la transition "Mid-Pleistocène" (passage des cycles à 41k vers des cycles à 100k)
- la structure, la forme des cycles glaciaires

- ...



#### Seuils et hystérésis ont un rôle pour expliquer les cycles glaciaires

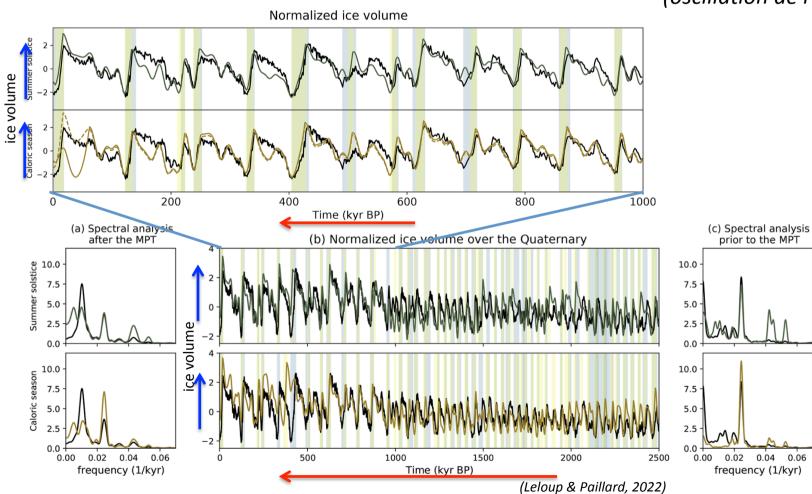
Dynamique linéaire...

$$\begin{cases} (g) \frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t} = -\frac{I}{\tau_{\mathrm{i}}} + \frac{1}{\tau_{g}} \\ (d) \frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t} = -\frac{I}{\tau_{\mathrm{i}}} - \frac{v}{\tau_{d}} \end{cases}$$

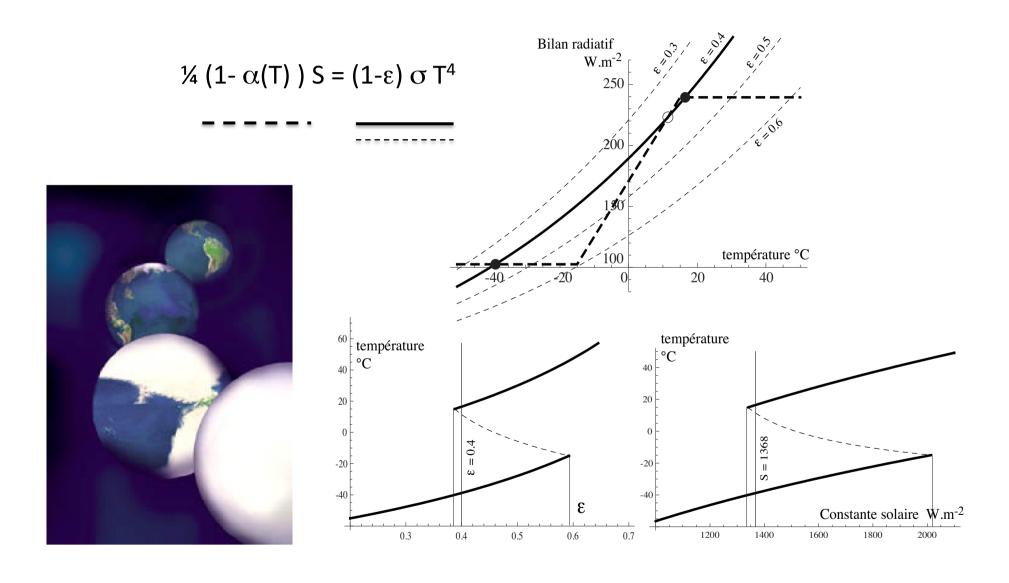
avec des "points de bascule":

$$\begin{cases} (d) \text{ to } (g) : I < I_0 \\ (g) \text{ to } (d) : I + v > V_0 \end{cases}$$

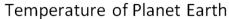
(oscillation de relaxation)

