

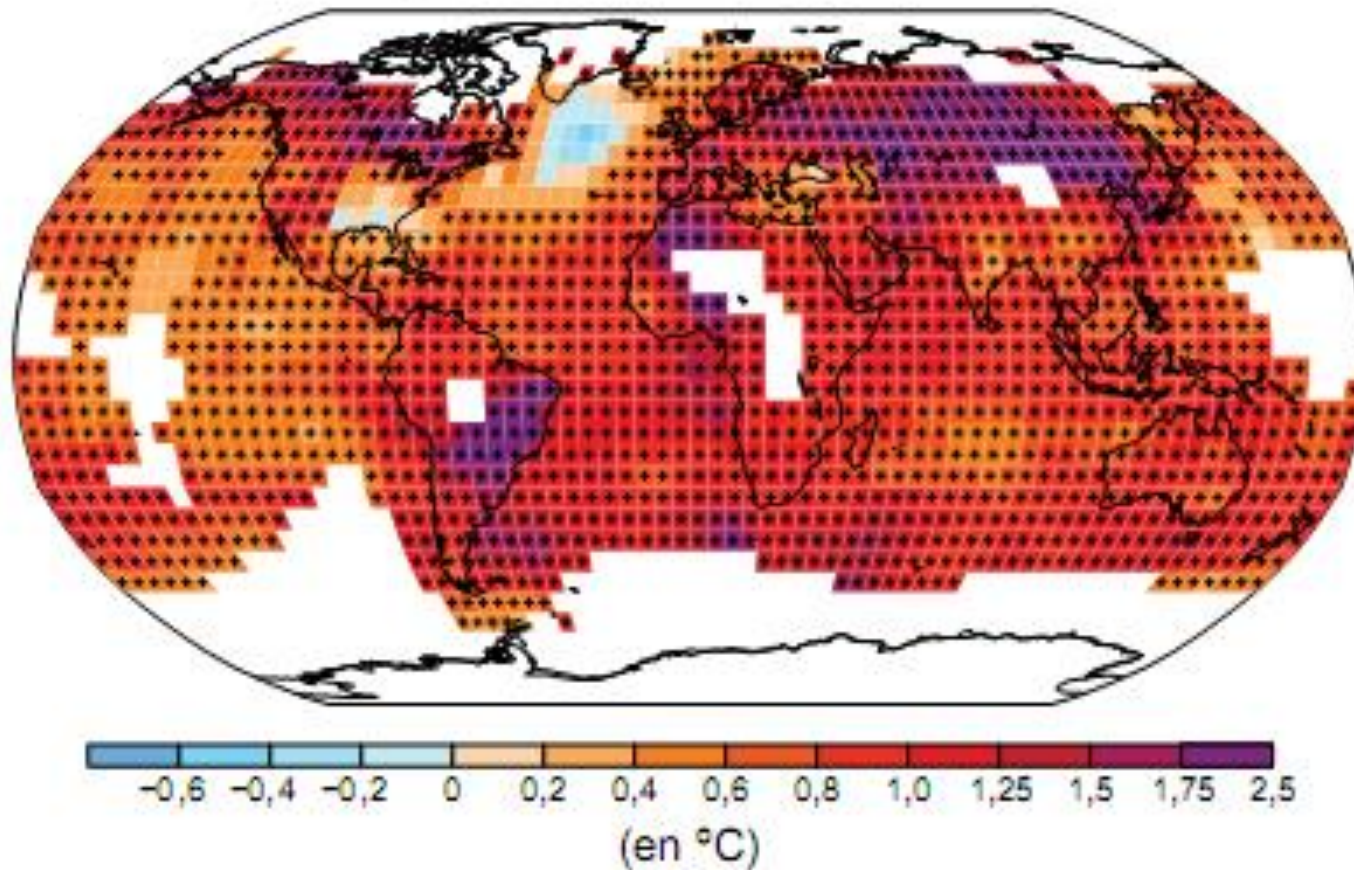
Les changements globaux actuels



Bruno Malaizé, Université Bordeaux

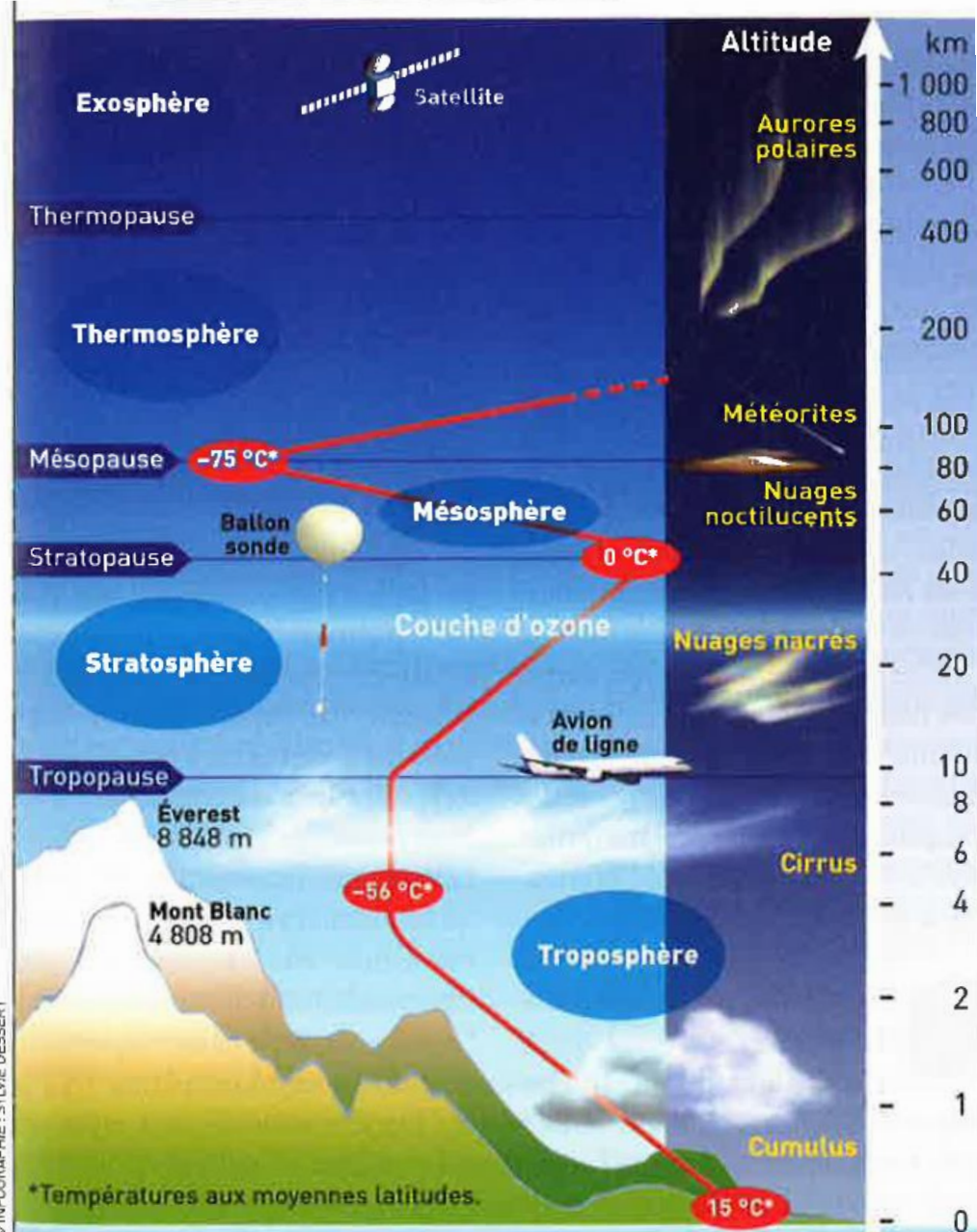
Les changements globaux actuels

Évolution de la température en surface observée entre 1901 et 2012



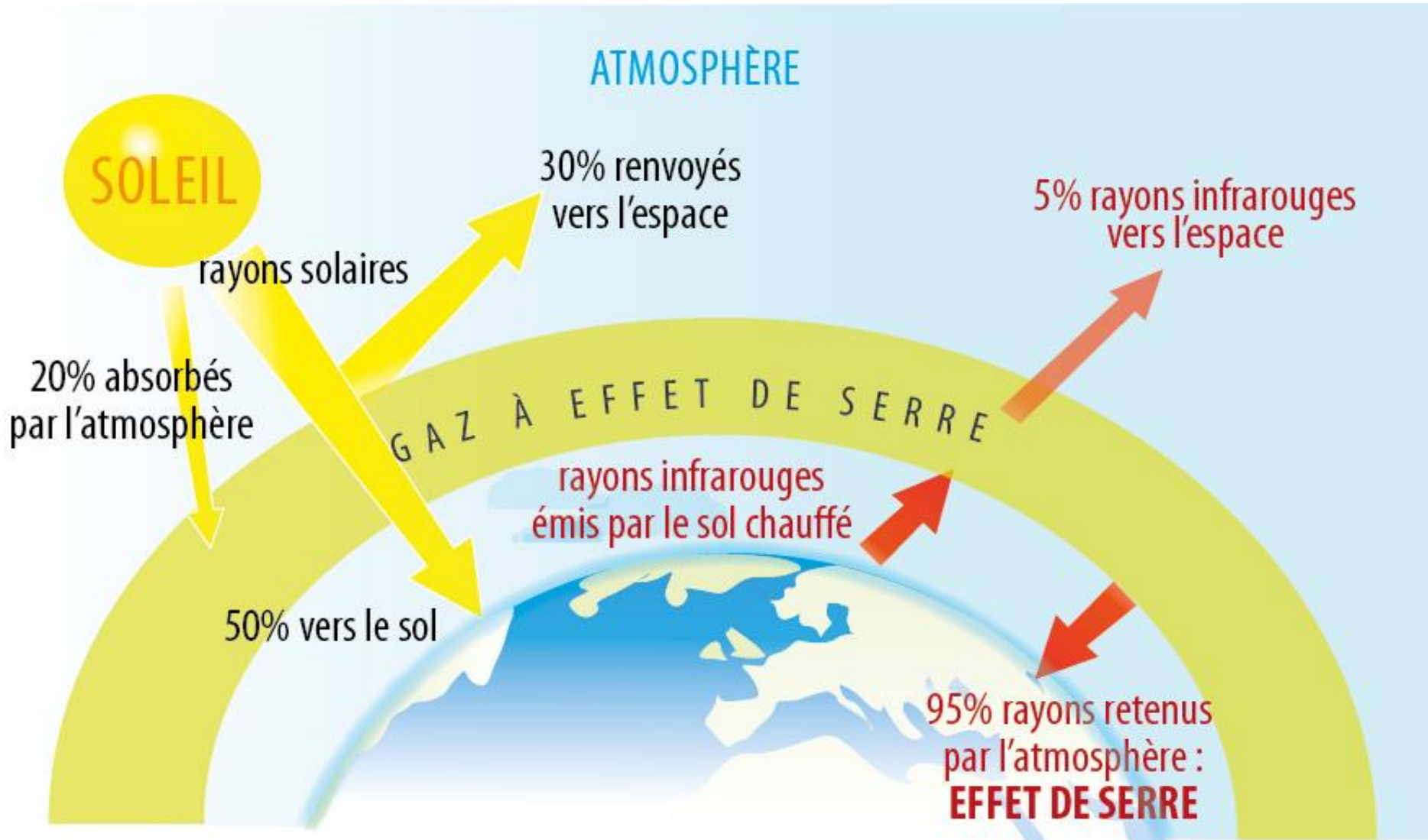
a/ Stratification verticale de la température

Observations obtenues
grâce à des
ballons sondes

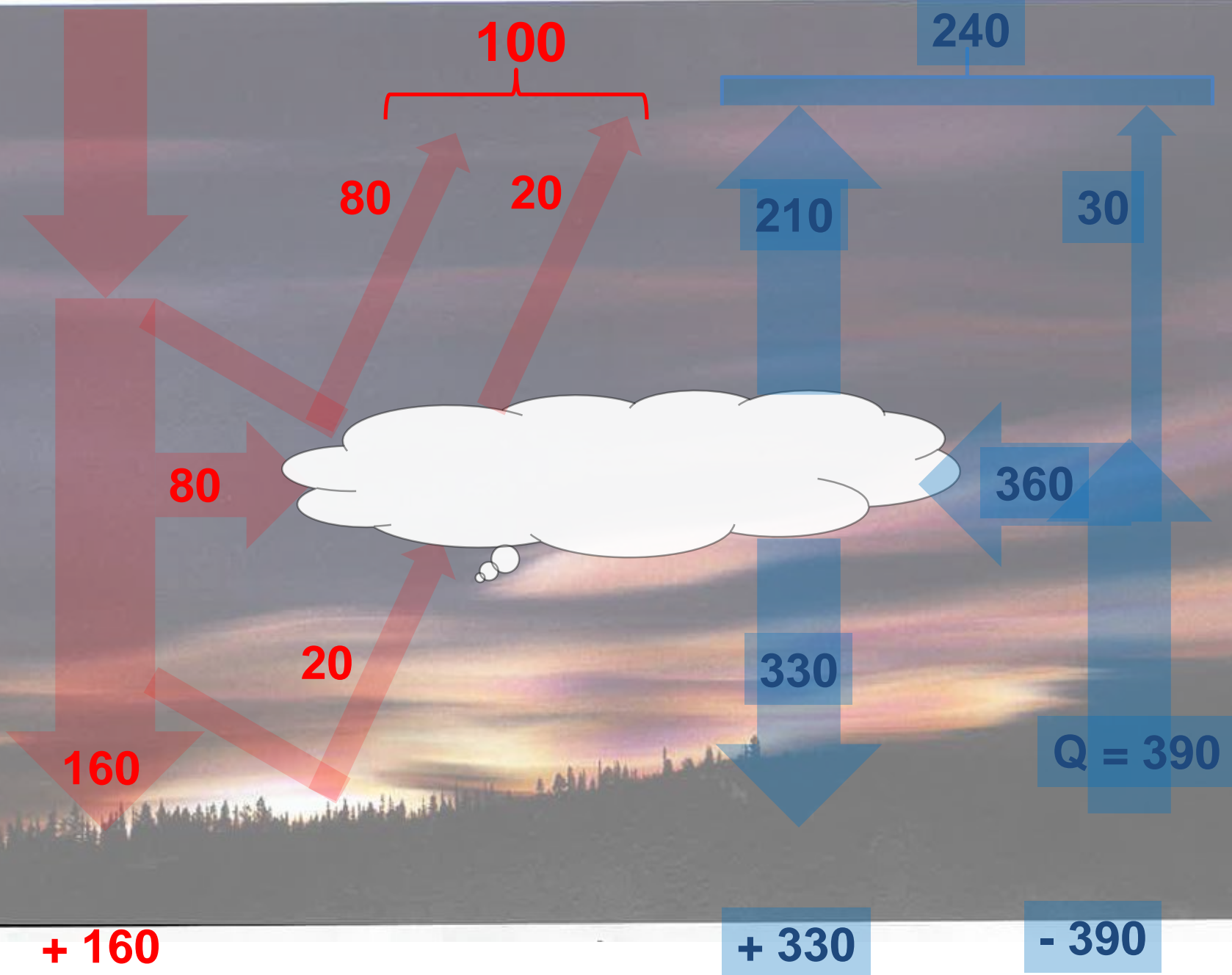


Lien entre l'évolution du CO2 et de la température atmosphérique

CO2 = Gaz à effet de serre



$$S/4 = 340$$



Bilan Radiatif Terrestre

+ 100 W/m² par an !!

Compensation du flux du rayonnement infrarouge par une flux **méridien** et **latitudinal** de chaleur sensible et de chaleur latente

Chaleur sensible : absorption des rayonnements solaires et terrestre

Chaleur latente : Changement de phase

Condensation par précipitation de la vapeur d'eau

Transfert de chaleur accumulée à l'équateur vers les pôles

Deux vecteurs principaux

Circulation atmosphérique

Circulation océanique

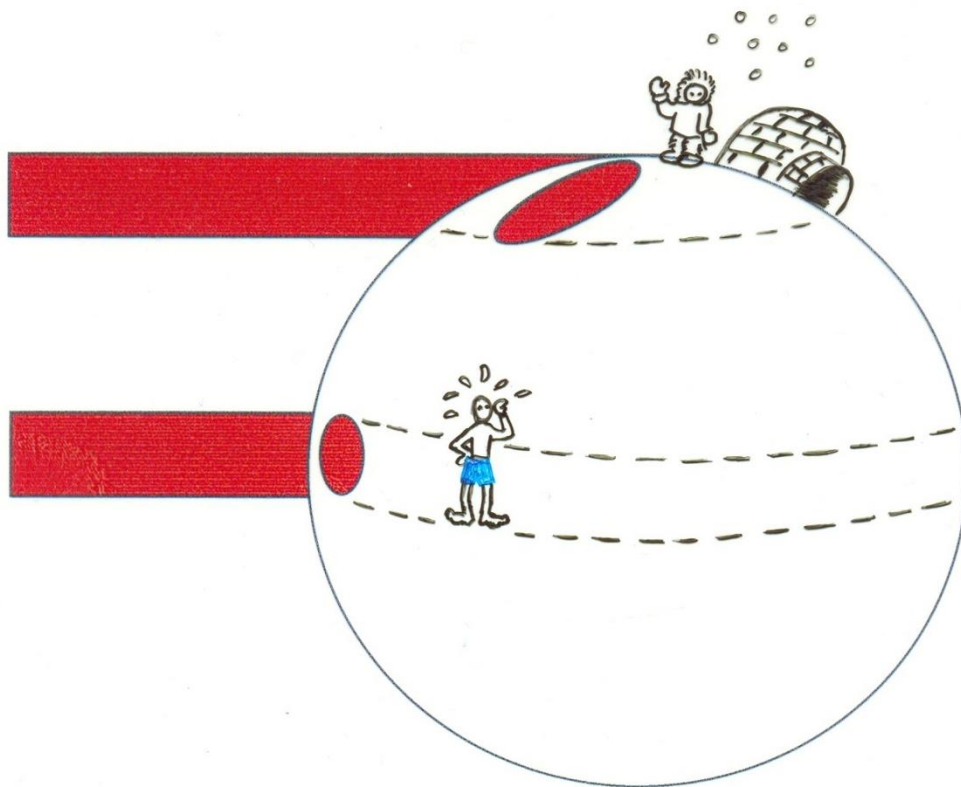
L'énergie essentielle de notre planète : le soleil

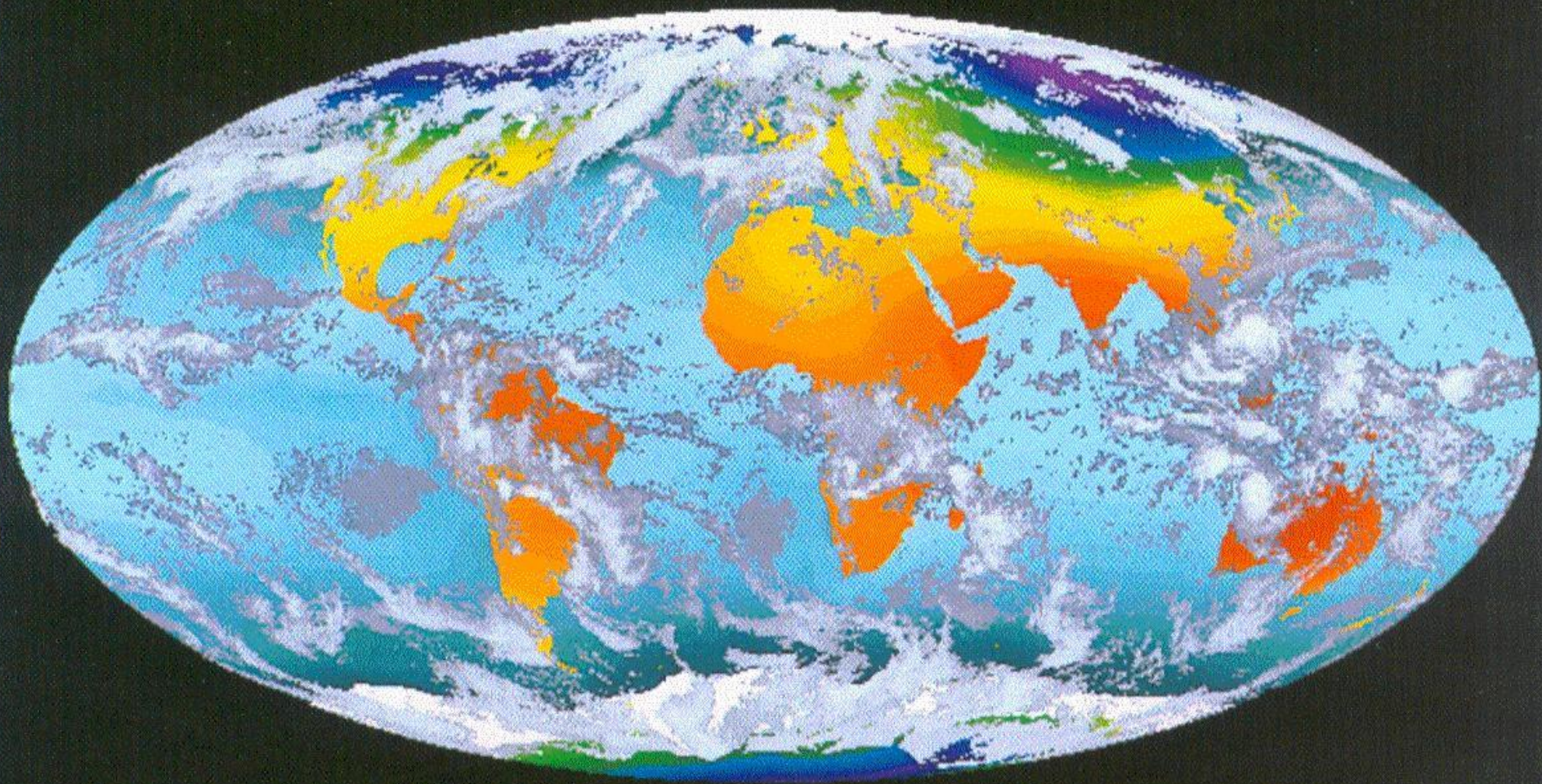
Mais.....