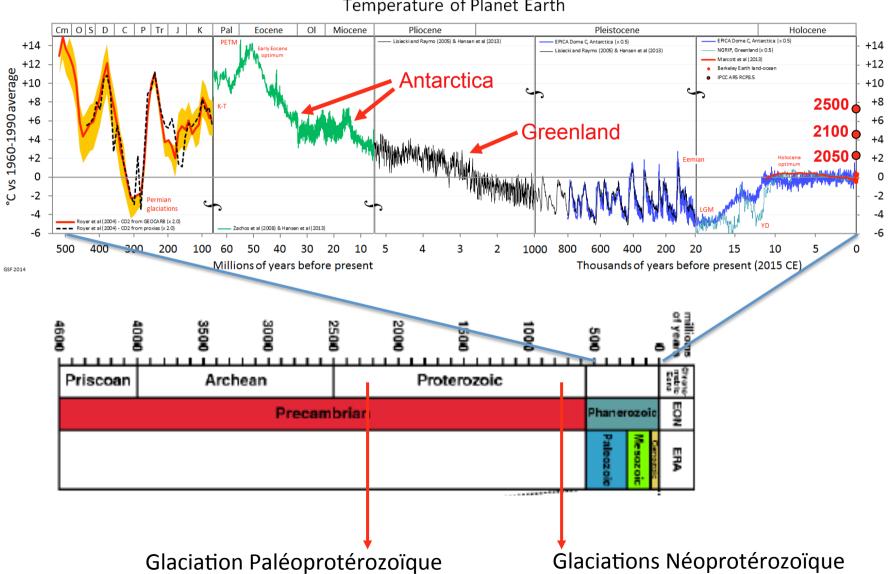


# Un exemple spectaculaire : la Terre boule de neige



# Les climats de la Terre

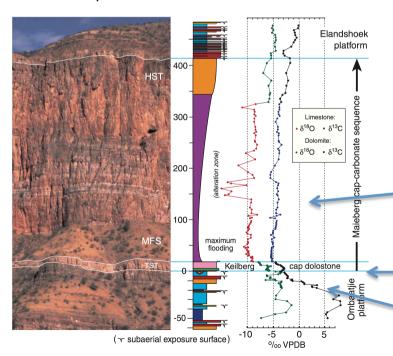


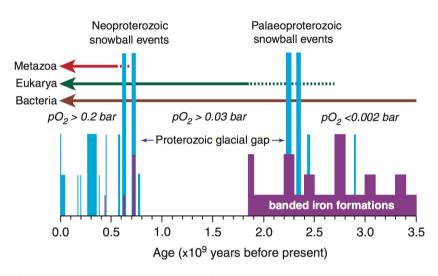


# Des glaciations globales!



Dolomite dropstone in banded iron formation





**Fig. 12** Frequency of occurrence of iron formations (purple) (modified from Isley and Abbott, 1999), major glacial periods (blue) (Crowell, 1999), constraints on atmospheric oxygen levels (Rye and Holland, 1998), and steps in the history of life. Note the two eras of snowball events separated by a 1.5 billion year gap when evidence is lacking for glaciation at any latitude.

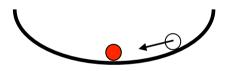
Cap carbonates just above glacial deposits

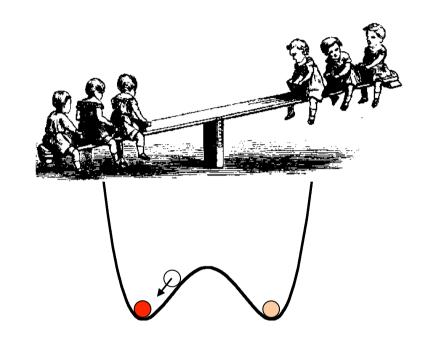
Glacial deposits

Very large C-cycle perturbation

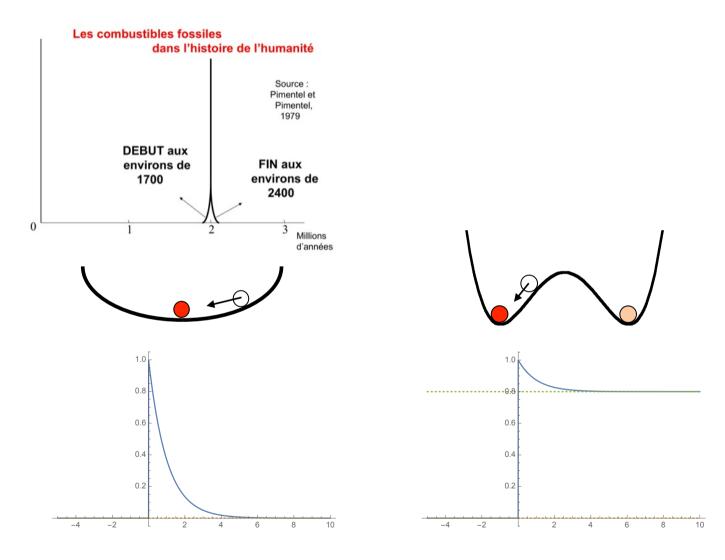
# Qu'est-ce qu'un « point de bascule » ?







# Qu'est-ce qu'un « point de bascule » ?



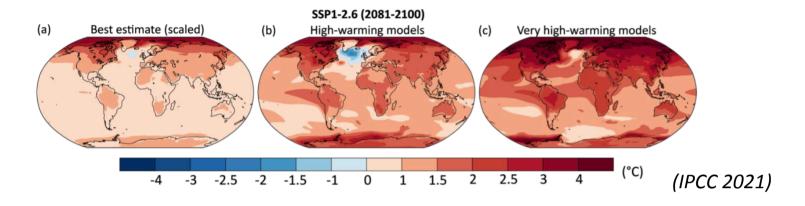
La question est liée à l'existence « d'équilibres multiples », de seuil critique et d'hystérésis

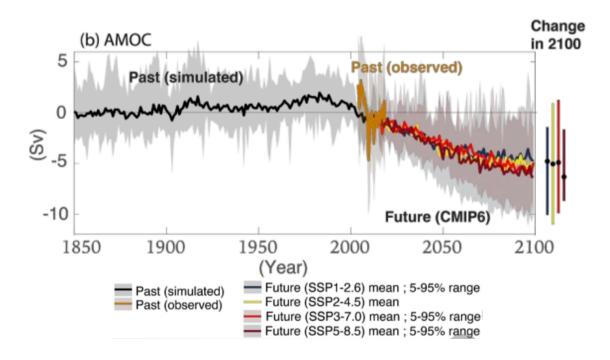
Mais de quel objet parle-t-on ? De la température ? Du système économique? De la vie sur Terre ? ...