Aux poles : froid

A l'équateur : chaud

Bilan :
déficit d'énergie





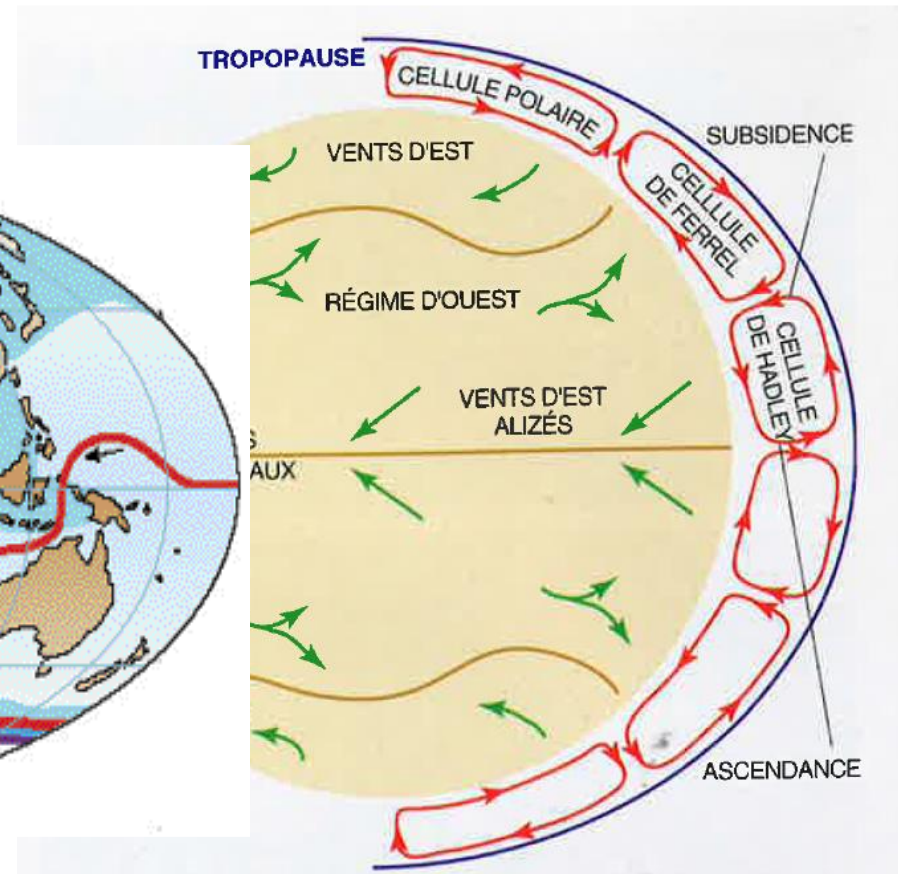
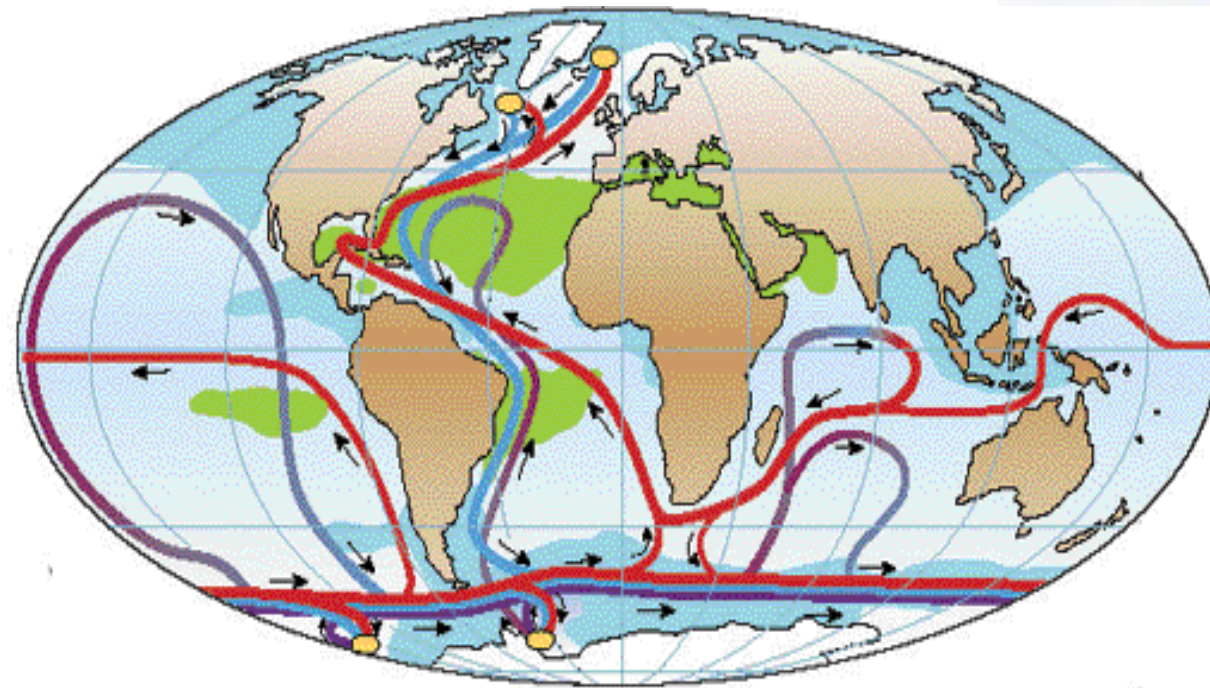
Conséquences:

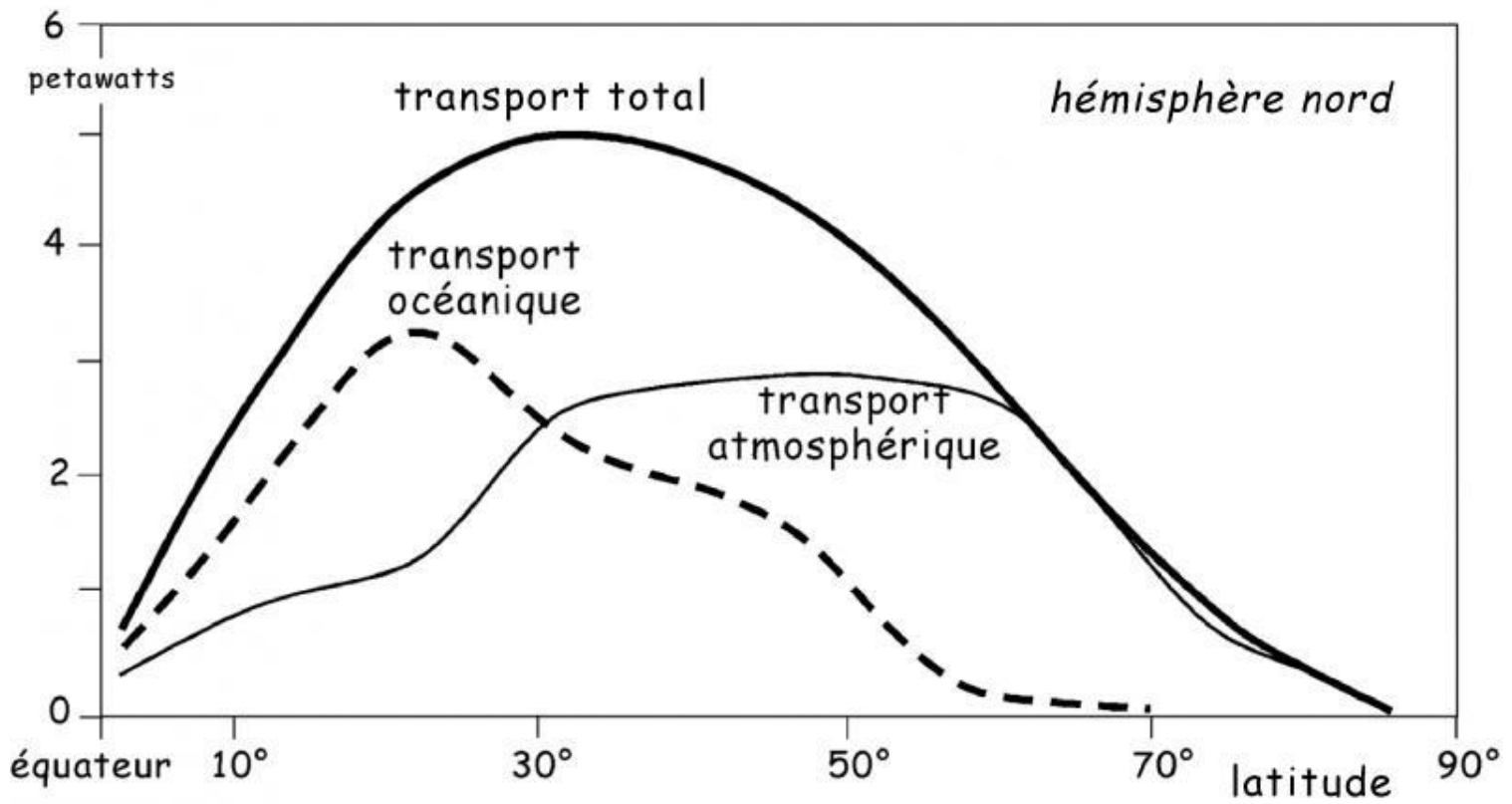
Variations des transferts méridiens d'énergie ?

Circulations océaniques

Transfert différé d'environ 2000 ans
entre hémisphère Nord et Sud

Circulations atmosphériques
transfert instantané





a/ Evolution du bilan radiatif terrestre

Quels sont les termes qui ont évolués dans le bilan radiatif ?

Q	Tellurique	Constant à ces échelles de temps
S	Insolation	Activité solaire (rythme de 11 ans) Position de la Terre par rapport au soleil
A	Albedo	Période glaciaire : surface + blanche contribue a diminuer encore plus la température

Aerosols

Gaz à effet de Serre	CO2	Pompe biologique et océanique
	CH4	zones humides (hautes et basses latitudes)

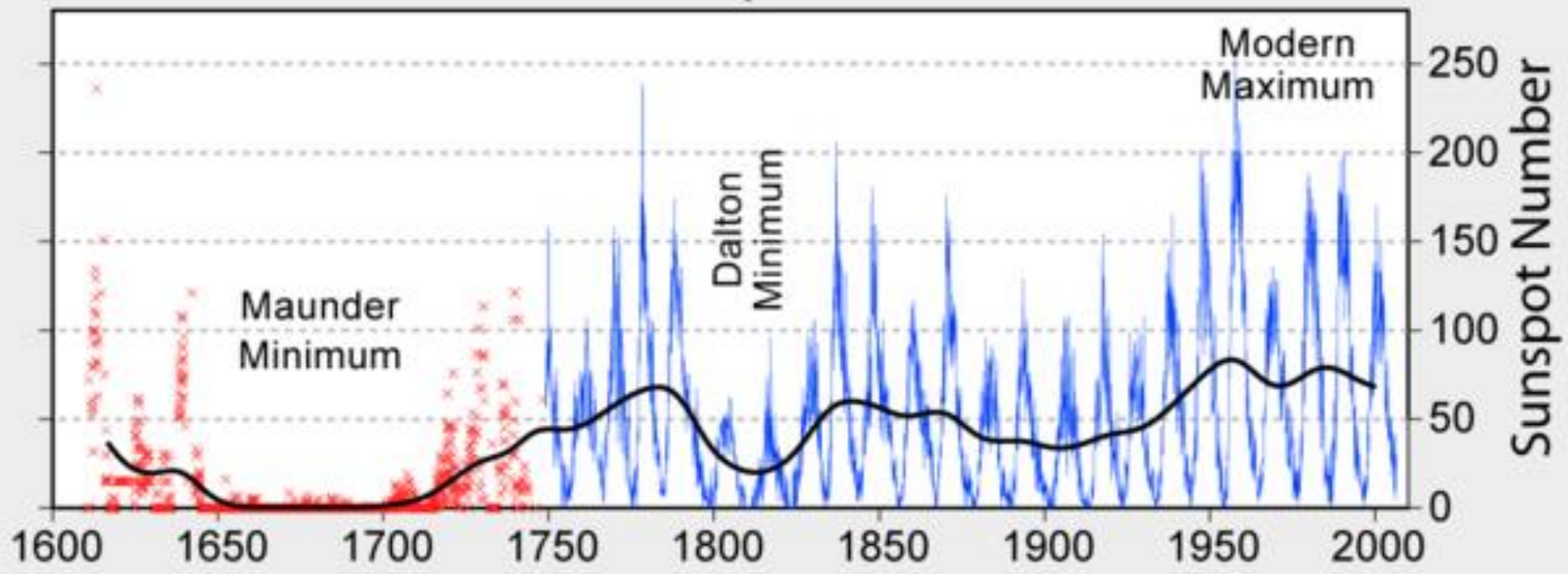
Conséquences:

Variations des transferts méridiens d'énergie

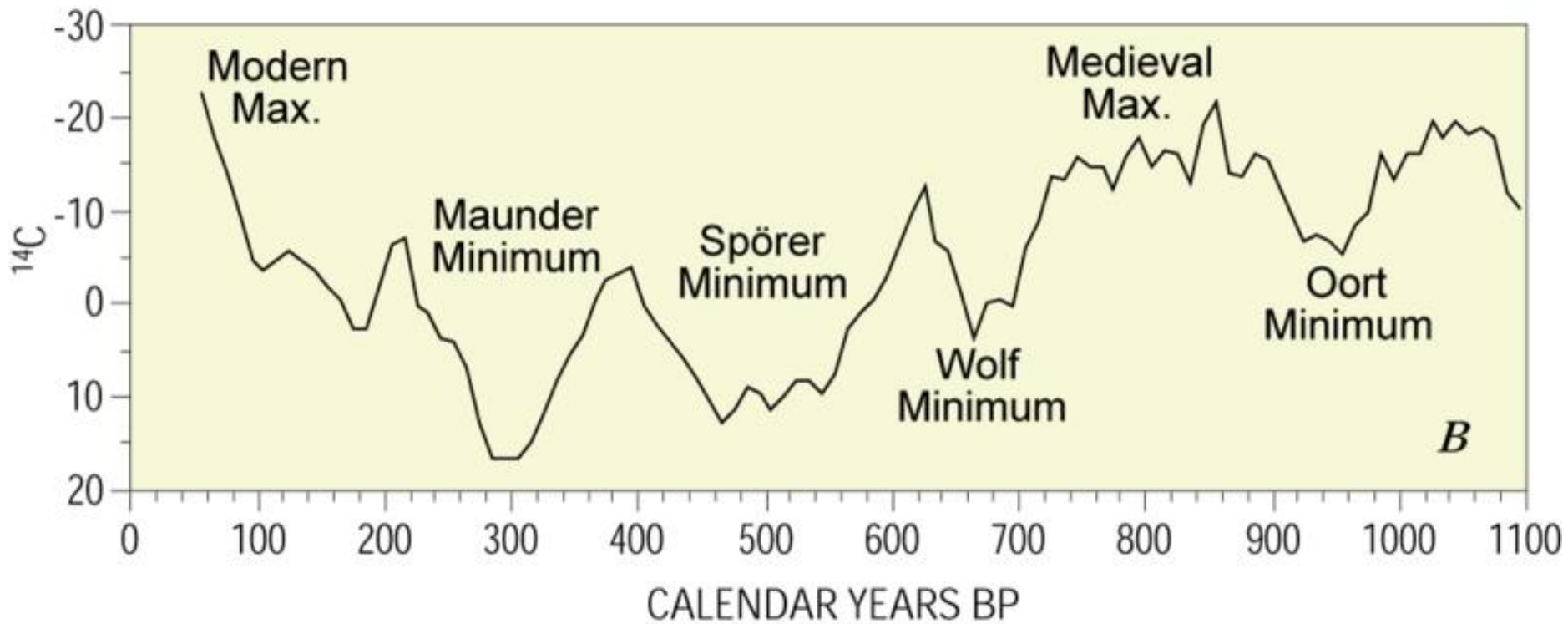
impacts sur les circulations océaniques et atmosphériques

Cycles de 11ans

400 Years of Sunspot Observations



Sur plusieurs siècles ...



AD 2000

1700

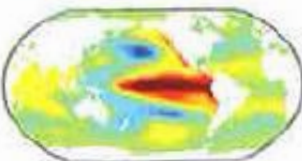
1000

Le fonctionnement du climat

Sur le court terme...

Processus chaotiques

Exemple :
El Niño



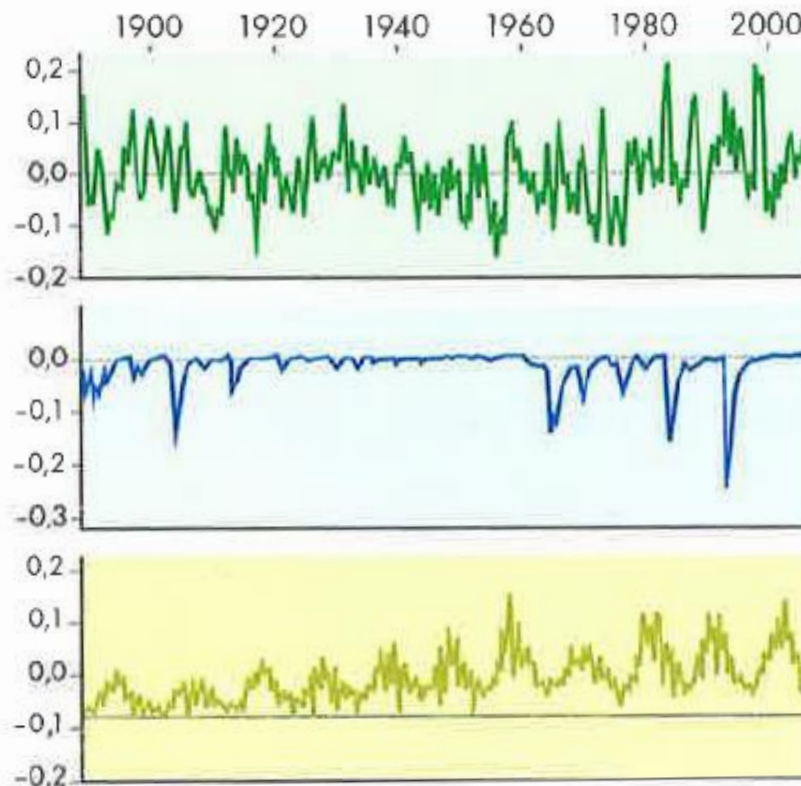
L'activité volcanique

Nuages
de cendres
et gaz à effet
de serre



L'activité solaire

Irradiance
solaire

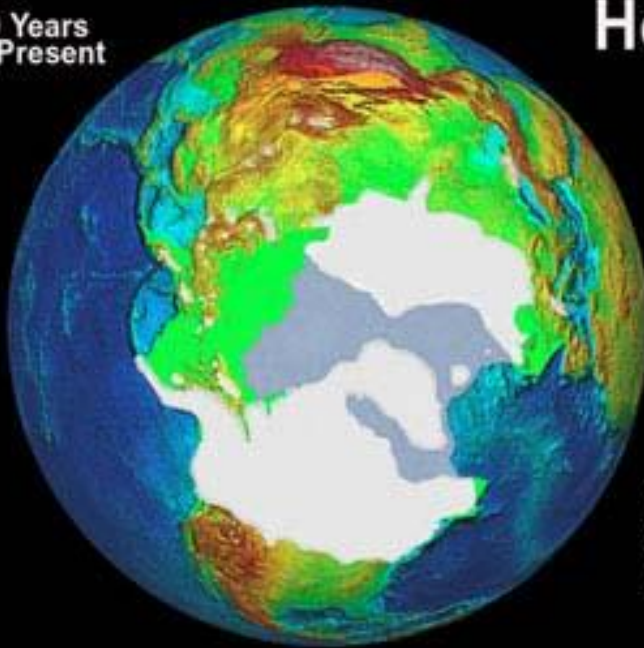


10 ans

Albédo

Couverture de glace continentale

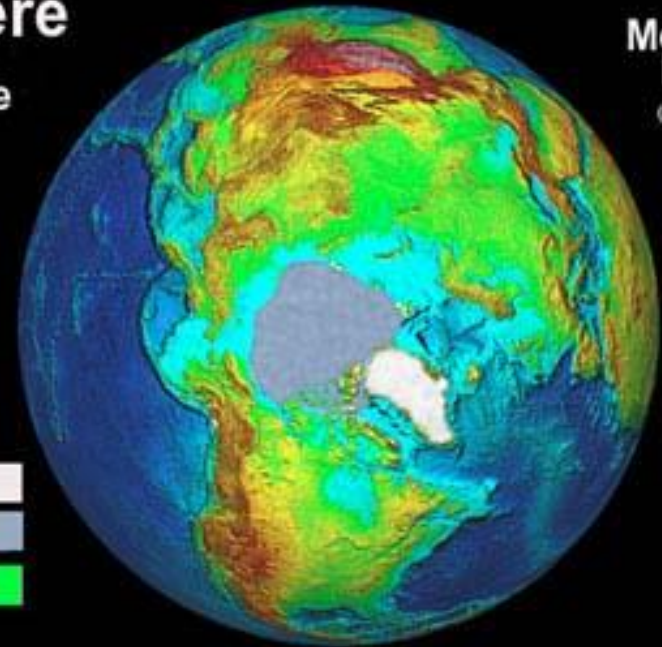
18,000 Years
Before Present



Northern Hemisphere Ice Coverage

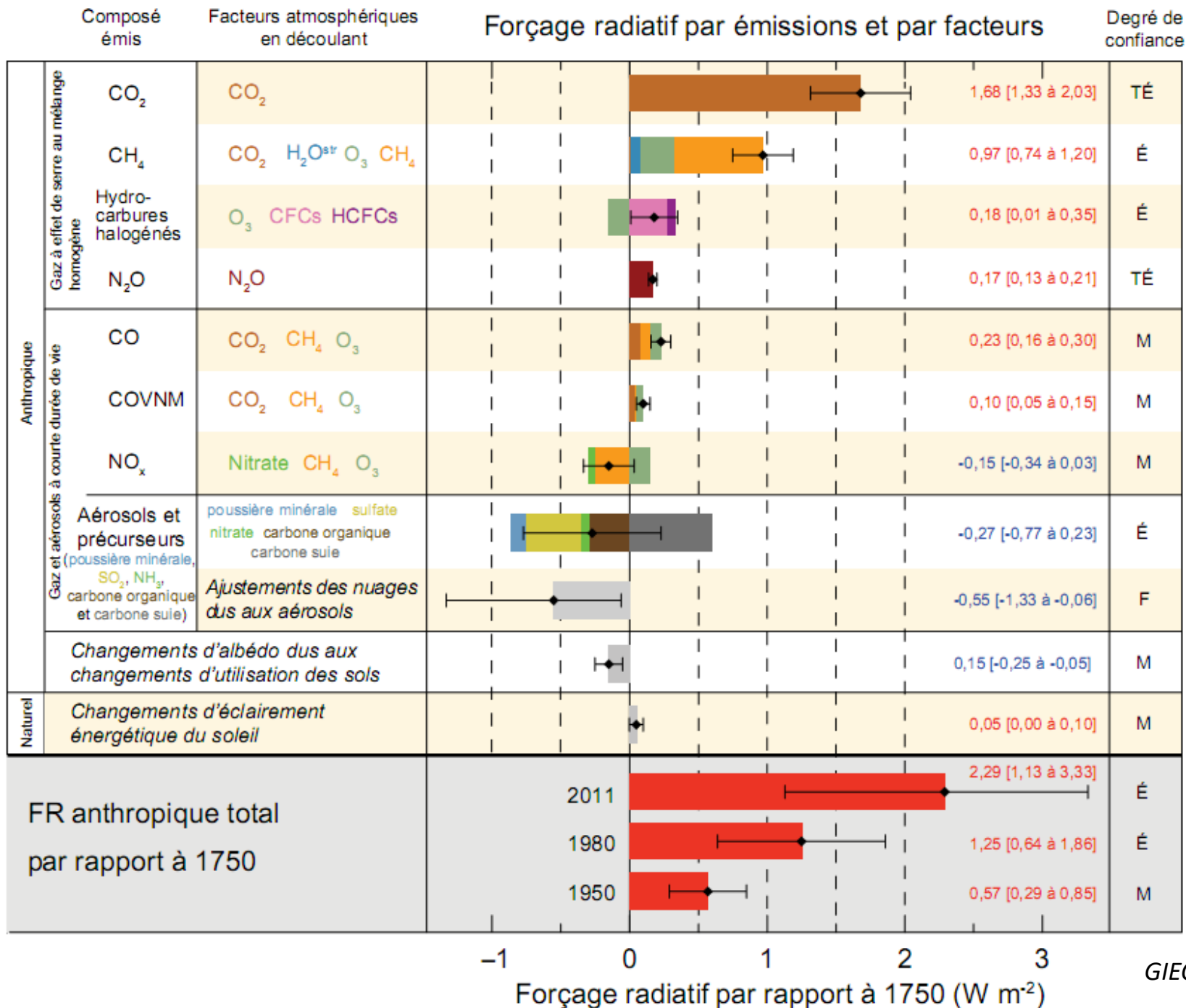


Modern Day
(August)



Note: Modern sea ice coverage represents summer months.