#### De nombreux exemples de "points de bascule" passés => futurs

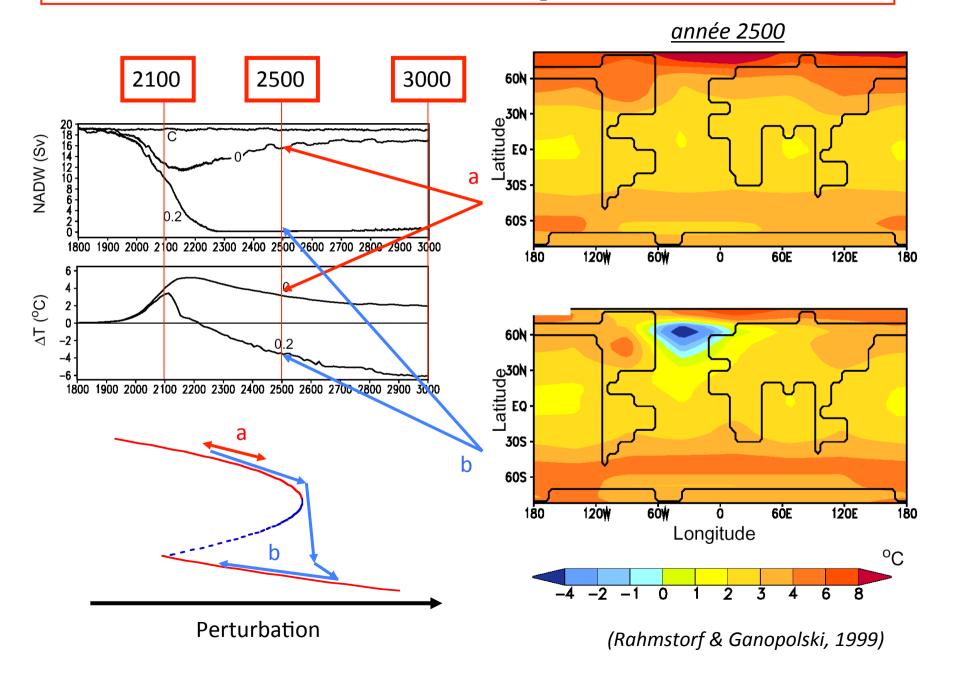
- La circulation océanique profonde dans l'Atlantique (problème des « Dansgaard-Oeschger » ⇒ ralentissement actuel de la circulation thermohaline)
- La dynamique des calottes de glace et le niveau marin (problème du « Melt Water Pulse » durant la déglaciation ⇒ instabilité future des calottes)
- Désoxygénation des océans (événements « OAE » ⇒ extension actuelle/future des OMZ)
- Le stockage du carbone dans les sols / du méthane dans les pergélisols et plateformes continentales (événements « hyperthermaux » ou PETM ⇒ déstabilisation actuelle/future des pergélisols/ clathrates)
- Le cycle hydrologique dans les régions semi-arides (problème du « Sahara vert » à l'Holocène ⇒ désertification)
- ... liste non-exhaustive ... sans parler des écosystèmes (6<sup>ème</sup> extinction) ... ni d'économie (crises, "falaise de Sénèque"...)

### Le ralentissement de la circulation profonde Atlantique

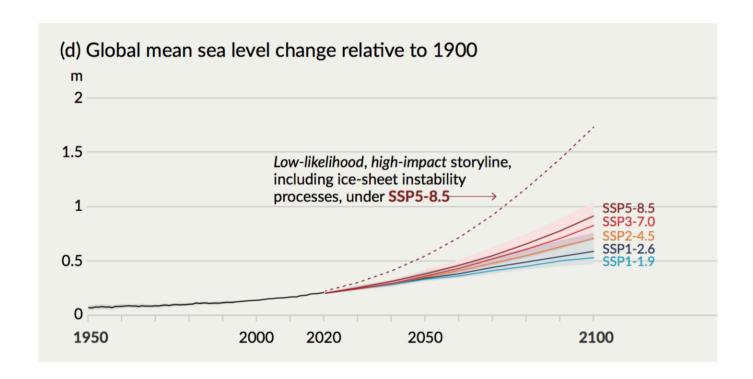




#### Au fait, le futur, c'est quand ???

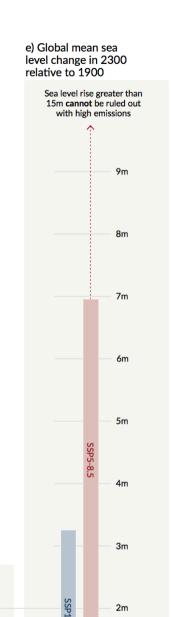


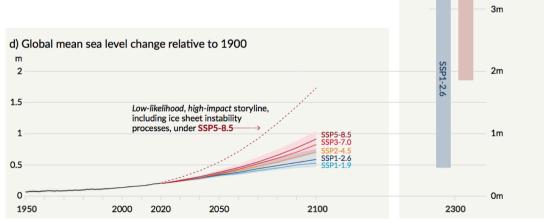
# Niveau marin futur ~ 1 mètre/siècle?