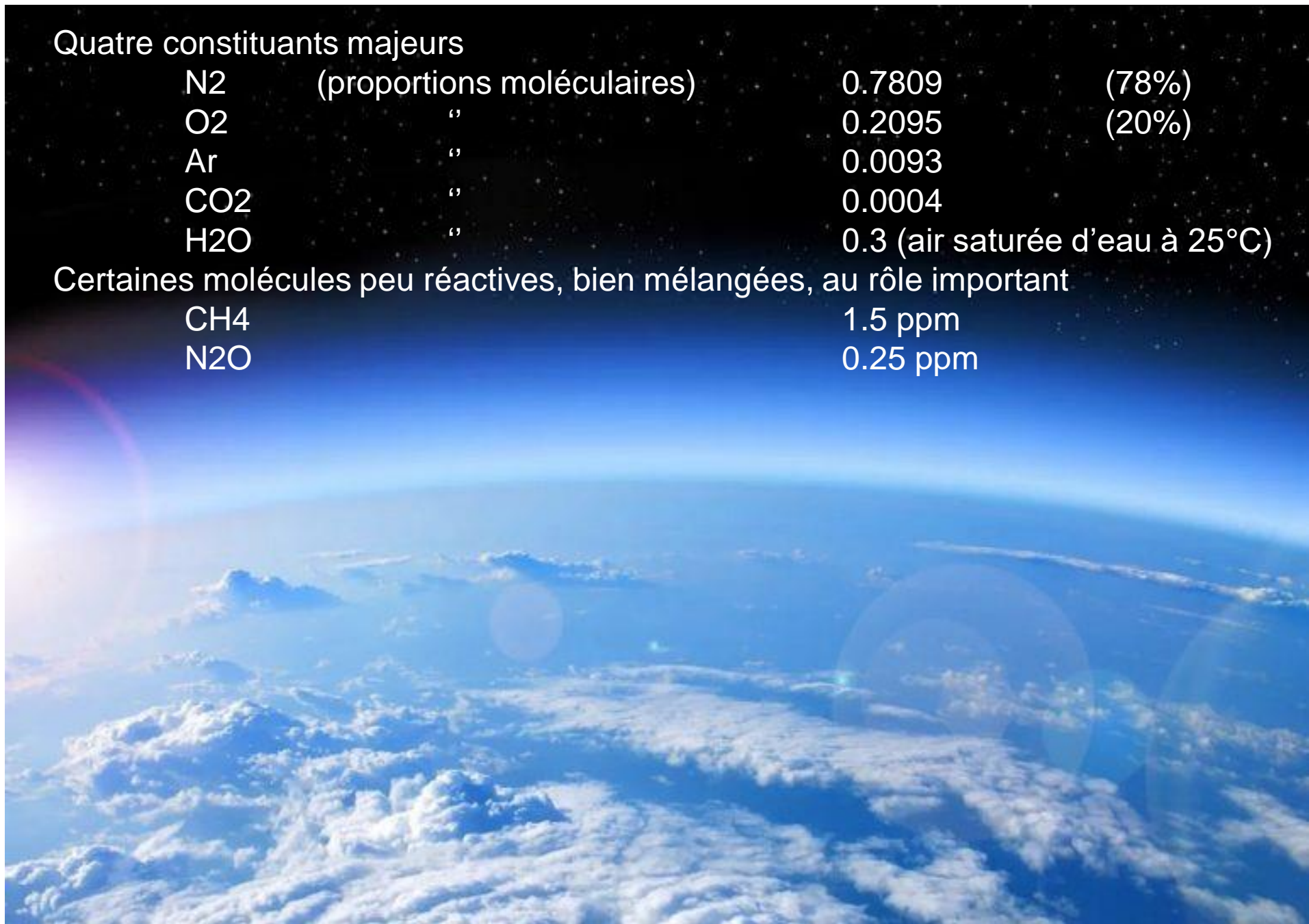


Quatre constituants majeurs

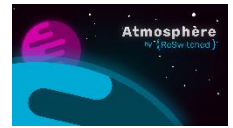
N ₂	(proportions moléculaires)	0.7809	(78%)
O ₂	"	0.2095	(20%)
Ar	"	0.0093	
CO ₂	"	0.0004	
H ₂ O	"	0.3	(air saturée d'eau à 25°C)

Certaines molécules peu réactives, bien mélangées, au rôle important

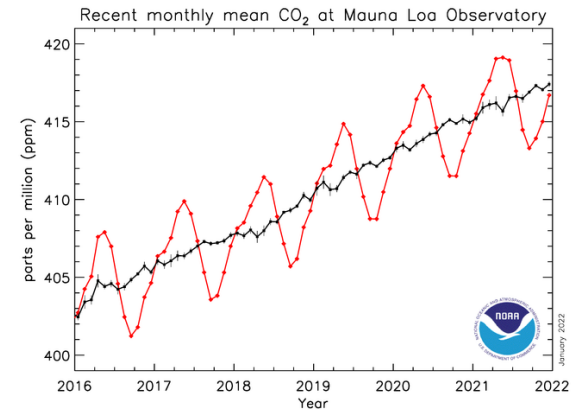
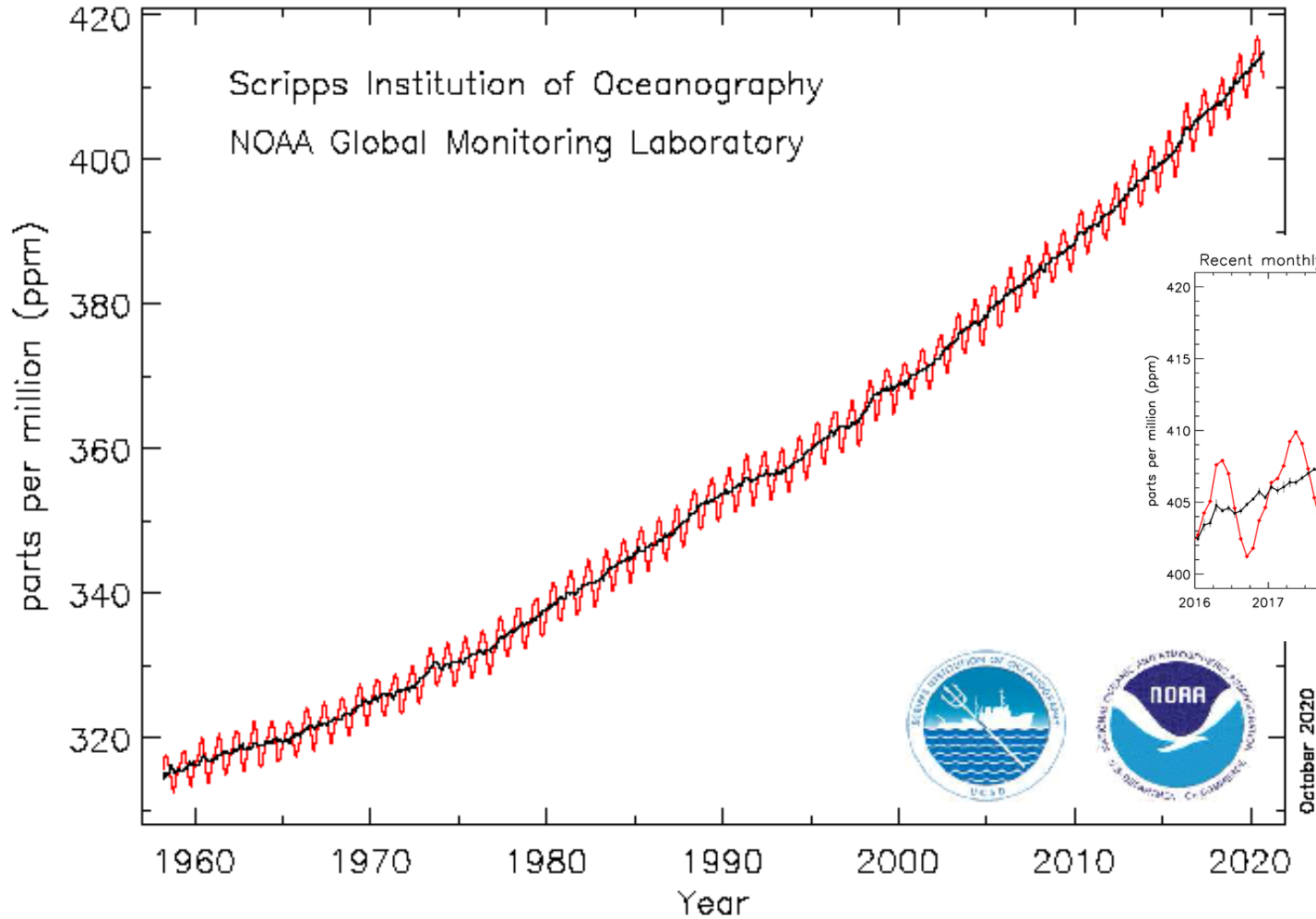
CH ₄	1.5 ppm
N ₂ O	0.25 ppm



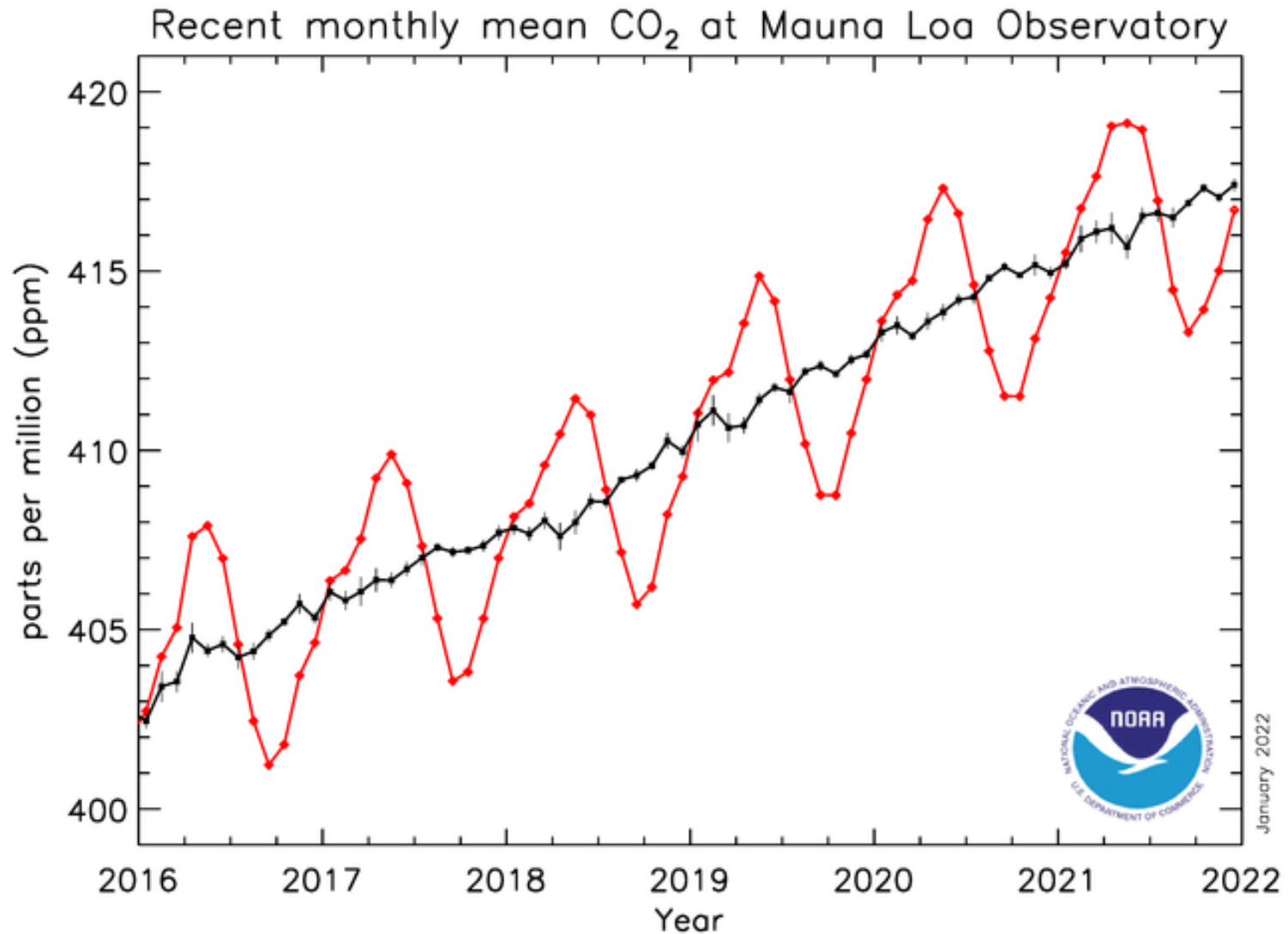
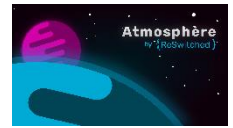
Changements atmosphériques



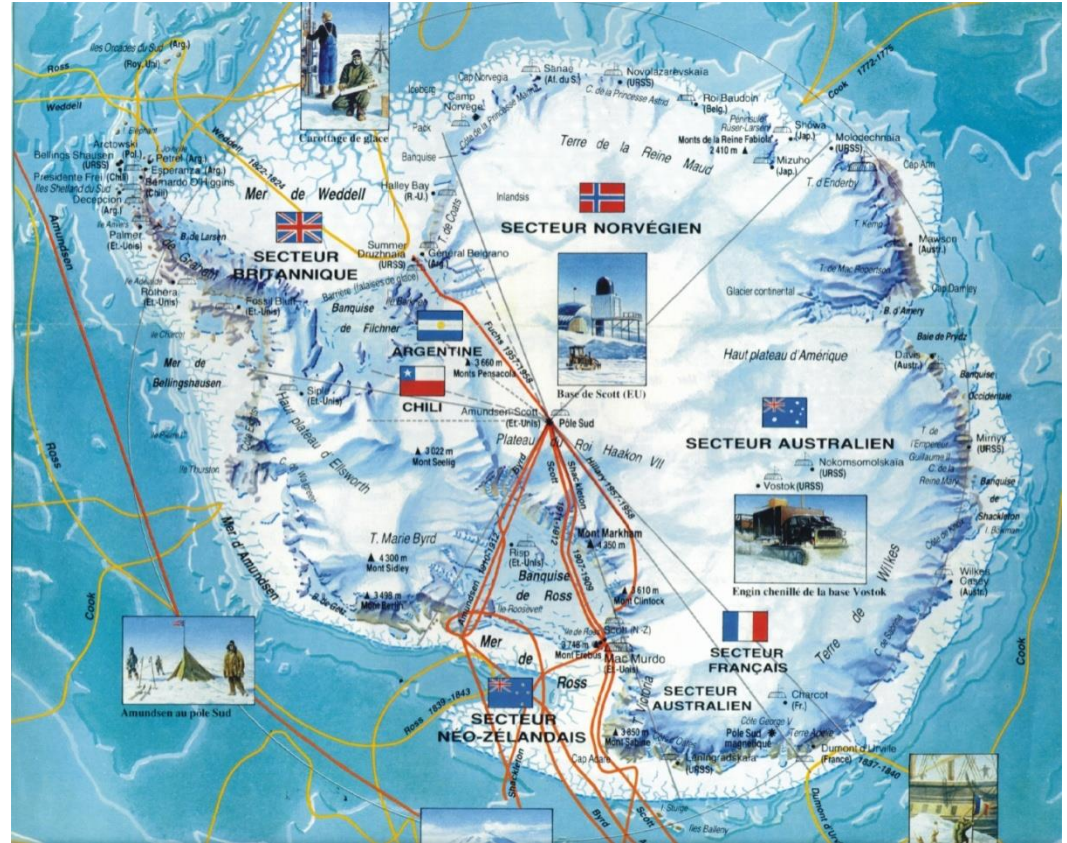
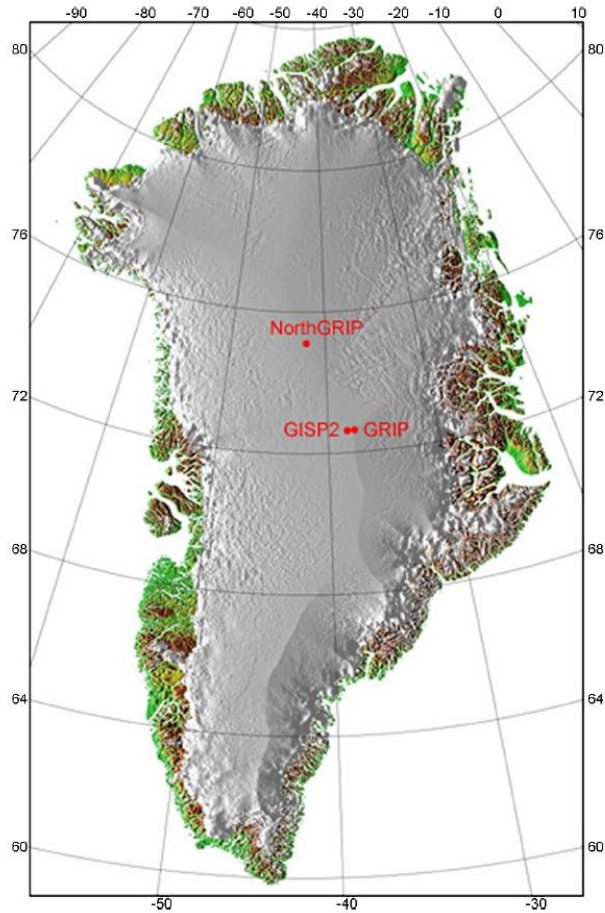
Atmospheric CO₂ at Mauna Loa Observatory

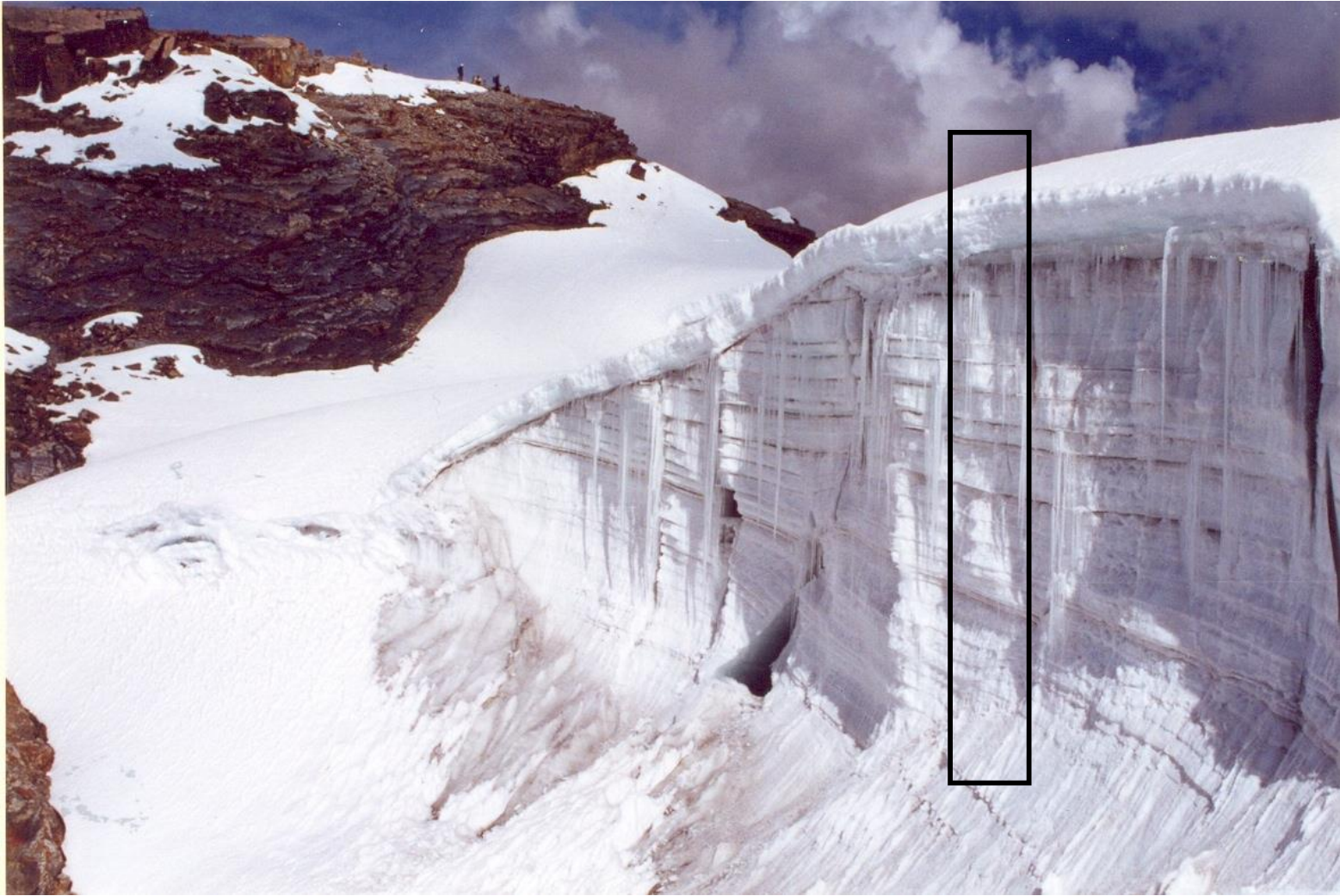


Changements atmosphériques

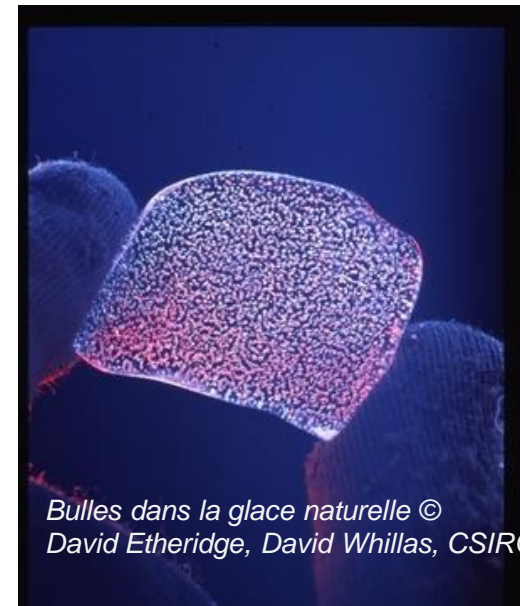


Les sites de forages polaires





Outils : carottes de glace



Objets d'étude

Bulles d'air

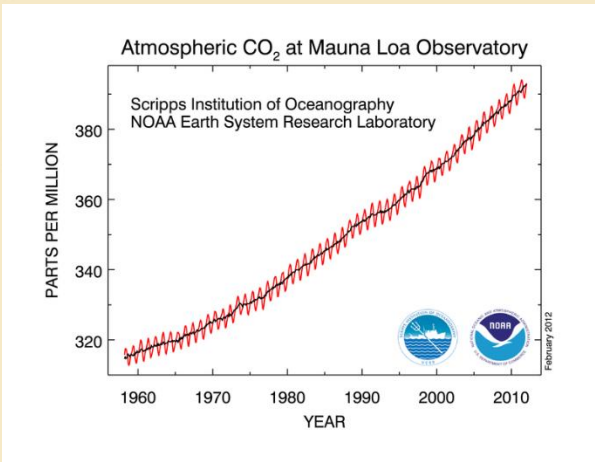
Gaz à effet de serre
CO₂ et CH₄ (entre autres)

Glace (Isotopes) Températures



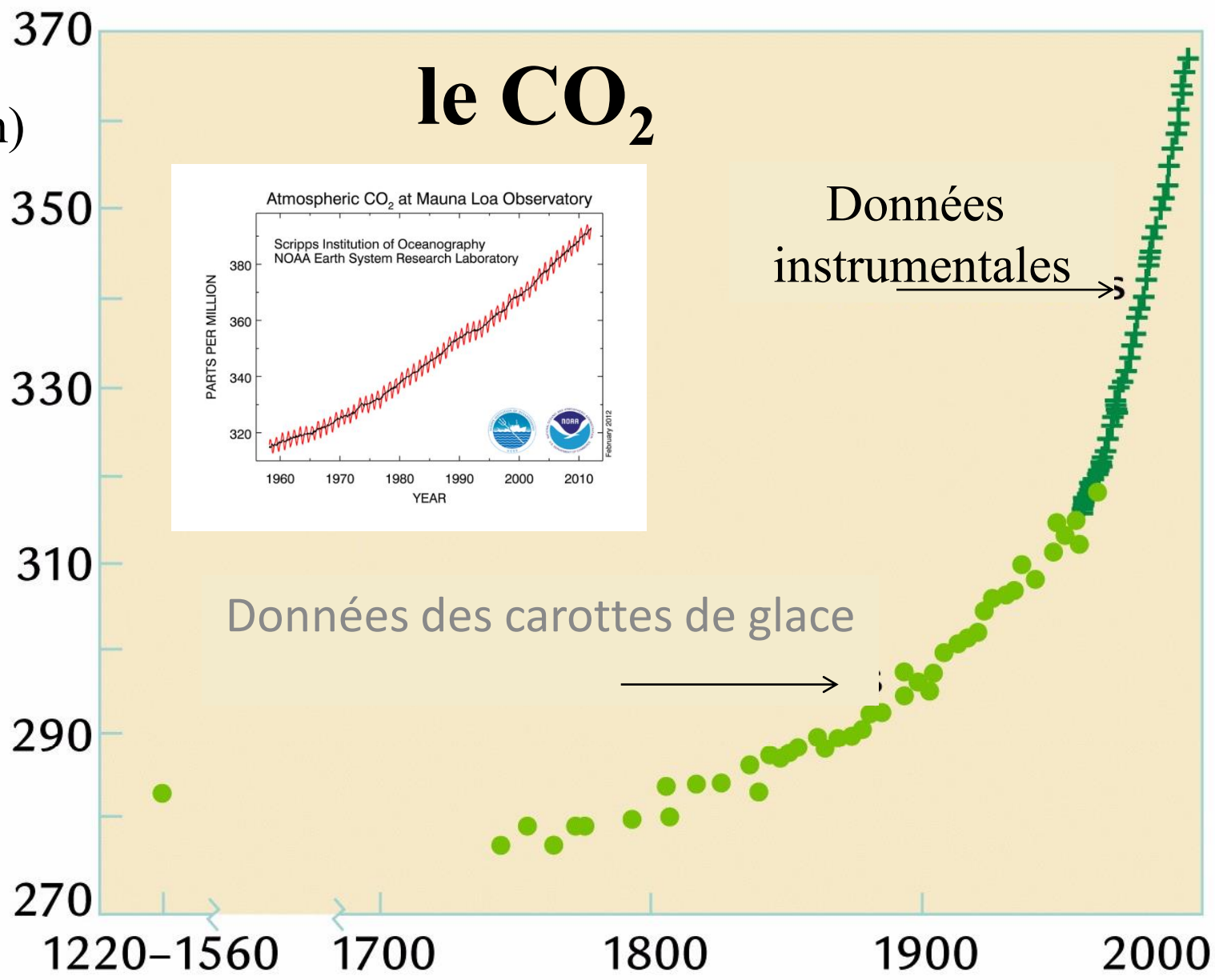
le CO₂

(ppm)