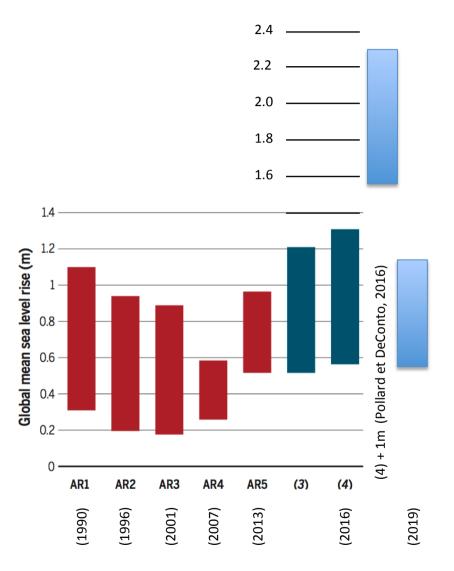
# Niveau marin futur ~ 1 mètre/siècle?

... ou plus?





### Niveau marin: modèles vs. avis d'expert



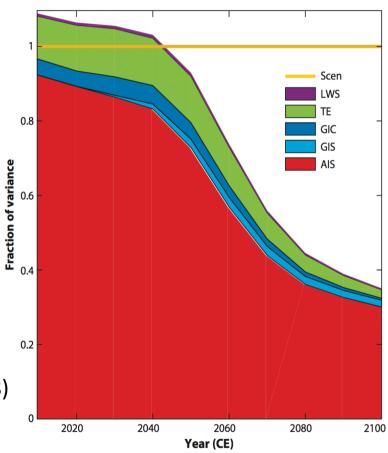
RCP 8.5 (2000-2100AD)

\*\*Today of the state of the state

(d'après Oppenheimer et al, 2016)

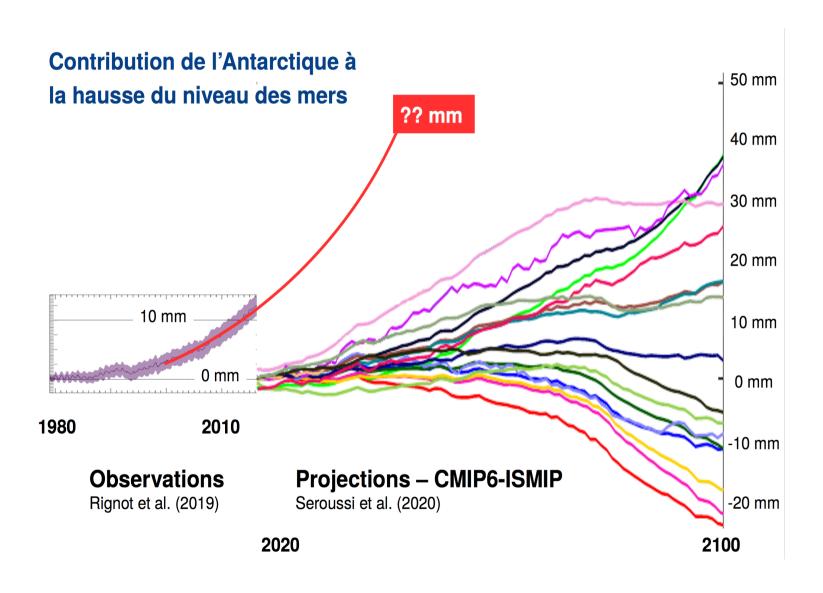
#### Niveau marin : l'incertitude est largement liée à Antarctique

Decomposition of uncertainty in GMSL projections, following the DP16 projections of Kopp et al. (144). Red represents within-scenario variance due to the Antarctic ice sheet (AIS), cyan the variance due to the Greenland ice sheet (GIS), blue the variance due to glaciers and ice caps (GIC), green the variance due to thermal expansion (TE), and purple the variance due to land-water storage (LWS). The yellow line represents the total variance, pooling across RCP2.6, RCP4.5, and RCP8.5 (Scen). Until the 2040s, cross-scenario variance is negligible, leading to a total variance across RCPs that is slightly smaller than the variance within RCP4.5 (represented by the sum of all other contributions). In the second half of the twenty-first century, across-scenario variance grows to dominate uncertainty.



(Horton et al, 2018)

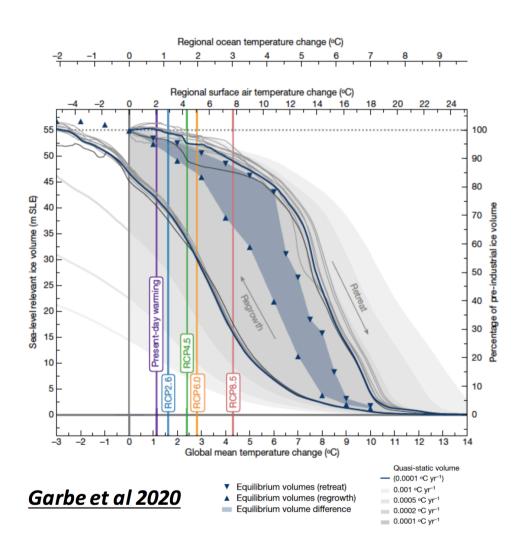
#### Les modèles ont du mal à reproduire les observations récentes



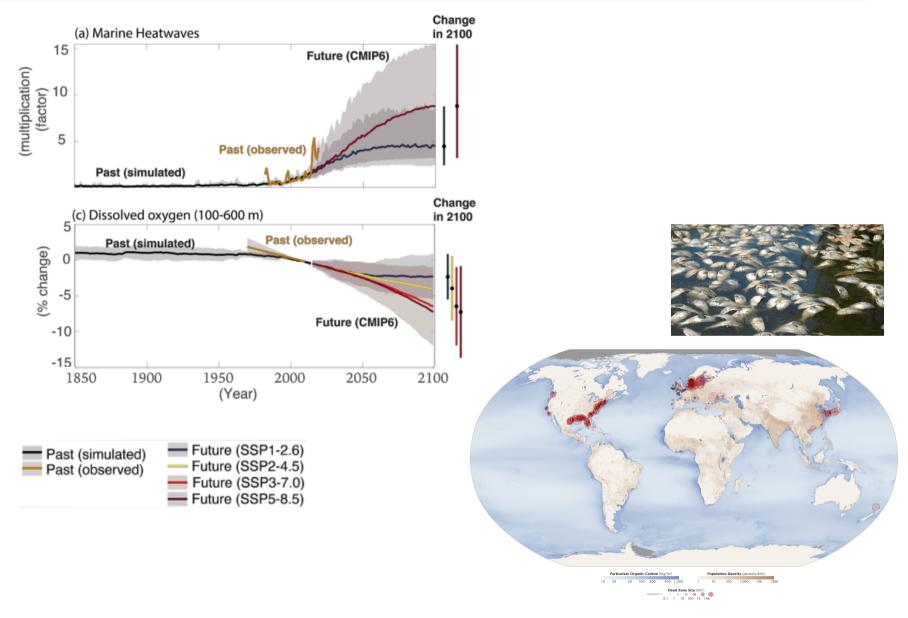
(Aurélien Quiquet, pers. comm)

#### Une estimation de l'hystérésis Antarctique

ATTENTION : Modèle de calotte "forcé" (pas de rétroaction climat – calotte)