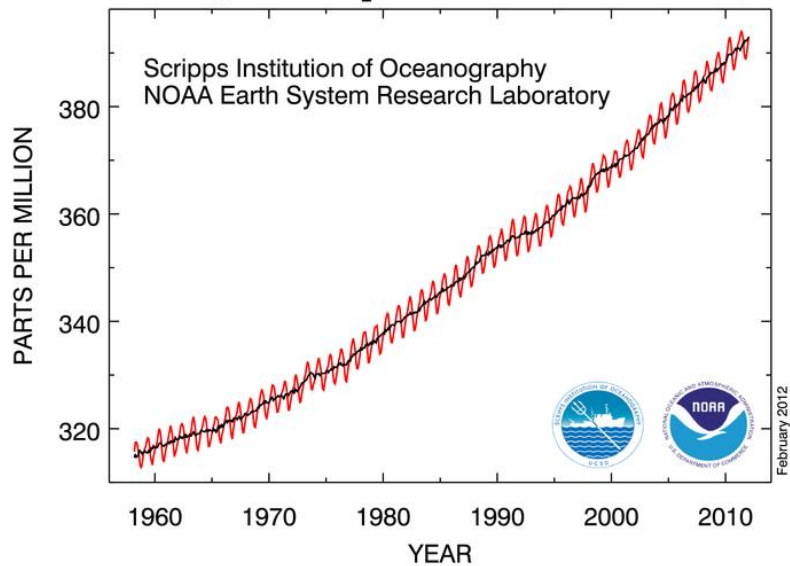
Données instrumentales →

Données des carottes de glace →



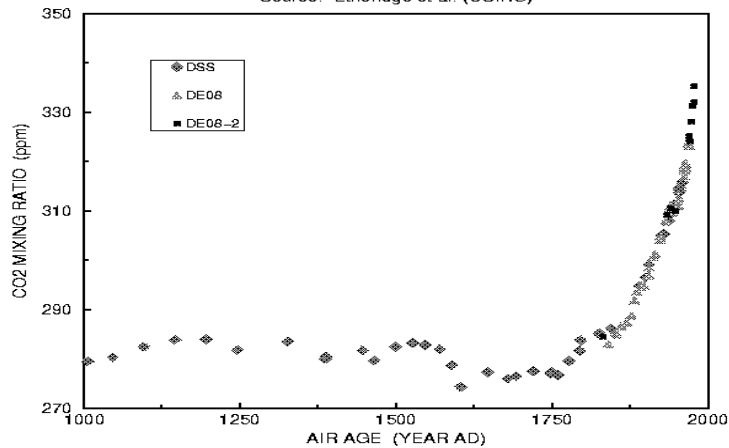
Changements atmosphériques

Atmospheric CO₂ at Mauna Loa Observatory

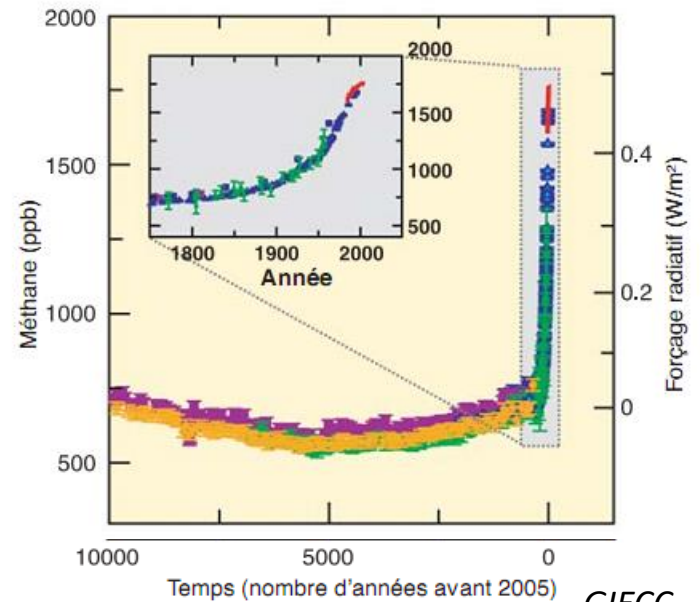
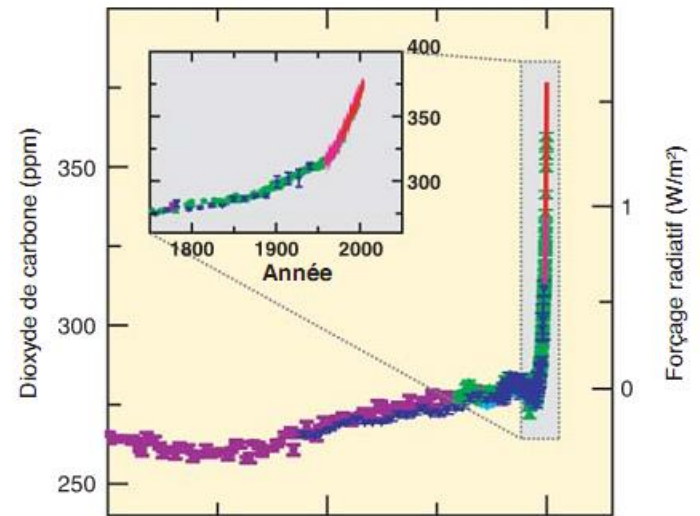


LAW DOME, ANTARCTICA ICE CORES

Source: Etheridge et al. (CSIRO)

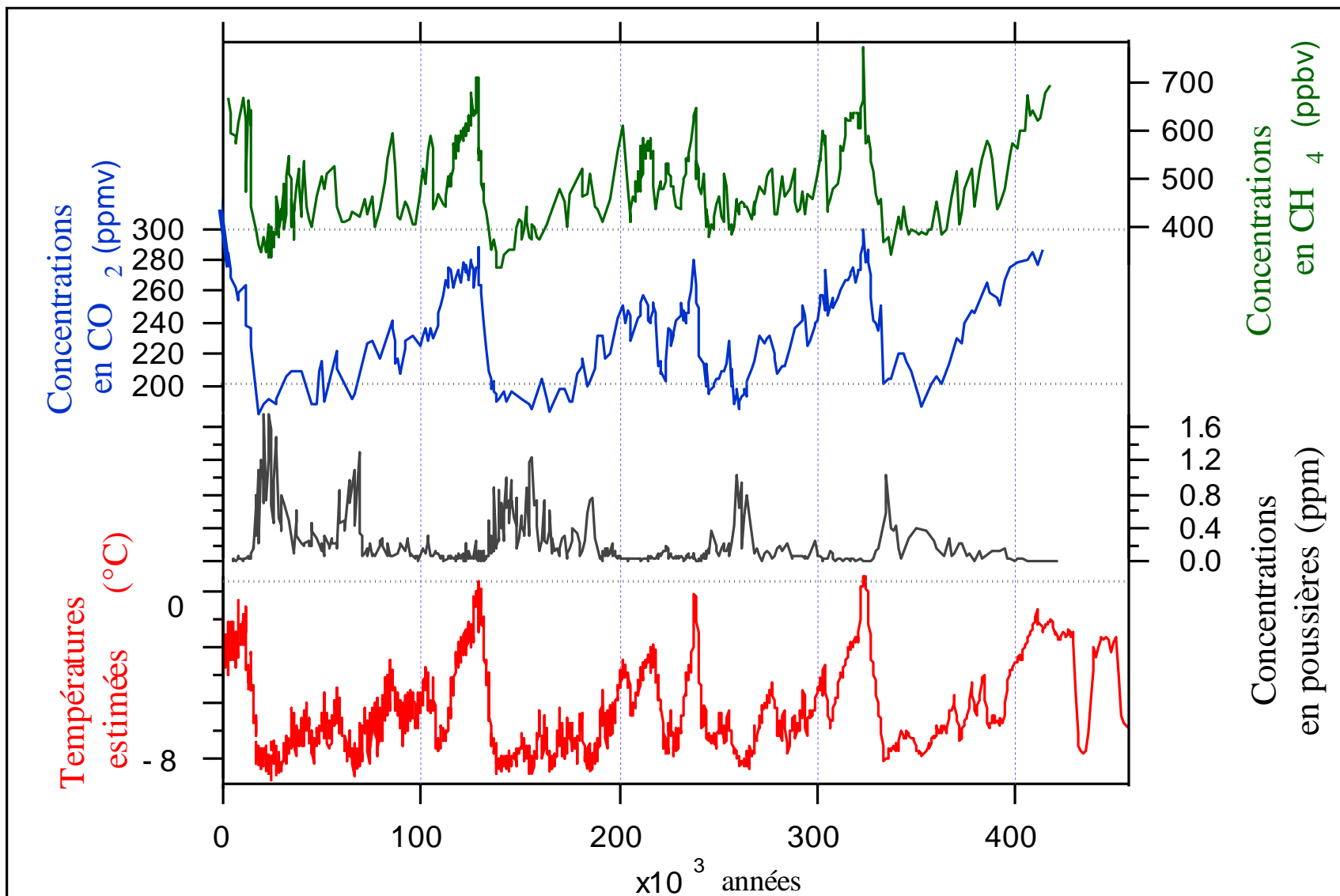


Évolution des gaz à effet de serre à partir des données des carottes de glace et de mesures récentes

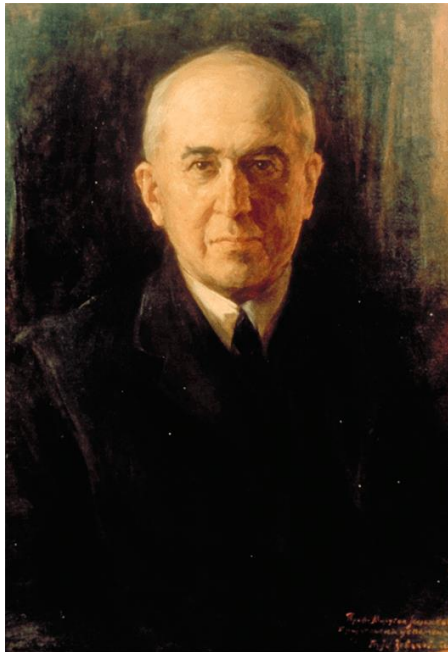


Les carottes de glaces

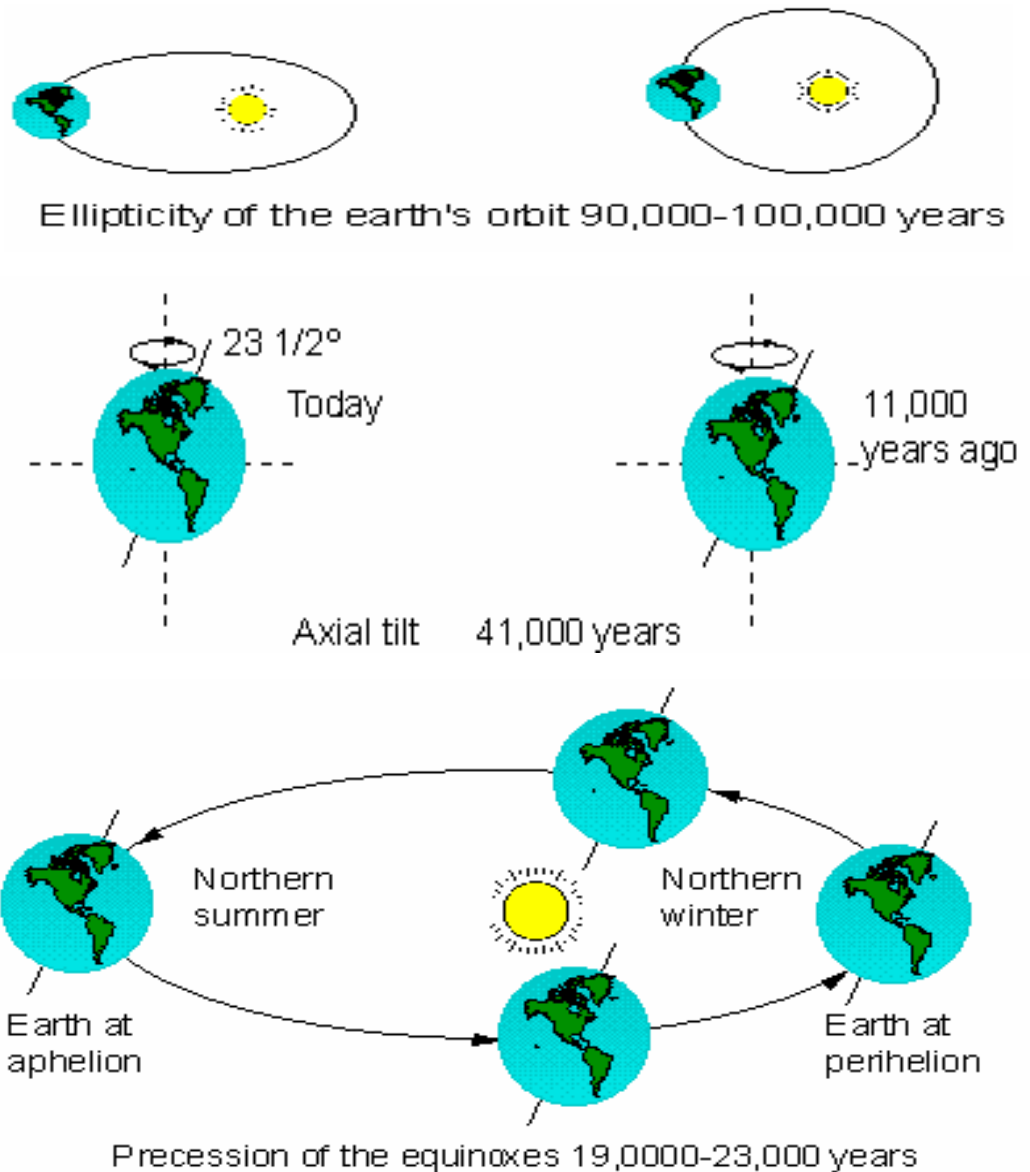
Vostok



Sur plusieurs 100 000 ans/ millions d'années Théorie astronomique des climats

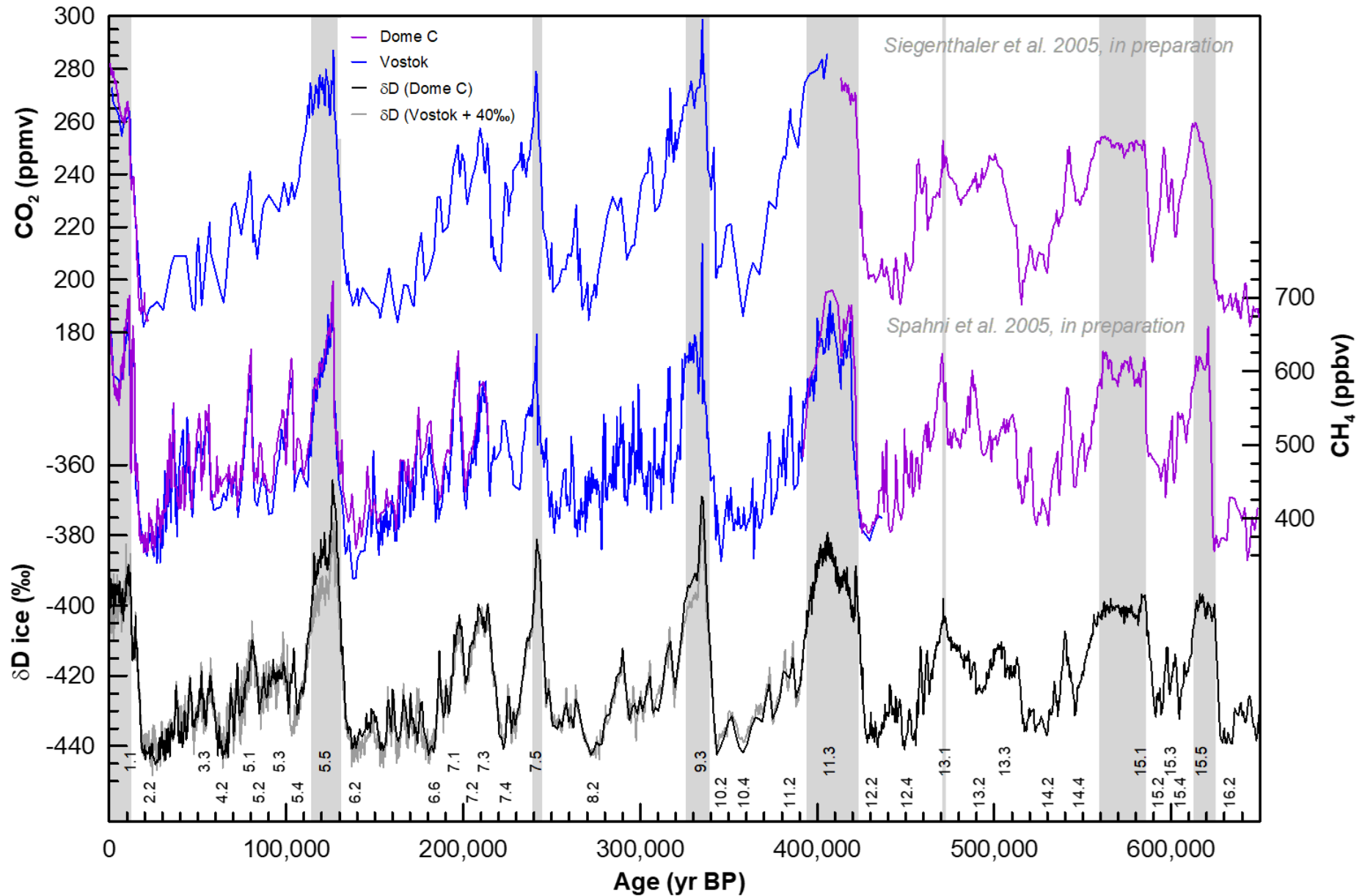


Milutin Milankovitch



Les carottes de glaces

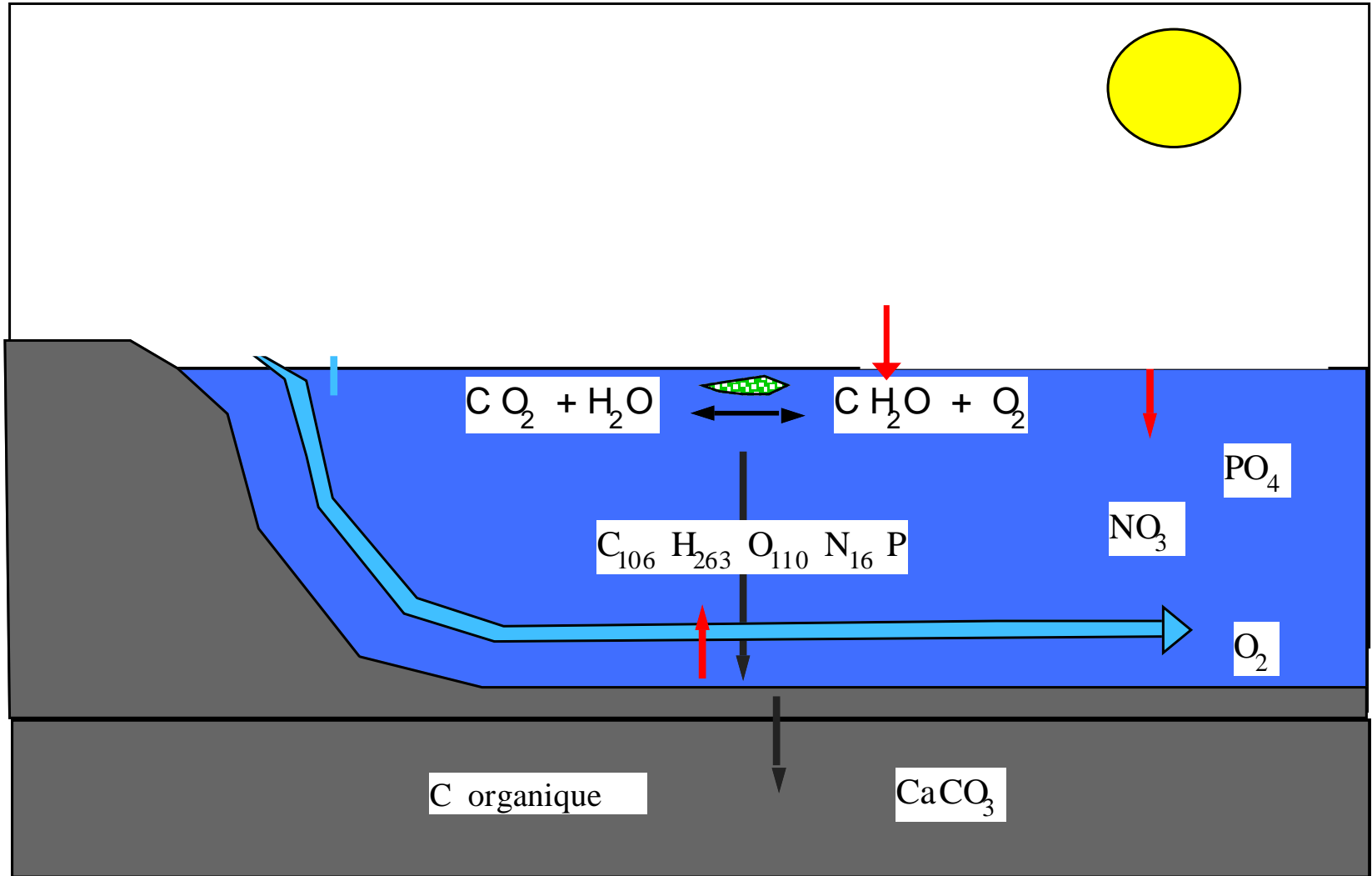
Epica – Dome C



Les carottes de glaces

Augmentation de la température de l'océan

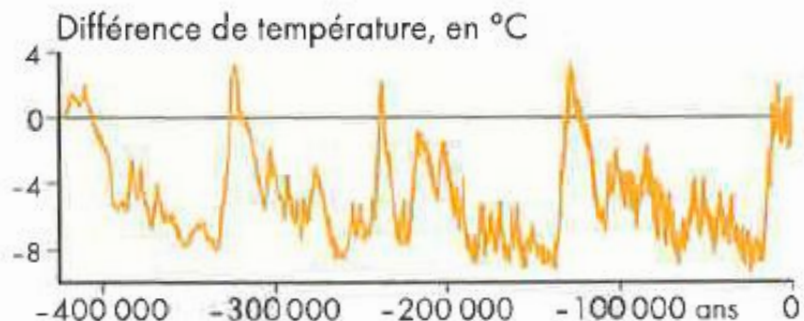
Dégazage du CO₂ de l'océan



Le fonctionnement du climat

Sur le long terme...

L'orbite de la Terre

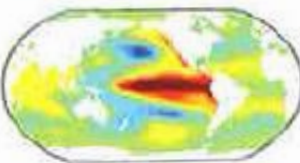


100 000 ans

Sur le court terme...

Processus chaotiques

Exemple :
El Niño



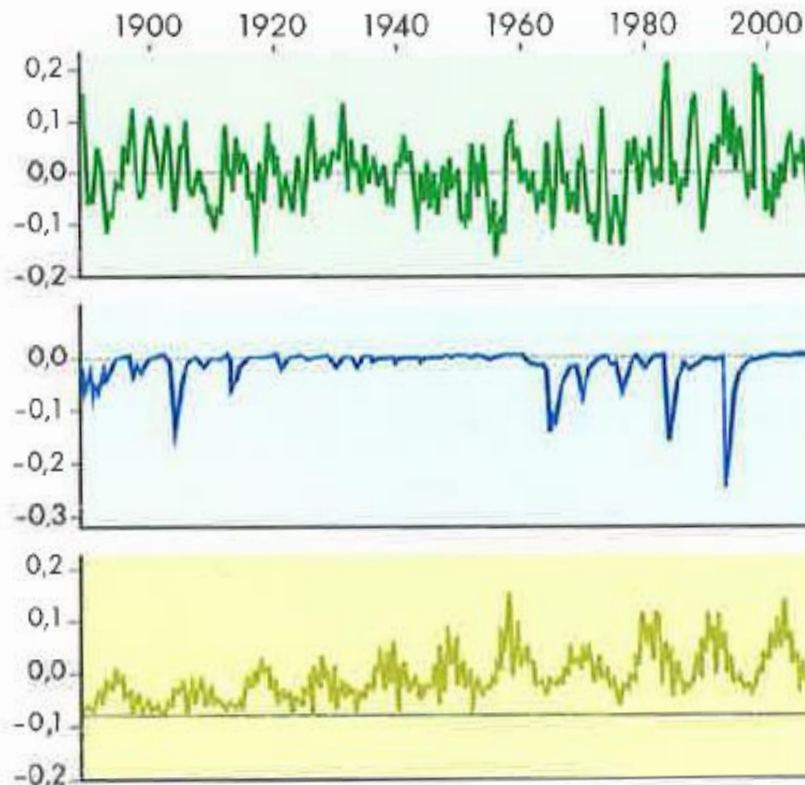
L'activité volcanique

Nuages
de cendres
et gaz à effet
de serre



L'activité solaire

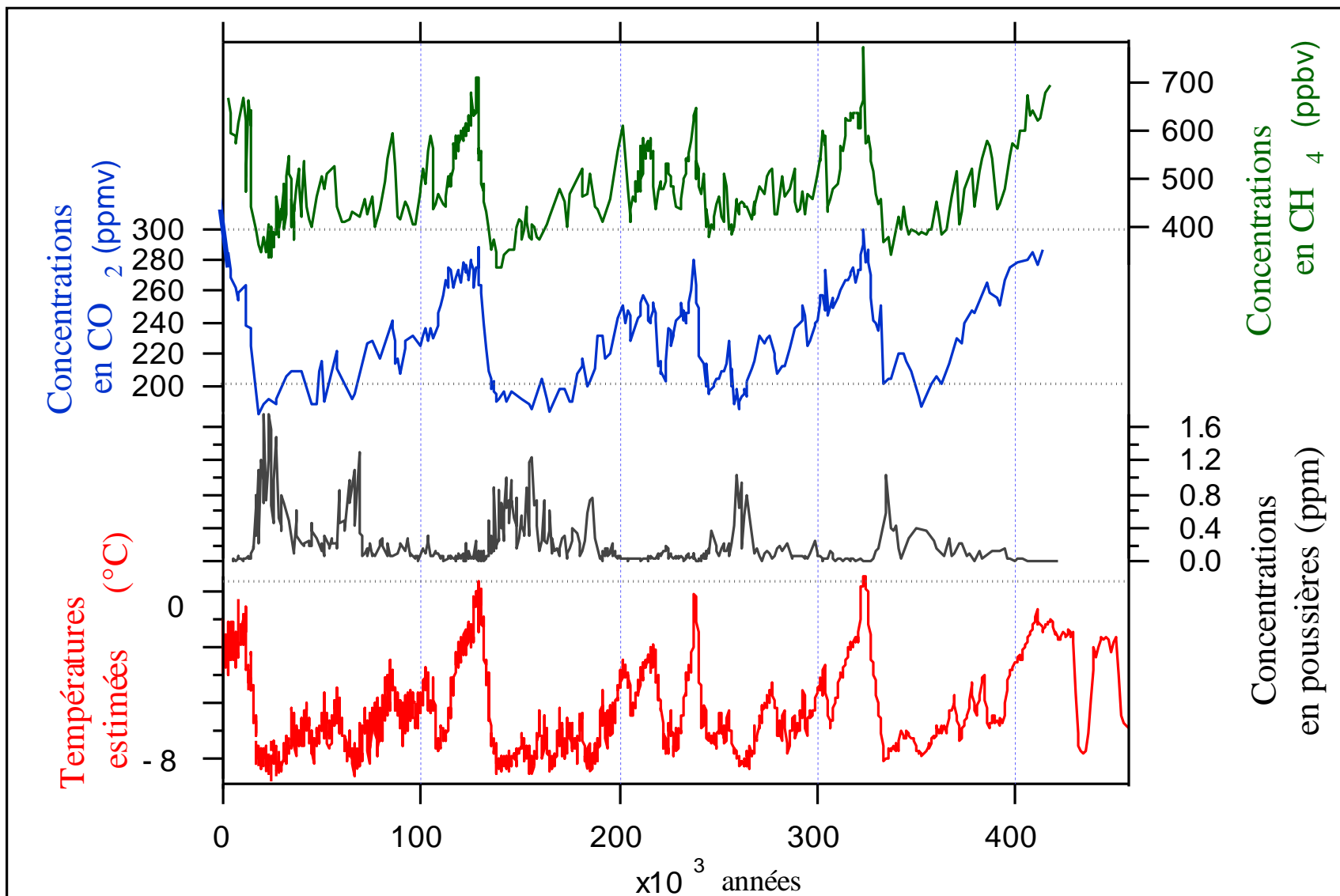
Irradiance
solaire



10 ans

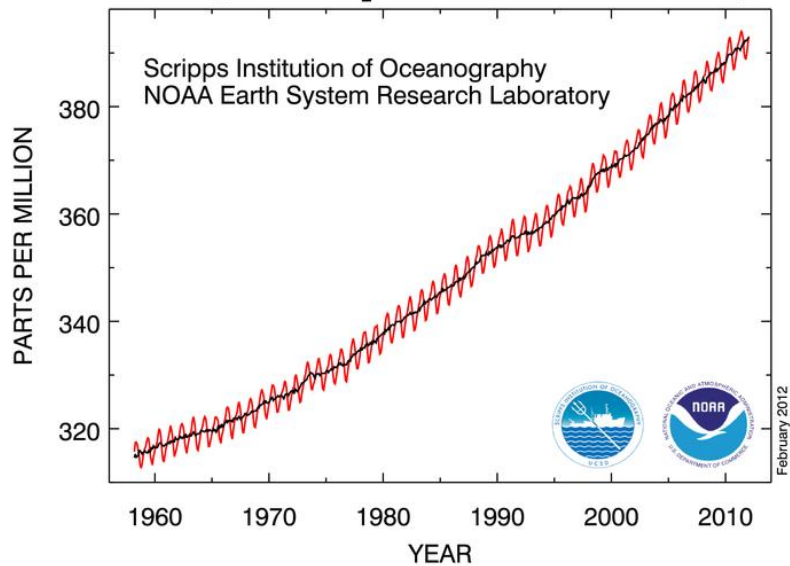
Les carottes de glaces

Vostok



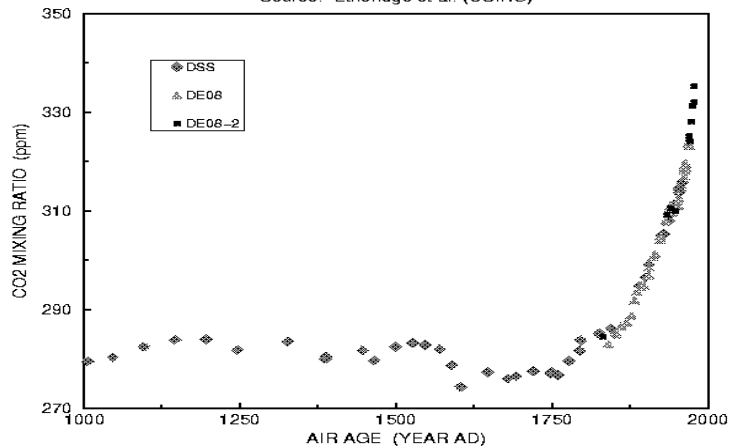
Changements atmosphériques

Atmospheric CO₂ at Mauna Loa Observatory

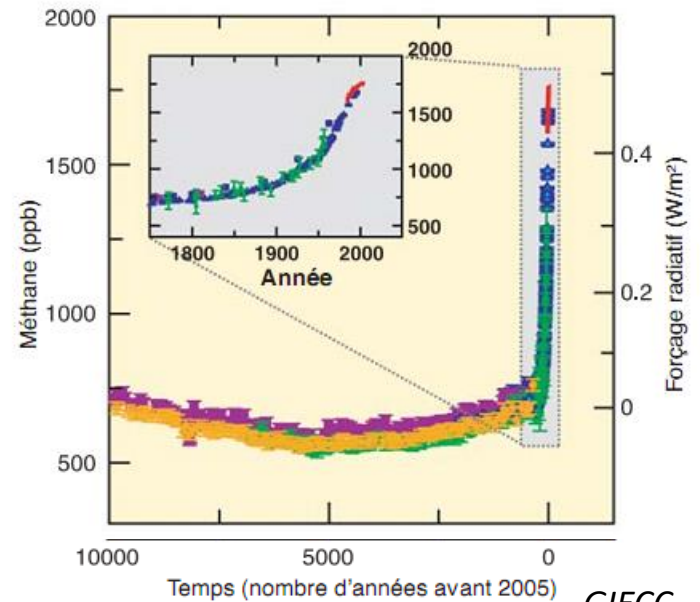
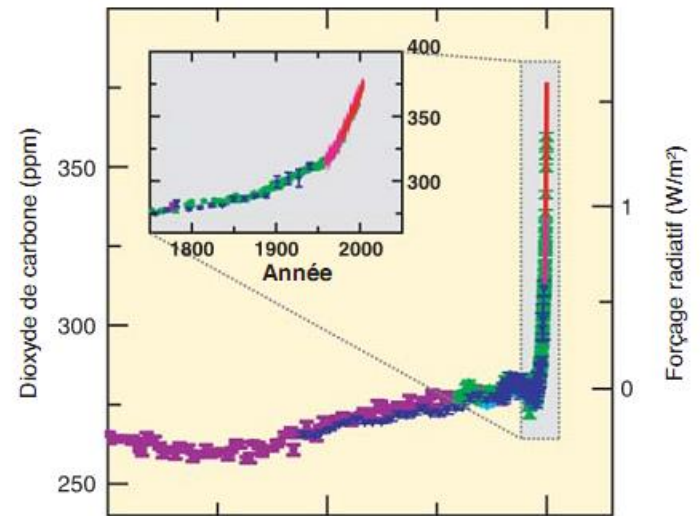


LAW DOME, ANTARCTICA ICE CORES

Source: Etheridge et al. (CSIRO)

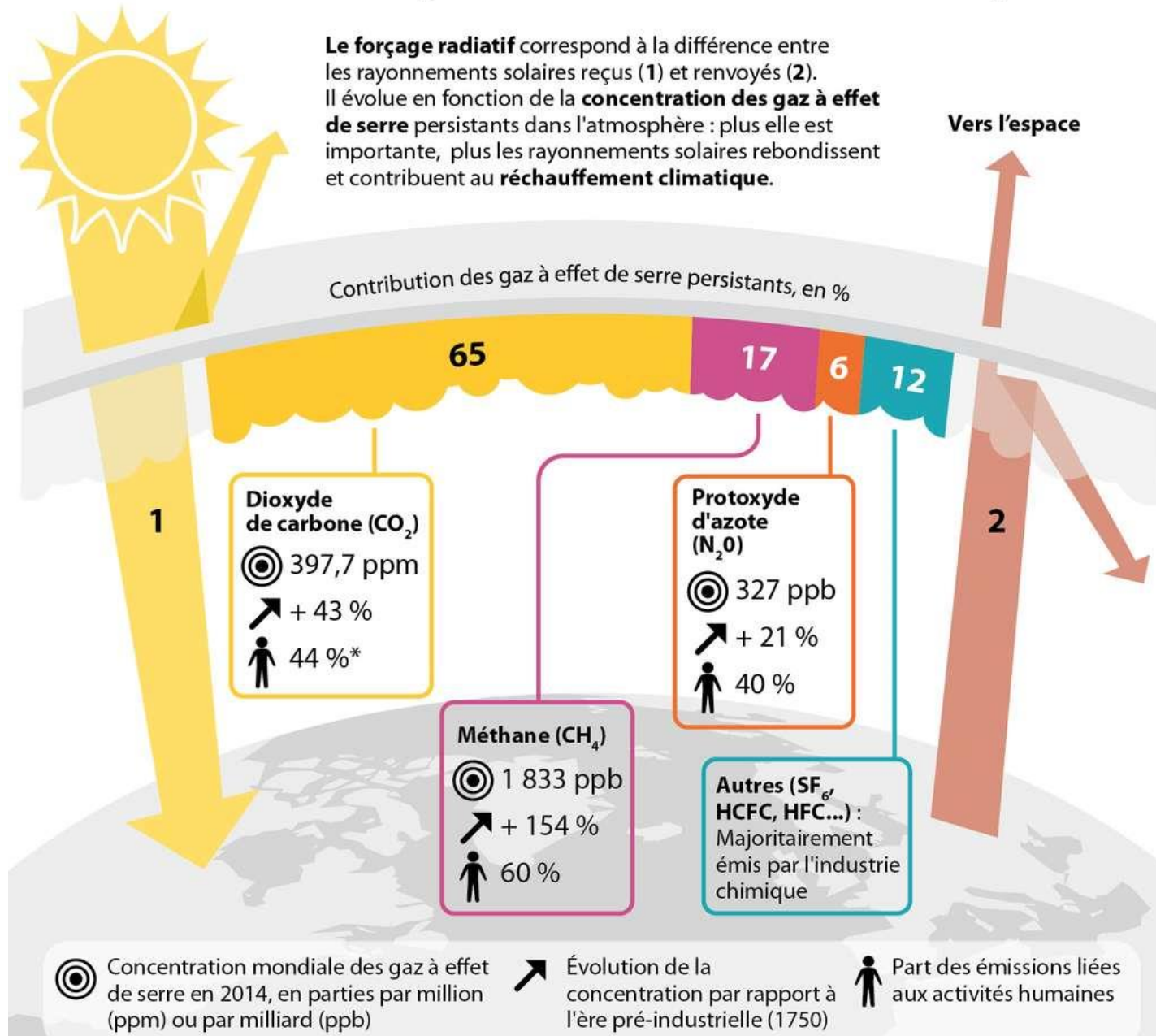


Évolution des gaz à effet de serre à partir des données des carottes de glace et de mesures récentes



La concentration des gaz à effet de serre dans l'atmosphère

Le **forçage radiatif** correspond à la différence entre les rayonnements solaires reçus (1) et renvoyés (2). Il évolue en fonction de la **concentration des gaz à effet de serre** persistants dans l'atmosphère : plus elle est importante, plus les rayonnements solaires rebondissent et contribuent au **réchauffement climatique**.



a/ Evolution du bilan radiatif terrestre

Quels sont les termes qui vont évoluer dans le bilan radiatif ?

S	Insolation	Activité solaire (rythme de 11 ans) Position de la Terre par rapport au soleil
A	Albedo	Période glaciaire : surface + blanche contribue a diminuer encore plus la température
Gaz à effet de Serre	CO2 CH4	Pompe biologique et océanique zones humides (hautes et basses latitudes)
Aérosols		
Role de la végétation		Humidité atmosphérique relative Albedo / Aerosols Capture du CO2

Conséquences:

Variations des transferts méridiens d'énergie

impacts sur les circulations océaniques et atmosphériques

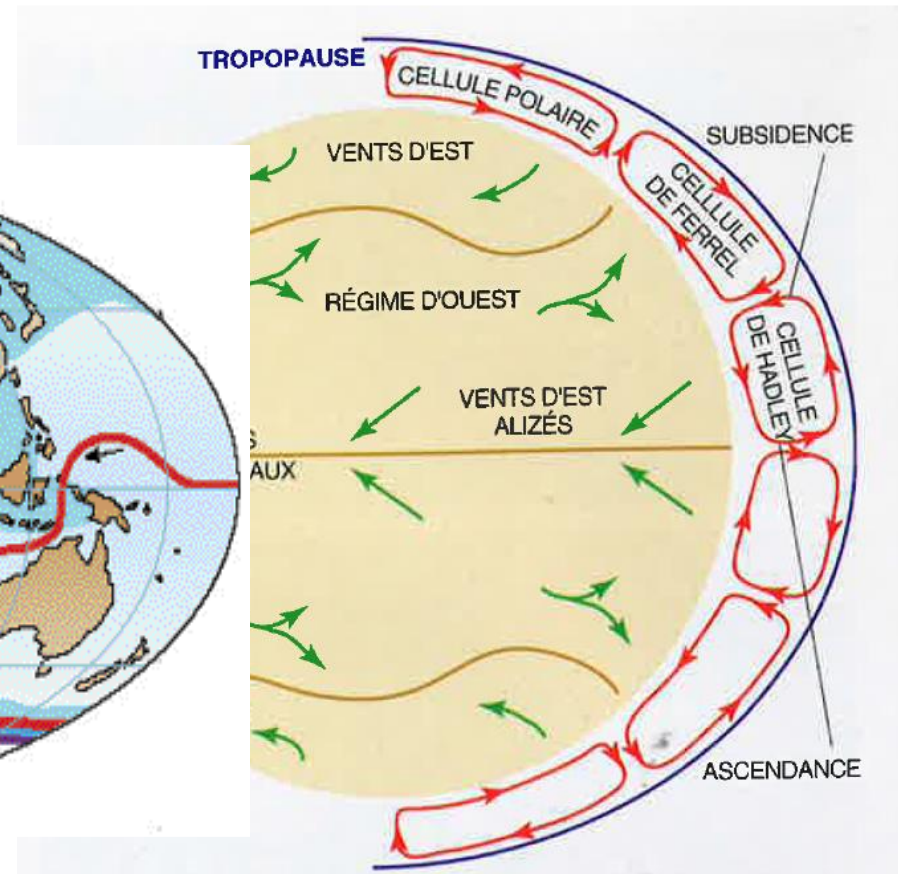
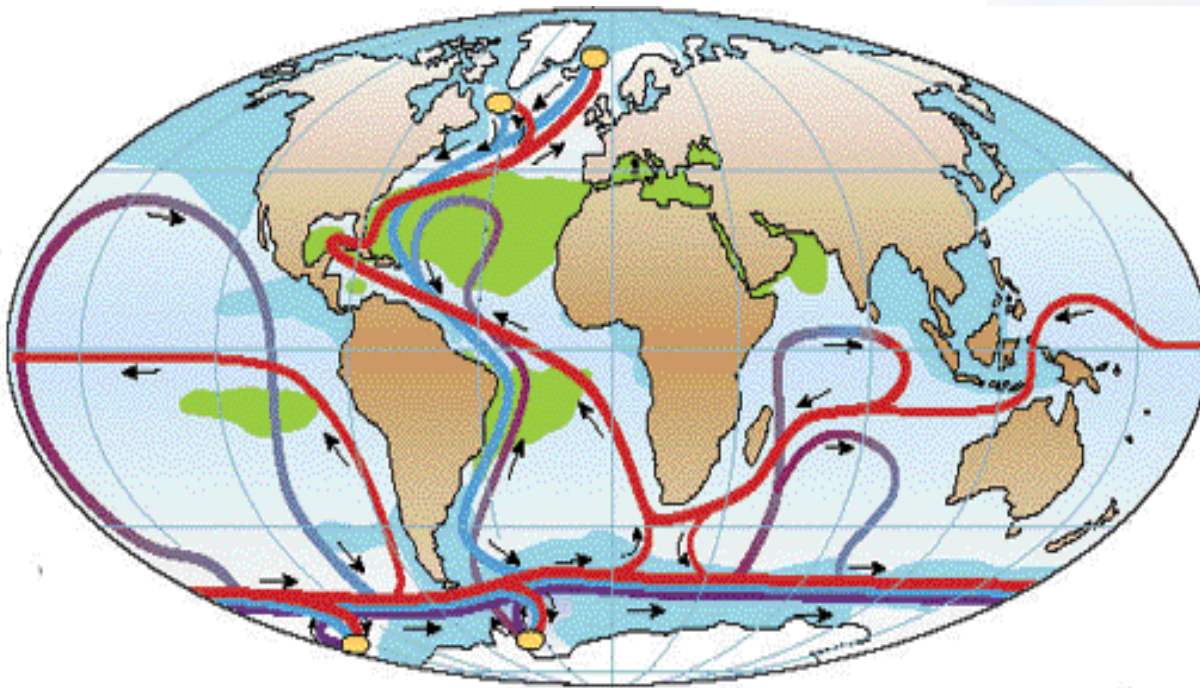
Conséquences:

Variations des transferts méridiens d'énergie ?

Circulations océaniques

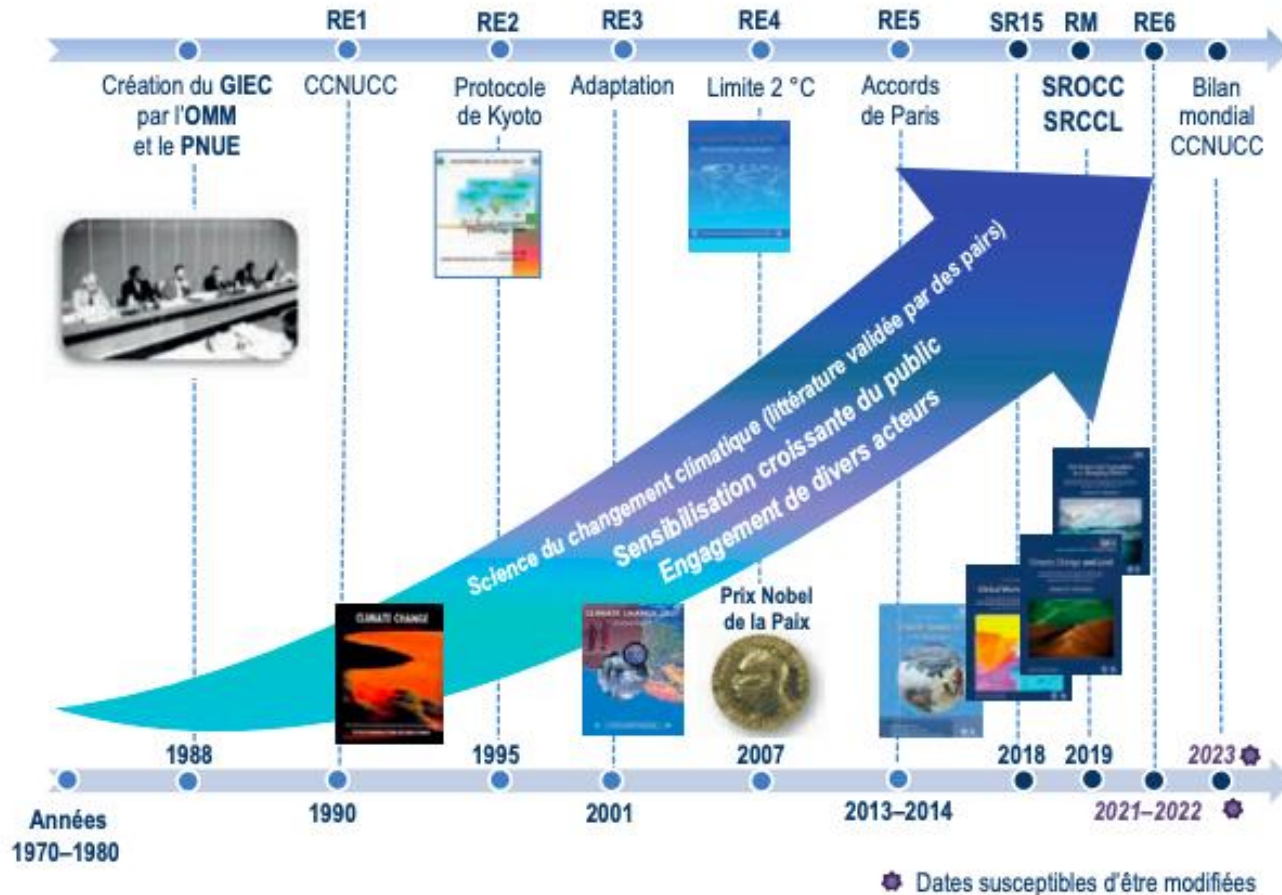
Transfert différé d'environ 2000 ans
entre hémisphère Nord et Sud

Circulations atmosphériques
transfert instantané



Giec : Groupe Intergouvernemental sur l'évolution du Climat

La contribution du GIEC à la science du changement climatique et à l'élaboration des politiques climatiques



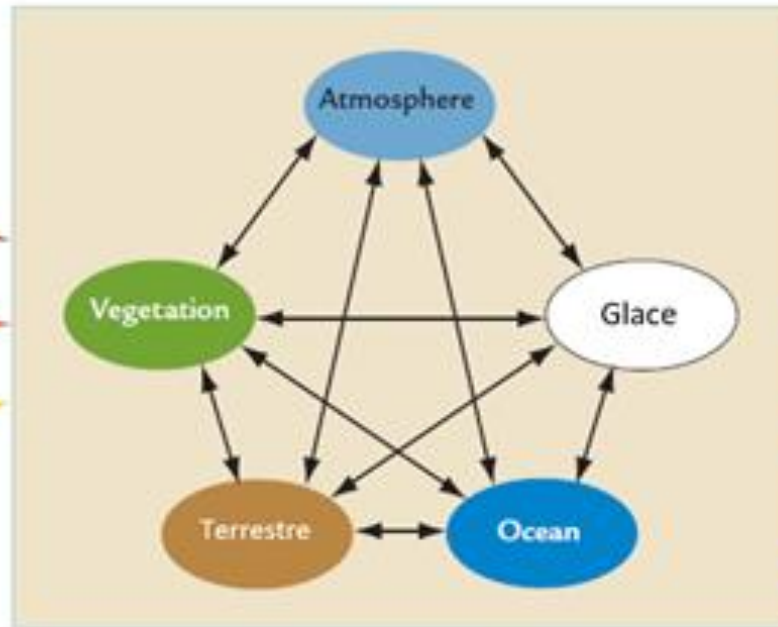
Forçage externe

Forçage
Tectonique

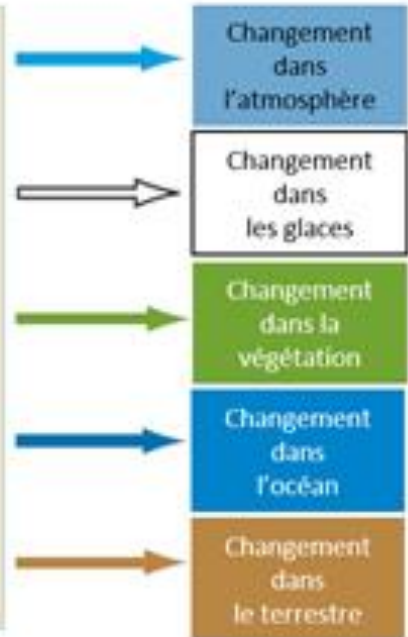
Forçage
Astronomique

Forçage
Solaire

Système climatique



Changements climatiques



Ruddiman, 2013

Rôle Anthropique dans le futur

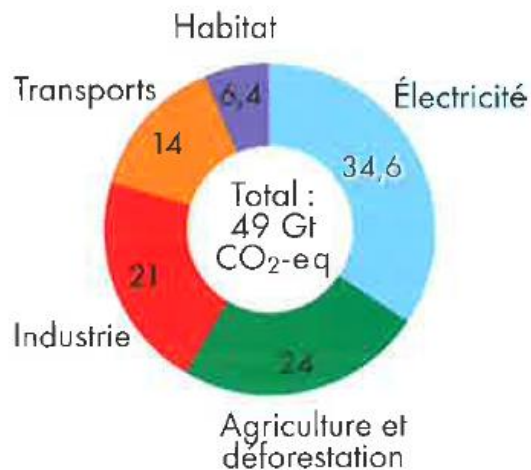
Conséquences du réchauffement climatique
Se dirige-t-on vers de nouveaux équilibres ?