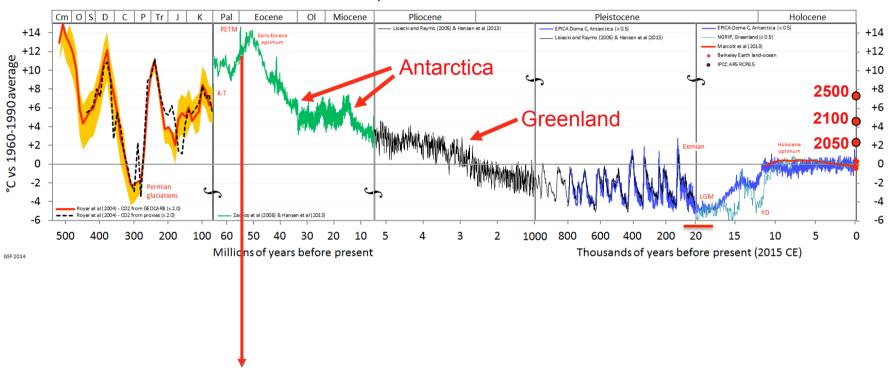
# Vagues de chaleur et désoxygénation



Aquatic dead zones (2008) NASA Earth Observatory

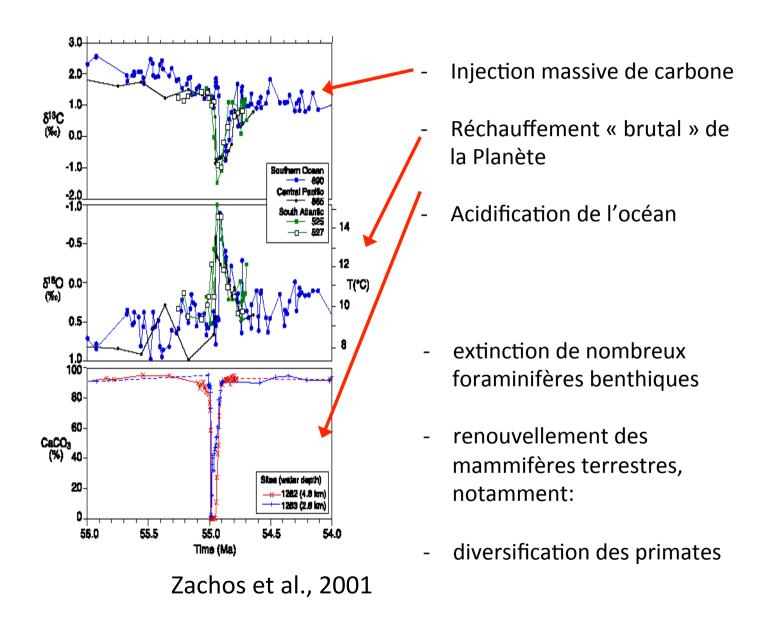
# Les climats de la Terre

#### Temperature of Planet Earth

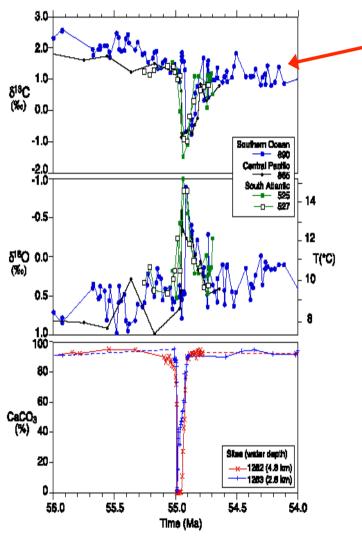


Transition Paléocène-Eocène

#### La transition Paléocène-Eocène, il y a 55 millions d'années



# La transition Paléocène-Eocène, il y a 55 millions d'années



Zachos et al., 2001

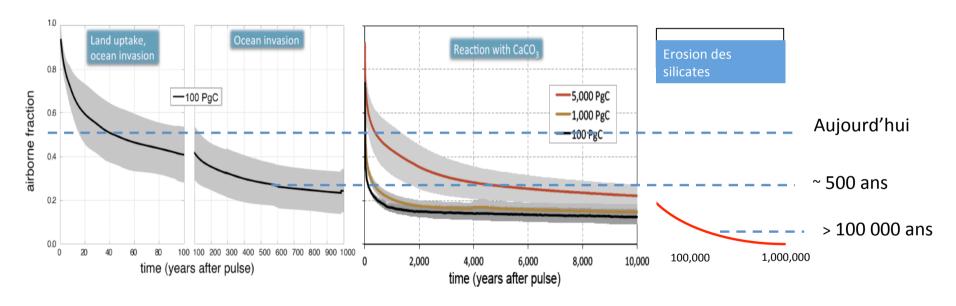
Injection massive de carbone

Déstabilisation des hydrates de méthane ?