Les perturbations actuelles et leurs impacts

LES ÉMISSIONS DE CO₂ PAR ACTIVITÉ

Répartition des activités humaines génératrices de gaz à effet de serre, en %

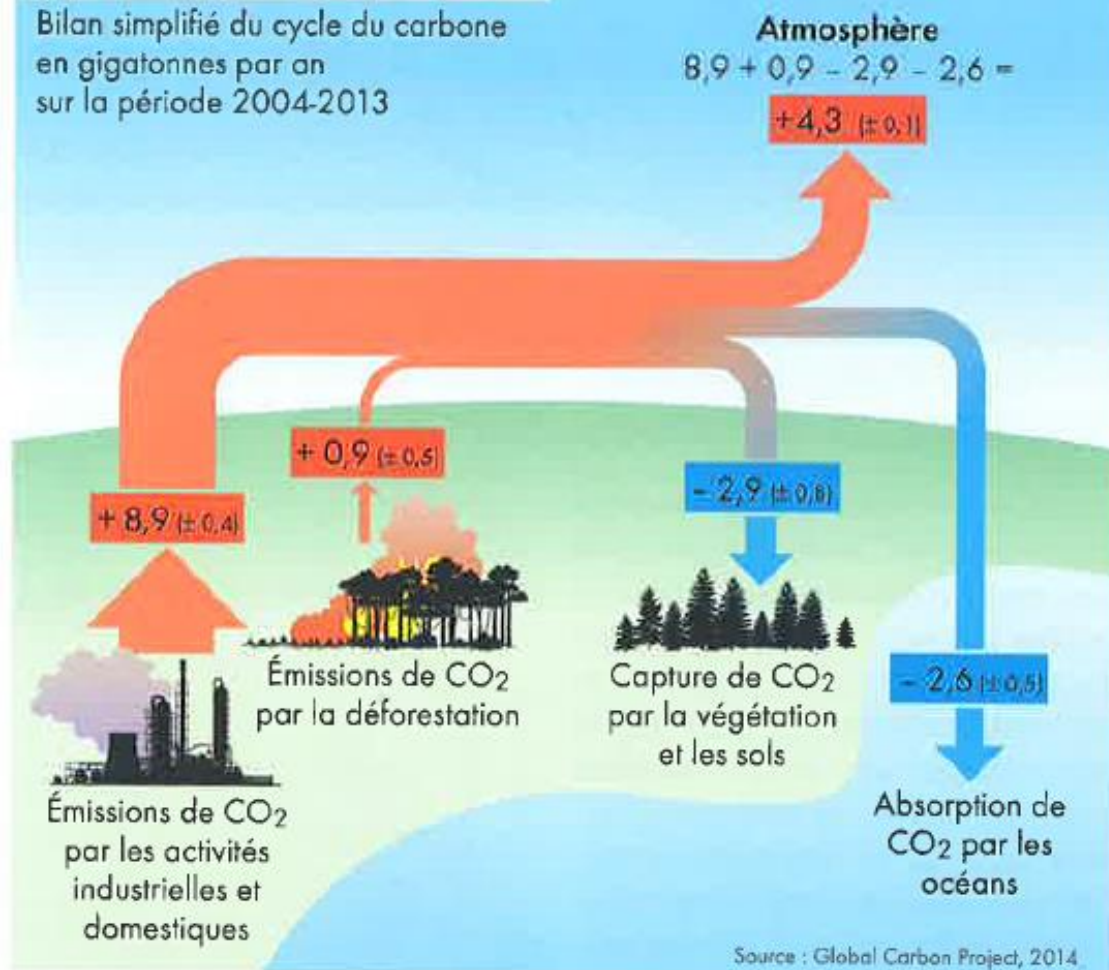


Source : GIEC,

Changements climatiques 2013 : rapport de synthèse.

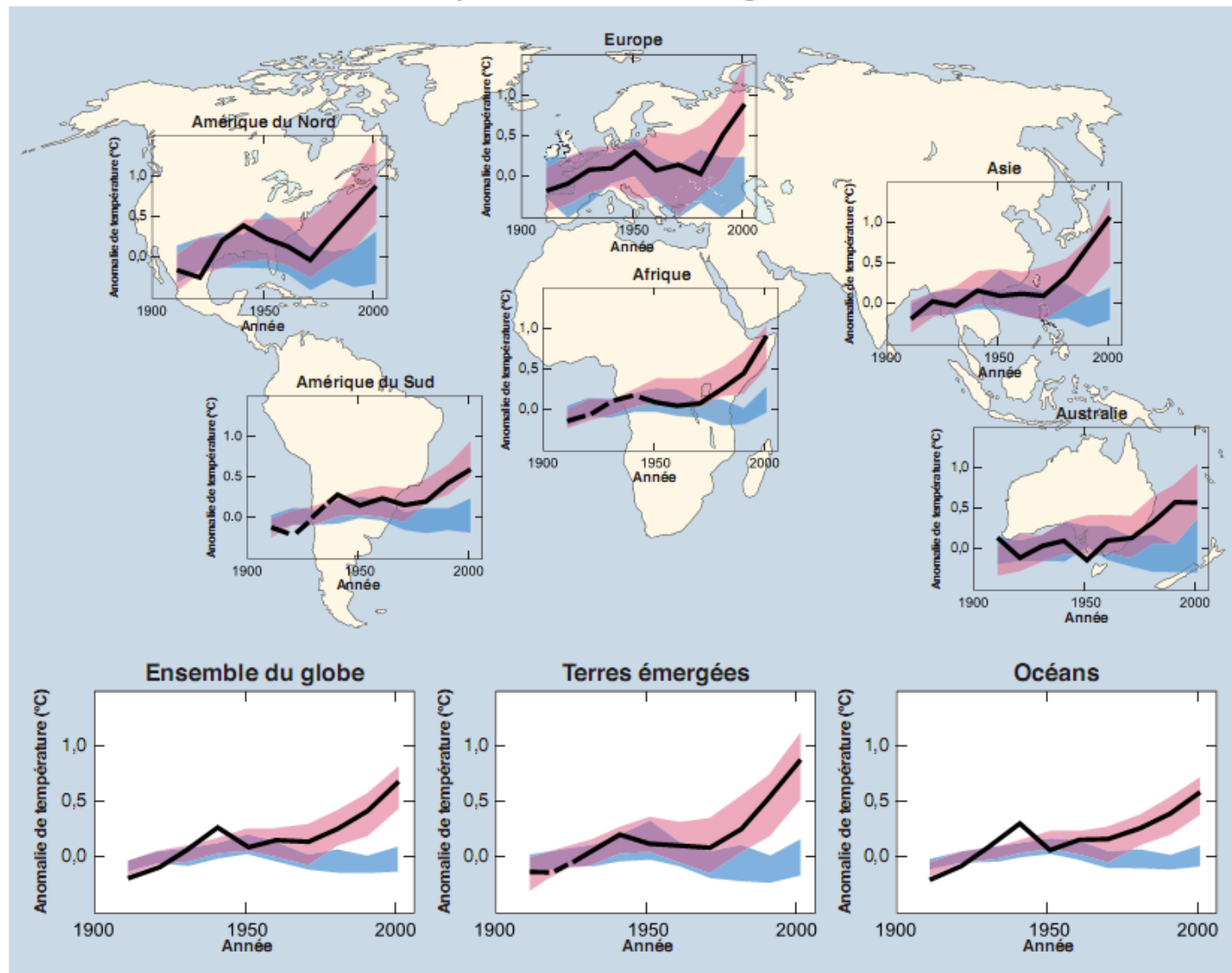
LE CYCLE DU CARBONE SUR TERRE

Bilan simplifié du cycle du carbone en gigatonnes par an sur la période 2004-2013



Les perturbations actuelles et leurs impacts

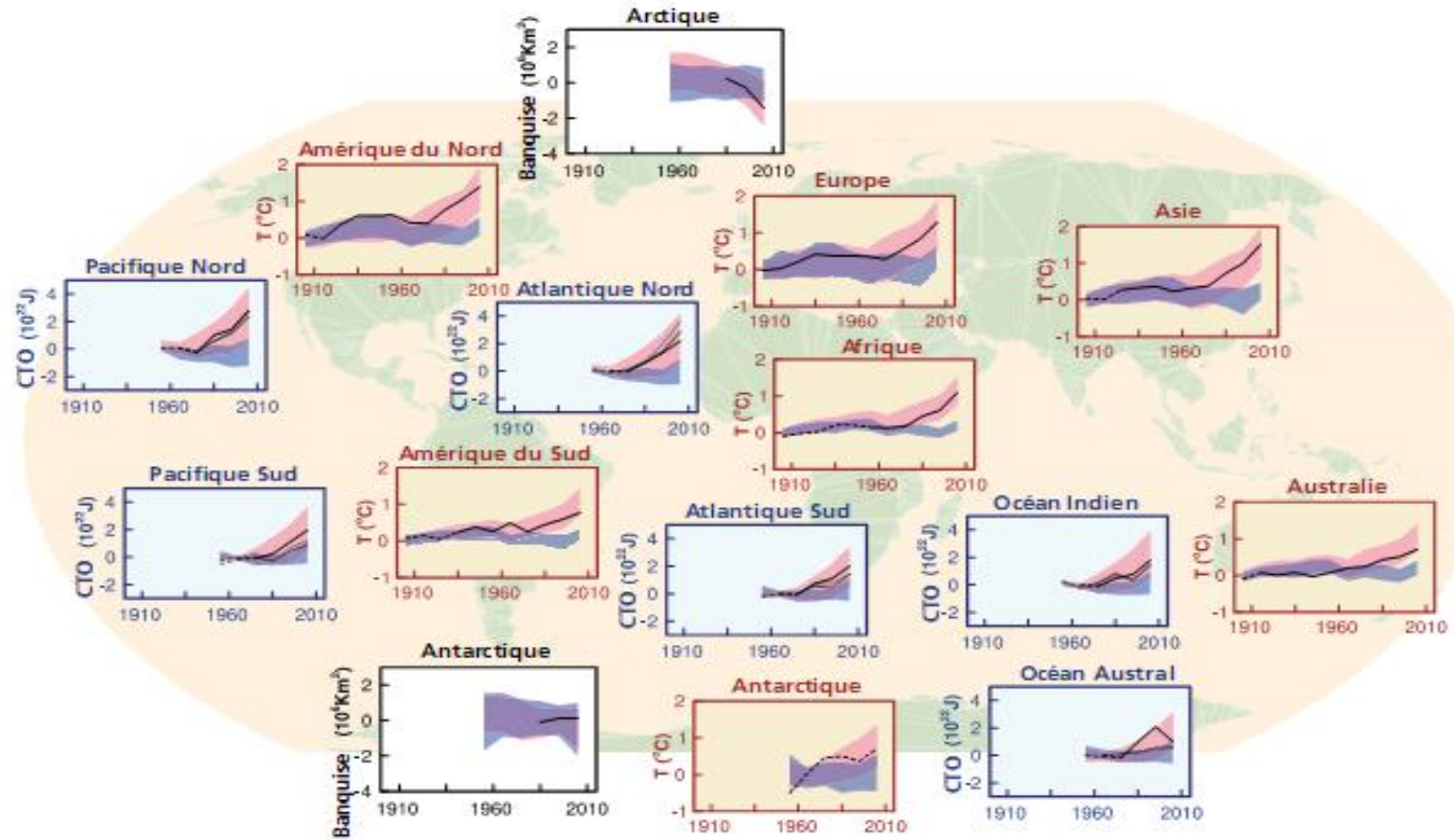
Variation des températures à l'échelle du globe et des continents



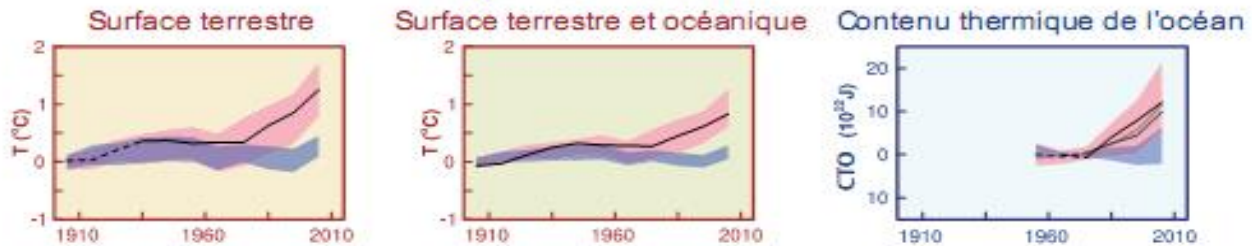
Modèles intégrant les forçages naturels seulement
Modèles intégrant les forçages naturels et anthropiques

— Observations

Les perturbations actuelles et leurs impacts



Moyennes mondiales



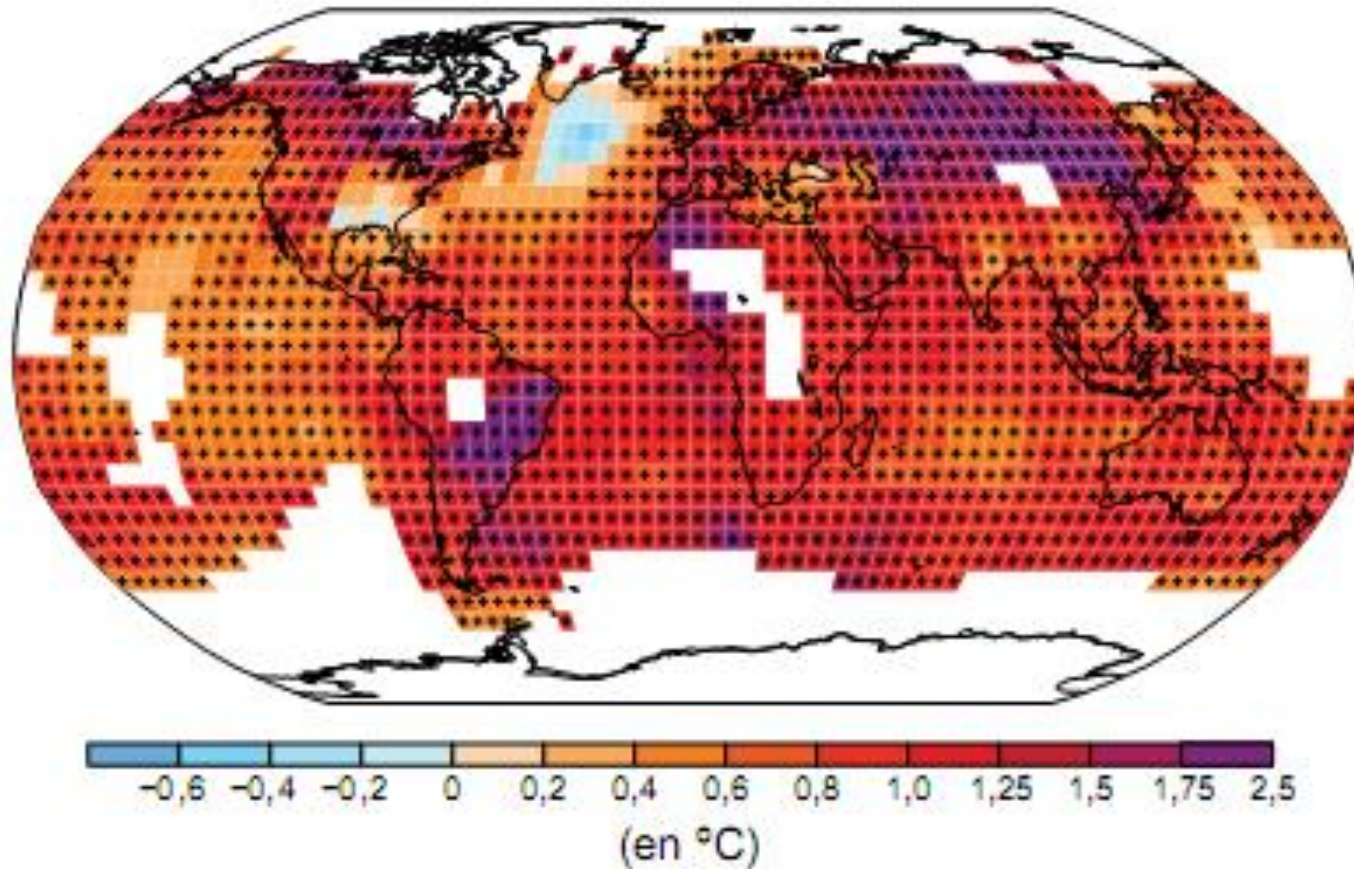
≡ Observations

■ Modèles n'utilisant que les forçages naturels

■ Modèles utilisant les forçages naturels et anthropiques

Les changements globaux actuels

b) Évolution de la température en surface observée entre 1901 et 2012



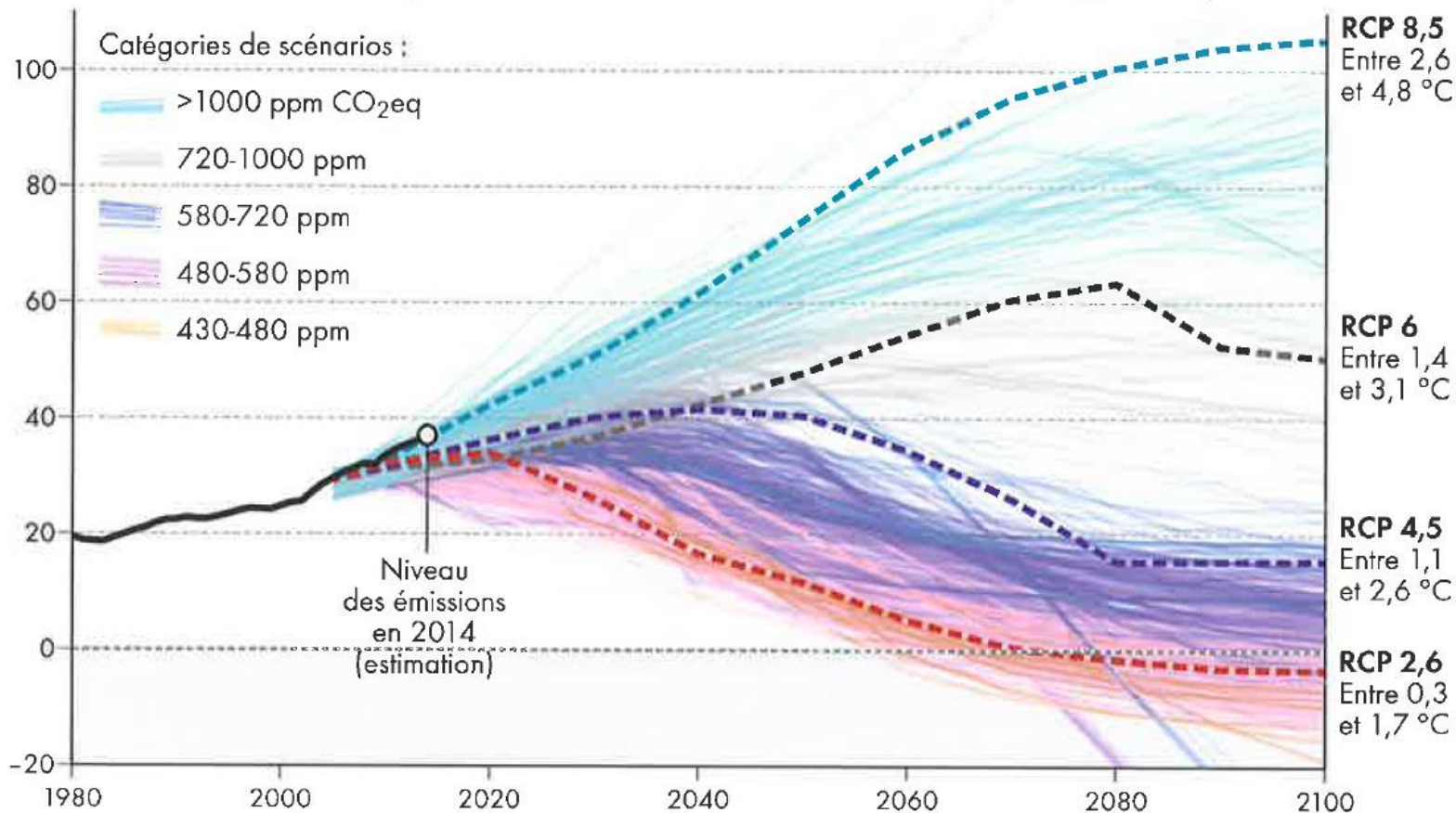
Le temps de l'action



SIMULATION DU CLIMAT : LES SCÉNARIOS D'ÉMISSION DE CO₂ AU XXI^e SIÈCLE

Émissions globales de CO₂ dues aux combustibles fossiles et à la production de ciment, en milliards de tonnes/an

Nom de code du scénario et prévision d'augmentation de la température en 2100 par rapport à la période 1850-1900

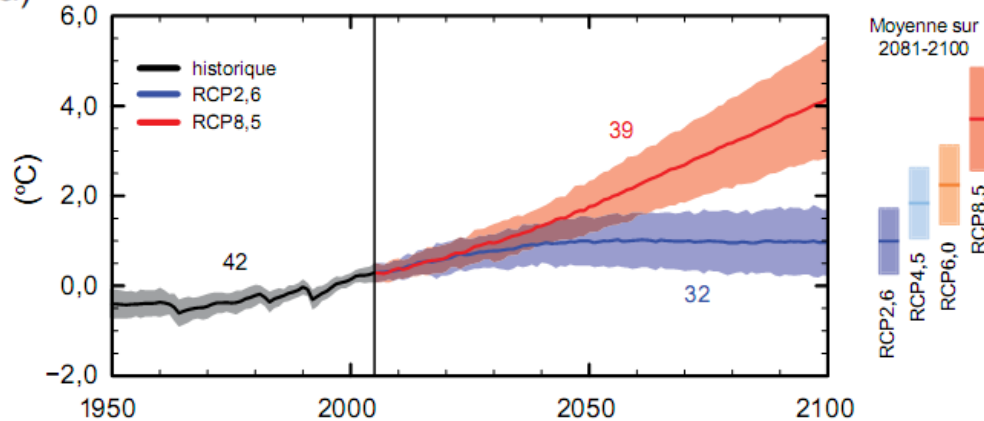


Note : RCP = profil représentatif d'évolution de concentration du CO₂.

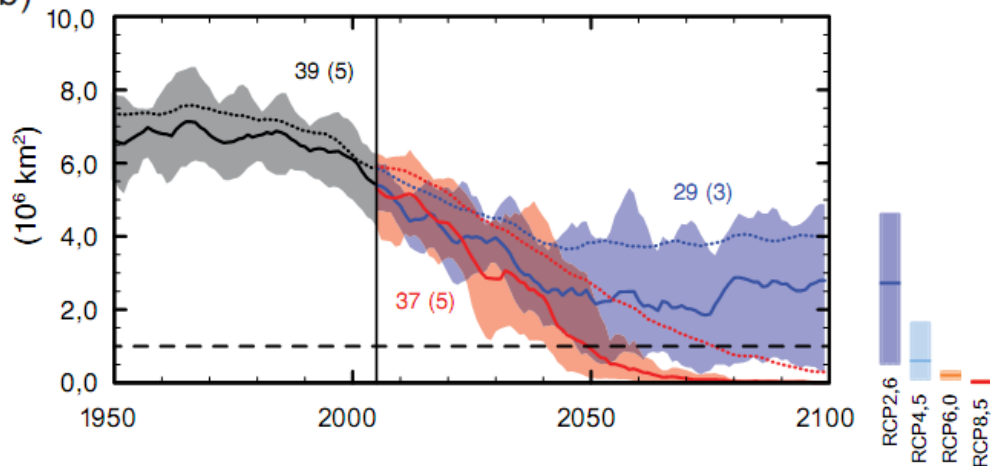
D'après Center for International Climate and Environmental Research, 2014.

Conséquences de l'augmentation de CO2 atmosphérique

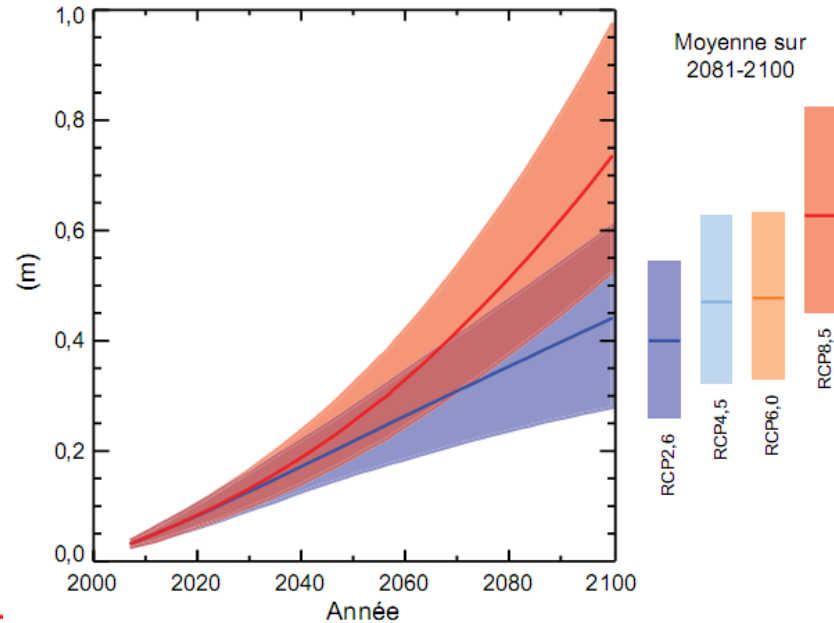
a) Évolution de la température moyenne à la surface du globe



b) Étendue de la banquise de l'hémisphère Nord en septembre



Élévation du niveau moyen des mers à l'échelle du globe



Les perturbations prochaines

POPULATIONS IMPACTÉES PAR LA MONTÉE DES EAUX PAR CONTINENT



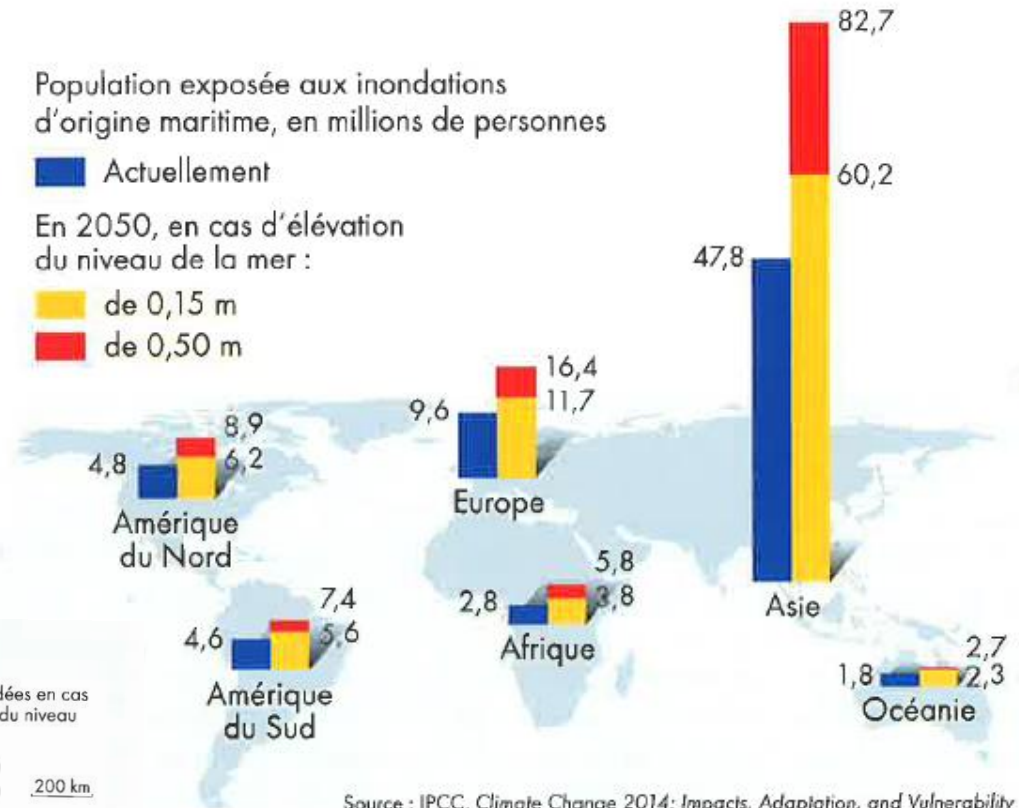
Population exposée aux inondations d'origine maritime, en millions de personnes

■ Actuellement

En 2050, en cas d'élévation du niveau de la mer :

■ de 0,15 m

■ de 0,50 m



Source : IPCC, *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability*.

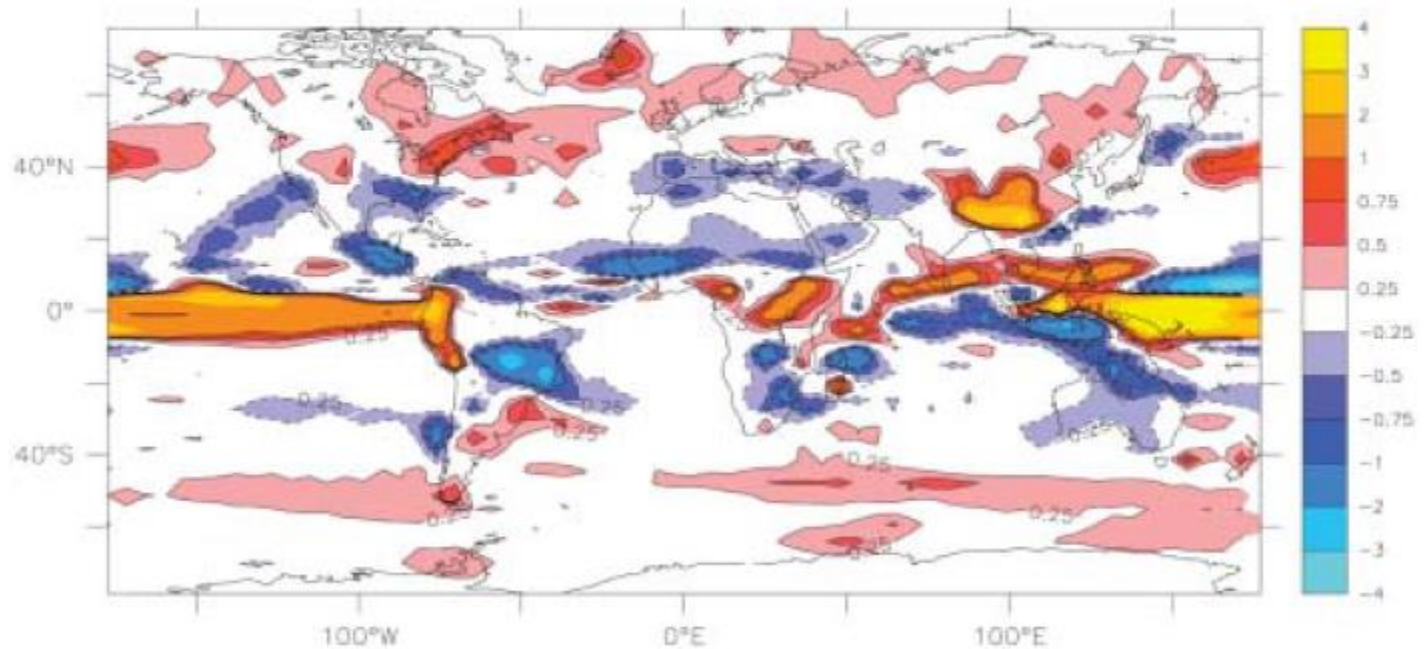
LE GOLFE DU MEXIQUE CONFRONTÉ À L'ÉLEVATION DU NIVEAU DES MERS



Bréon et Luneau, 2018

Changements atmosphériques

**Changements
climatiques, entre 1860
et 2100, calculés avec
le modèle de l'IPSL.**

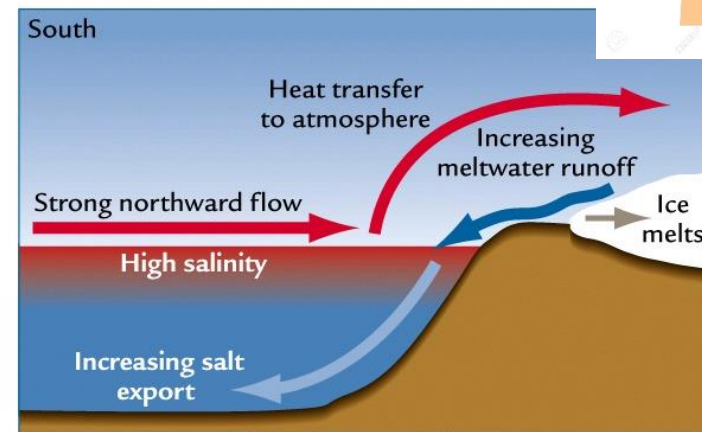
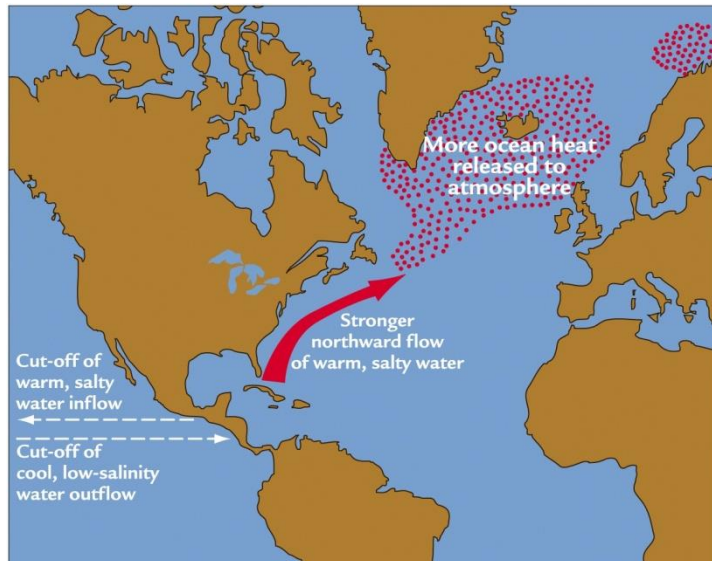


Changement de
précipitations
(en mm/j)

Conséquences de l'augmentation de CO2 atmosphérique sur :



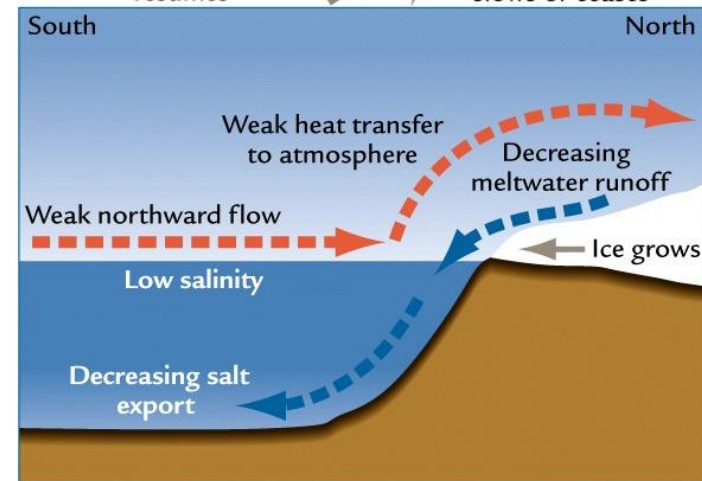
Débâcle d'icebergs et circulation océanique thermohaline



A Strong conveyor belt flow

Salinity of surface water increases until formation of deep water resumes

Salinity of surface water decreases until formation of deep water slows or ceases



B Weak conveyor belt flow

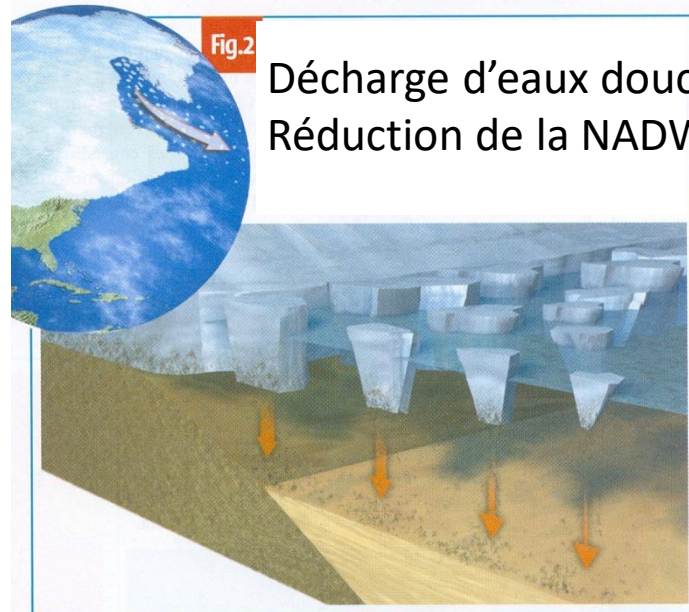
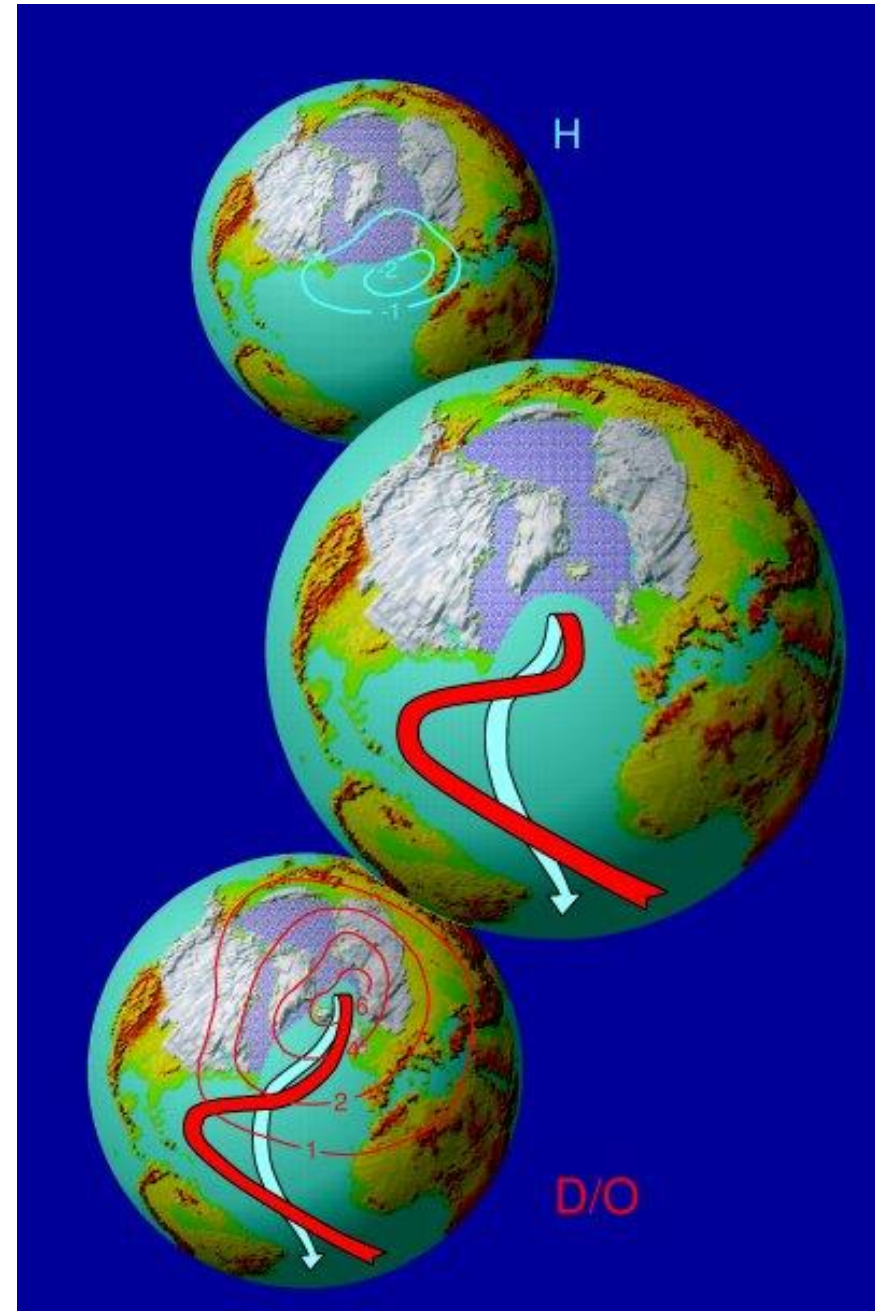


Fig.2

Décharge d'eaux douces
Réduction de la NADW

Débâcle d'icebergs en Atlantique Nord:

effondrement de la circulation thermohaline ?

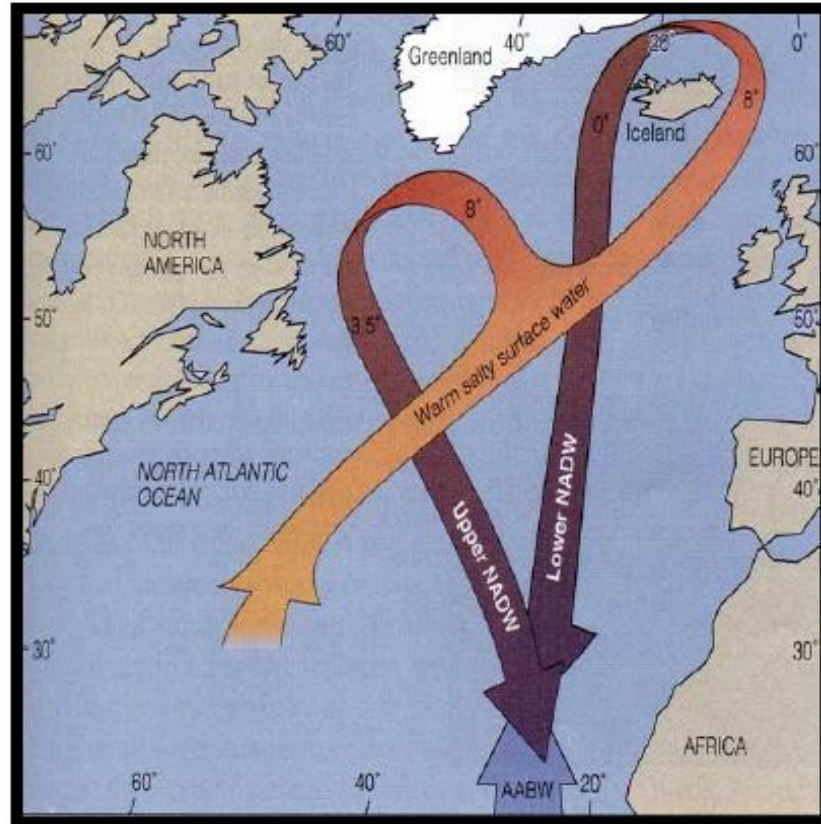


Automne 2005 - Hiver 2006:



Floride :
Katrina, etc...

**Saison des cyclones
d'exception**



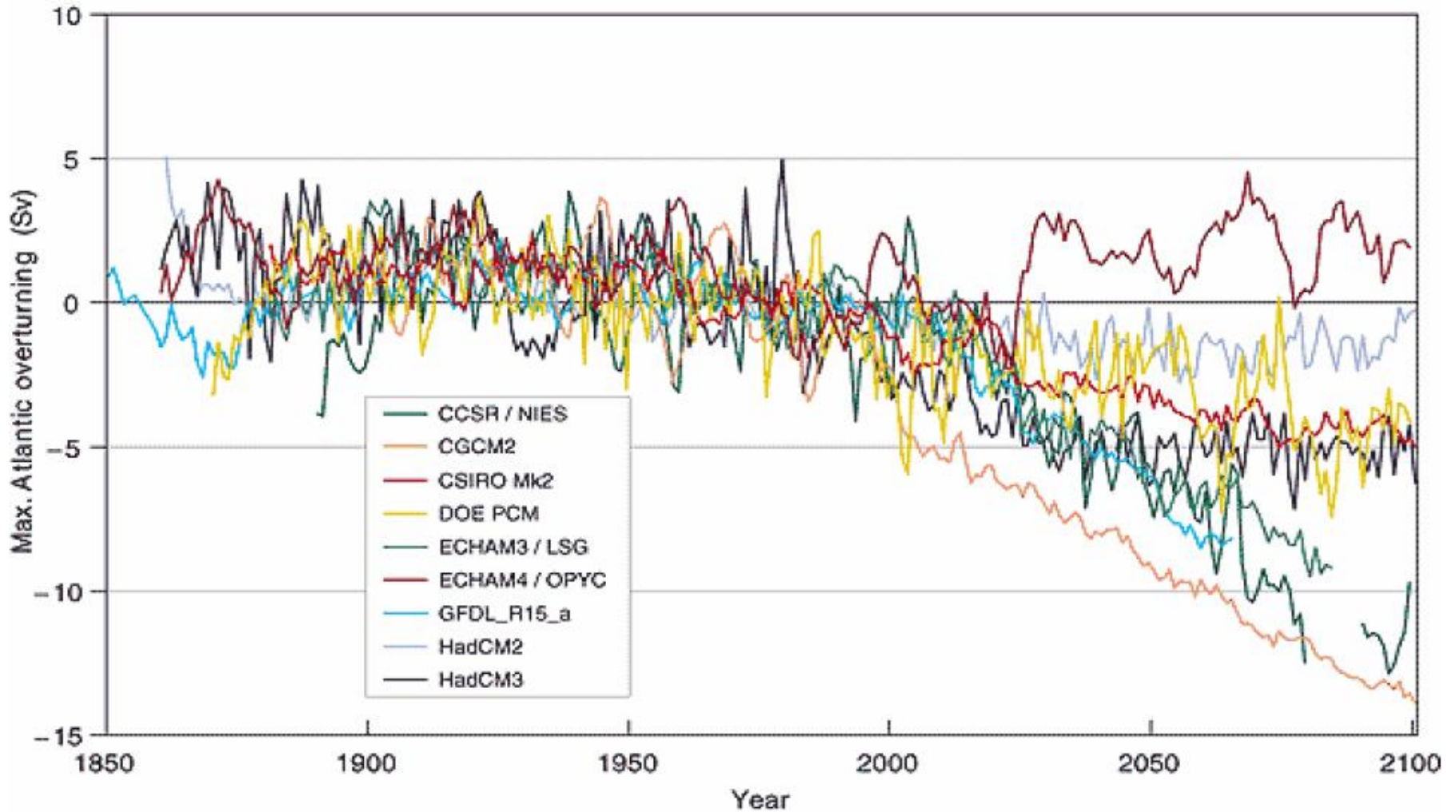
Europe :

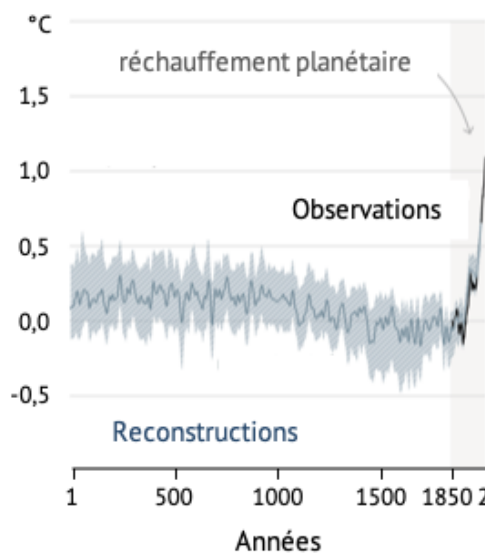
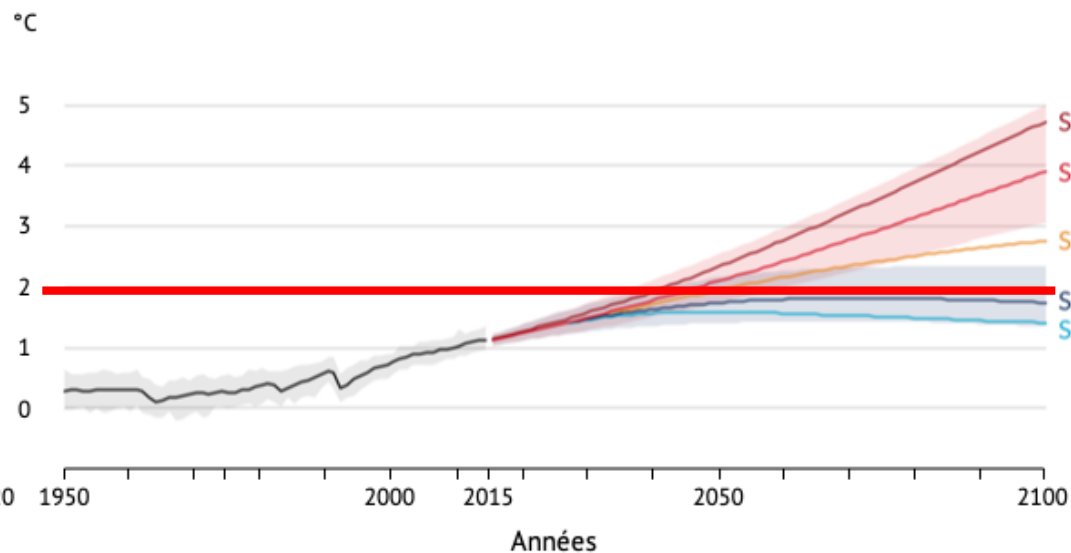
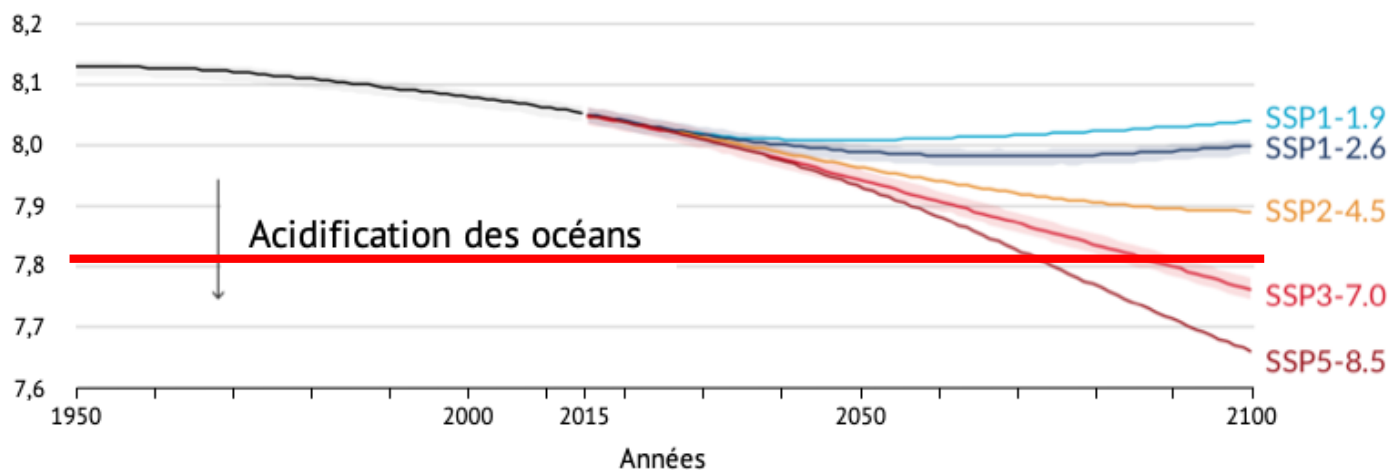
**Vague de froid
d'exception**

Ralentissement de la circulation médio-Atlantique ?