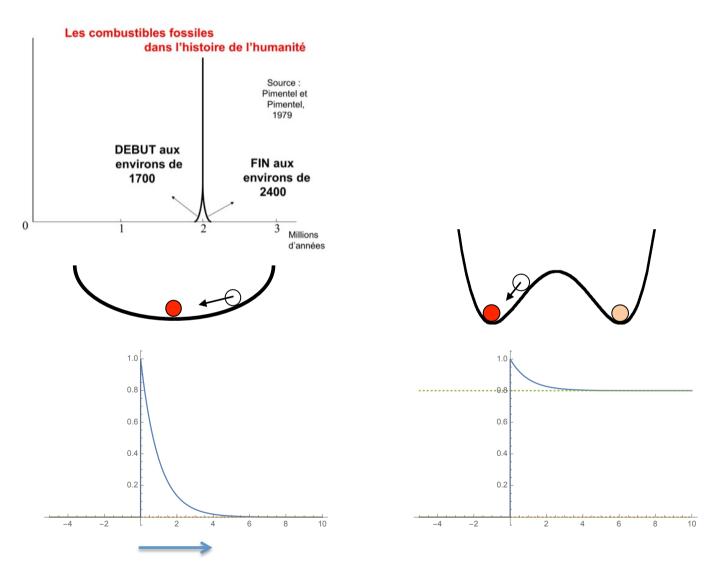
#### La transition actuelle EST une transition géologique

- De grande amplitude
- Rapide
- ... et irréversible ... à l'échelle de nos sociétés humaines



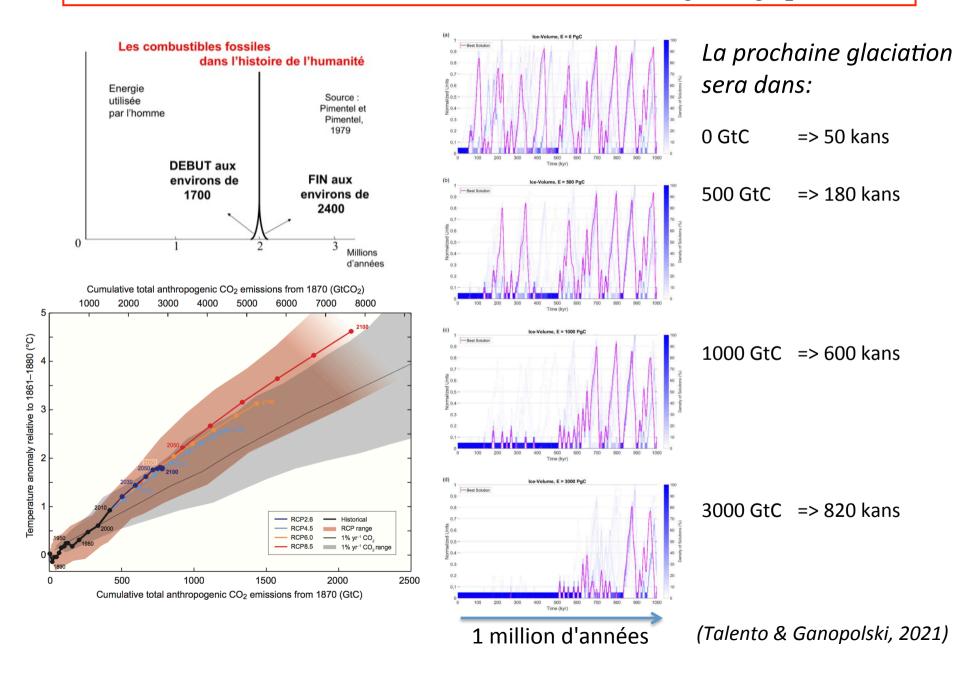
La décroissance (lente!) de la fraction atmosphérique du CO<sub>2</sub> anthropique (d'après IPCC 2014)

# Que veut dire "irréversible"?



1 million d'années?

# La transition actuelle EST une transition géologique



# Conclusions

- Si les points de bascules sont des notions "physiques" (<u>équilibres</u> multiples et hystérésis):

Oui, il y en a beaucoup dans le système climatique.

- Si la question posée est celle de <u>l'irréversibilité</u>, de la rapidité de la transition, etc...

Les points de bascule ne sont pas nécessaire: nous avons déjà bifurqué vers une nouvelle ère géologique (l'Anthropocène)