Vers un nouvel équilibre ? (horizon 2100)

Prédictions pour la réduction potentiel de la circulation thermohaline ?



A**RECONSTRUCTIONS***archives environnementales***B****OBSERVATIONS***satellites, in situ***C****PRÉDICTIONS***modèles*

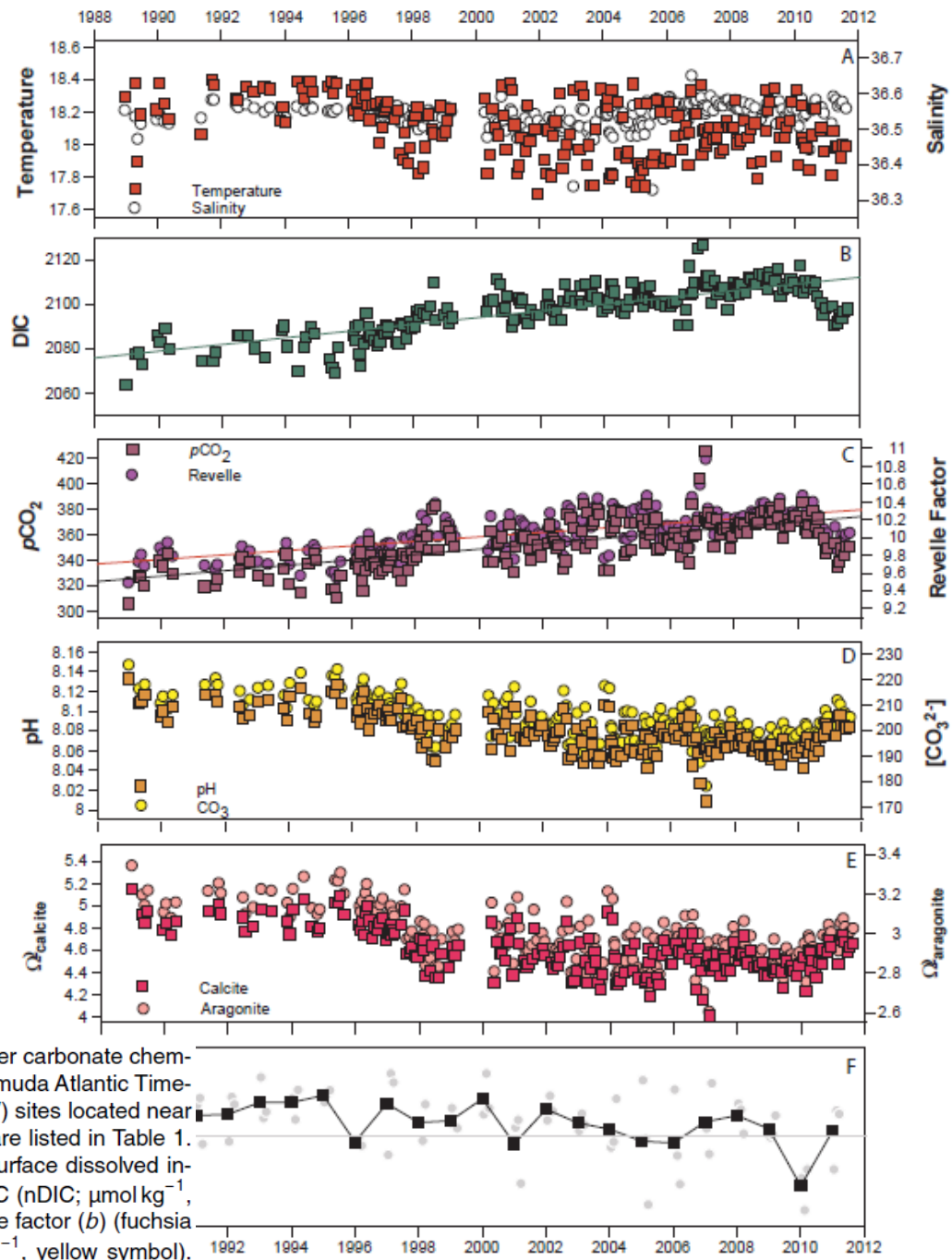


Fig. 1. Long-term observations and trends of surface hydrography, seawater carbonate chemistry and ocean acidification indicators from 1983 to 2011 at the BATS (Bermuda Atlantic Time-series Study; 31° 40' N, 64° 10' W) and Hydrostation S (32° 10' N, 64° 30' W) sites located near Bermuda in the NW Atlantic Ocean. Slopes and statistics of regressions are listed in Table 1. **(A)** Sea surface temperature (°C; black line) and salinity (red line). **(B)** Surface dissolved inorganic carbon (DIC, $\mu\text{mol kg}^{-1}$, green symbol) and salinity normalized DIC (nDIC; $\mu\text{mol kg}^{-1}$, light green symbol). **(C)** Seawater $p\text{CO}_2$ (μatm ; purple symbol) and Revelle factor (b) (fuchsia symbol). **(D)** Surface seawater pH (orange symbol) and $[\text{CO}_3^{2-}]$ ($\mu\text{mol kg}^{-1}$, yellow symbol).

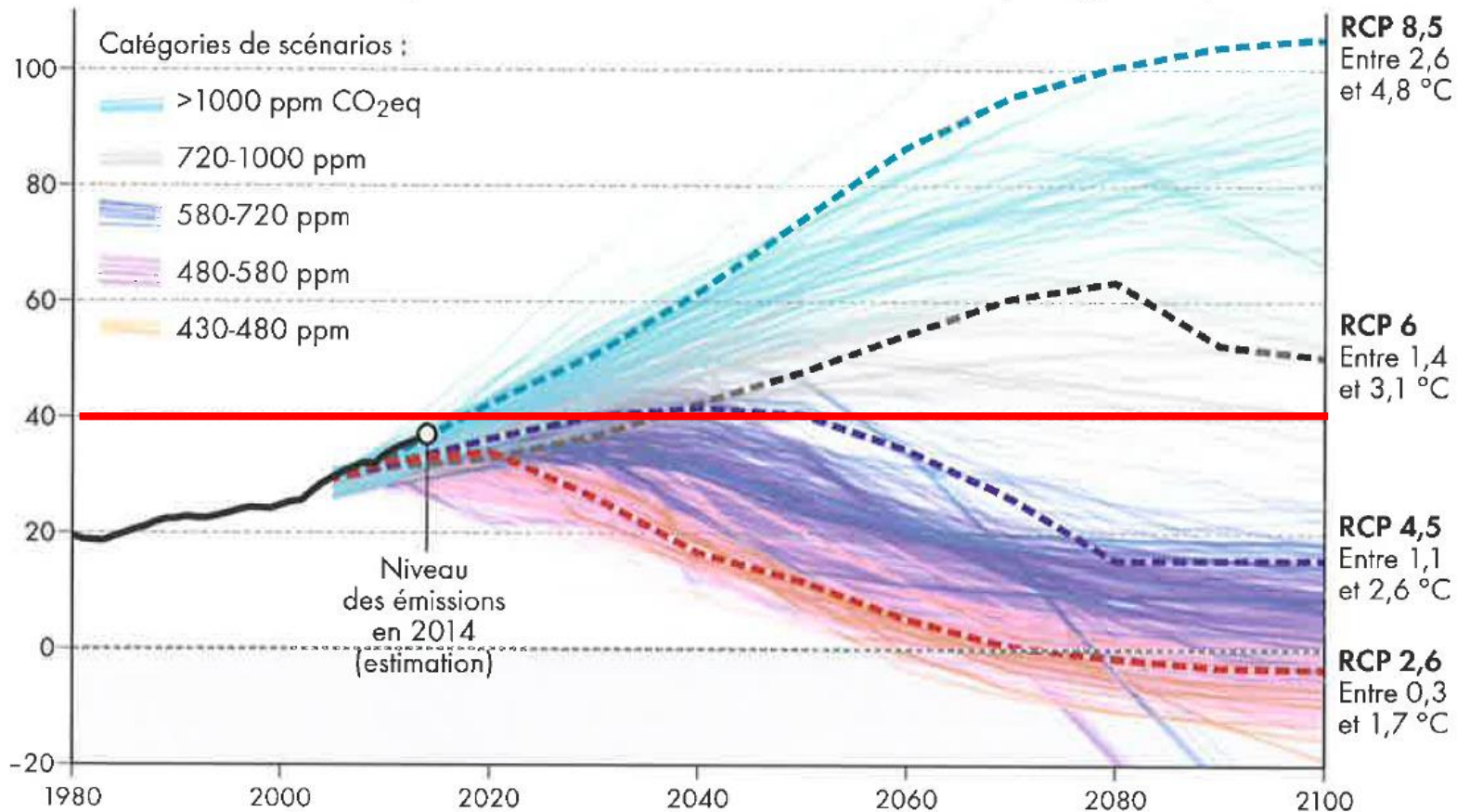
Le temps de l'action



SIMULATION DU CLIMAT : LES SCÉNARIOS D'ÉMISSION DE CO₂ AU XXI^e SIÈCLE

Émissions globales de CO₂ dues aux combustibles fossiles et à la production de ciment, en milliards de tonnes/an

Nom de code du scénario et prévision d'augmentation de la température en 2100 par rapport à la période 1850-1900



Note : RCP = profil représentatif d'évolution de concentration du CO₂.

D'après Center for International Climate and Environmental Research, 2014.



Les changements climatiques en 2100

Une hausse minime du réchauffement a des conséquences importantes

1,5°C

2°C

Hausse du niveau de la mer



0,26 à 0,77m



0,30 à 0,93m (+10 millions de personnes touchées)

Nombre d'étés sans glace en Arctique



1 sur 100 ans

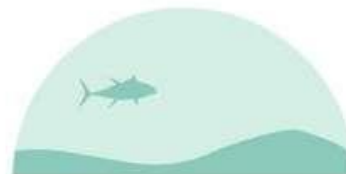


1 sur 10

Destruction des coraux



70 à 90%



Destruction totale

Risques pour les écosystèmes



Limité

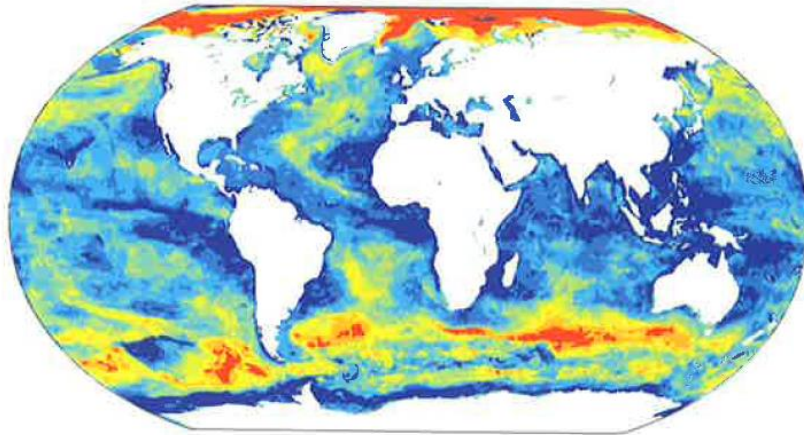


Risque de destruction totale

Les perturbations prochaines

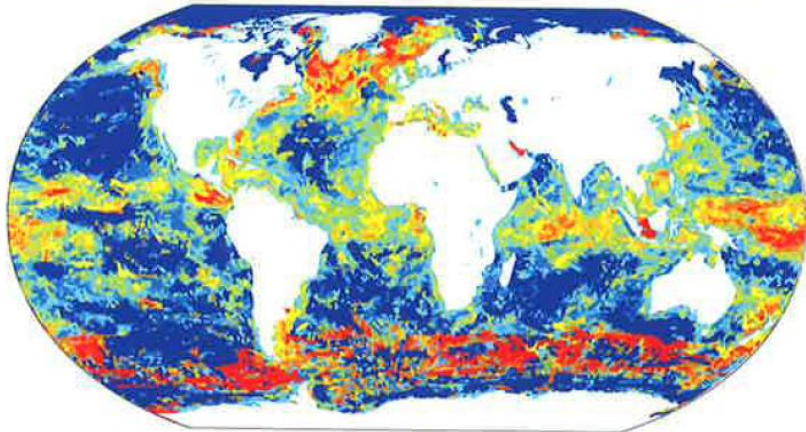


APPARITIONS ET EXTINCTIONS LOCALES DES ESPÈCES MARINES



Taux d'invasion des espèces exotiques à l'horizon 2050

Faible Moyen Élevé

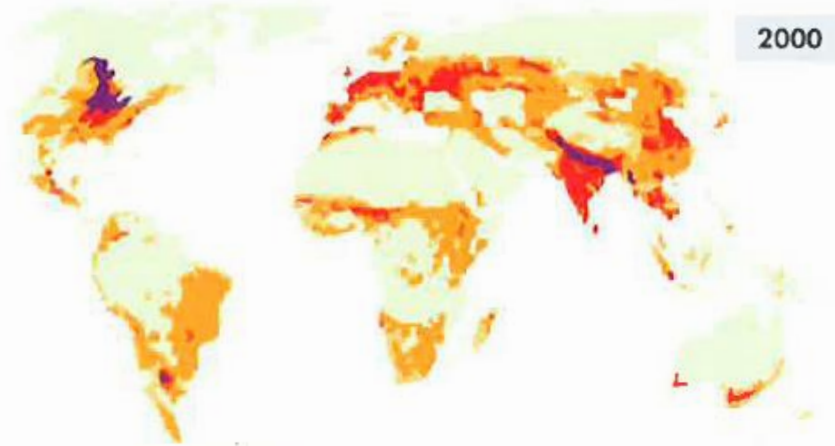


Taux d'extinction des espèces endémiques à l'horizon 2050

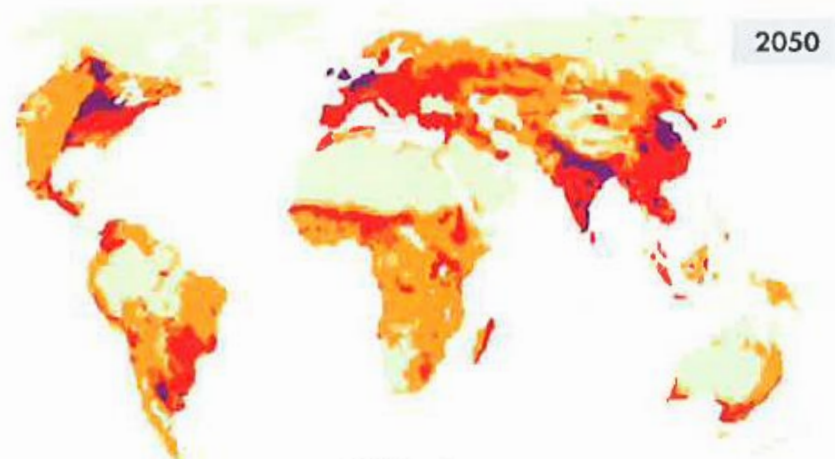
Faible Moyen Élevé

Note : Étude concernant 1 066 espèces de poissons et d'invertébrés relativement à la situation de 2001-2005.
 Source : W. W. L. Cheung et al., *Projecting global marine biodiversity impacts under climate change scenario, Fish and Fisheries*, 2009.

LA PERTE DE BIODIVERSITÉ MONDIALE



2000



2050

État de la biodiversité par rapport à l'abondance des espèces avant tout impact anthropique

perte de 0 à 25 % perte de 50 à 75 %
 perte de 25 à 50 % perte de 75 à 100 %

Source : GtOBIO ; Alkemade et al., 2009, in GRID-Arendal www.grida.no.

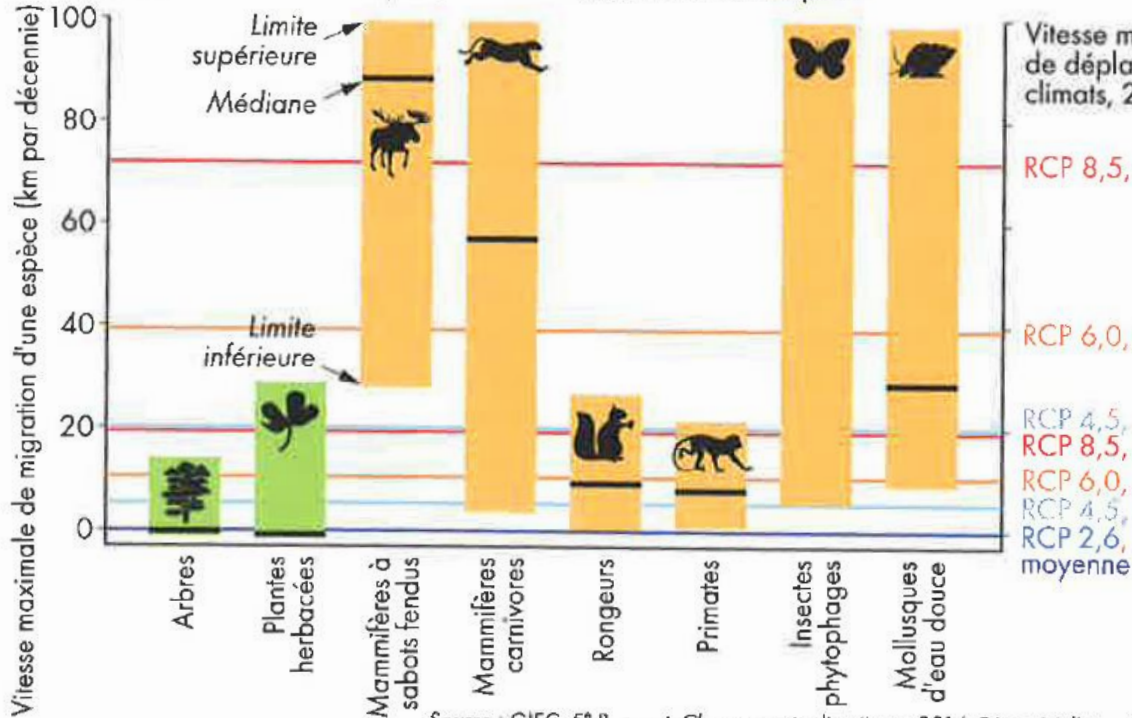


Les perturbations prochaines

Bréon et Luneau, 2018

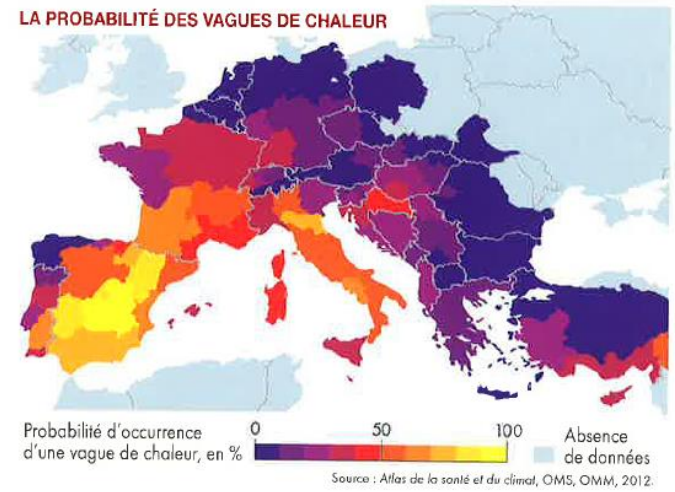
UNE NÉCESSAIRE ADAPTATION DES ESPÈCES

Comparaison de la vitesse maximale de migration des espèces à travers les pays et de la vitesse d'évolution projetée des conditions de température

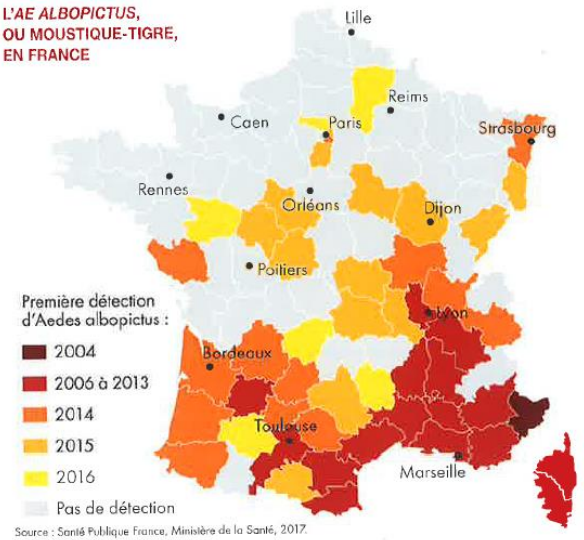


Source : GIEC, 5^e Rapport, Changements climatiques 2014. Résumé à l'attention des décideurs, 2014.

LA PROBABILITÉ DES VAGUES DE CHALEUR



L'AE ALBOPICTUS, OU MOUSTIQUE-TIGRE, EN FRANCE

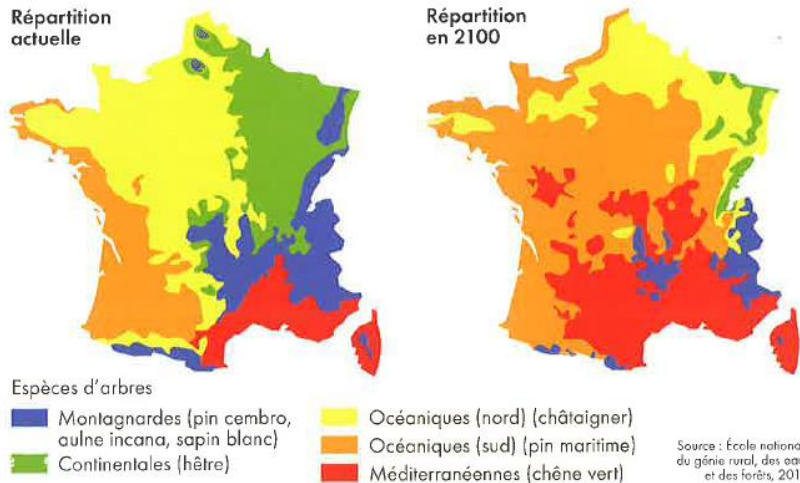


Source : Santé Publique France, Ministère de la Santé, 2017.

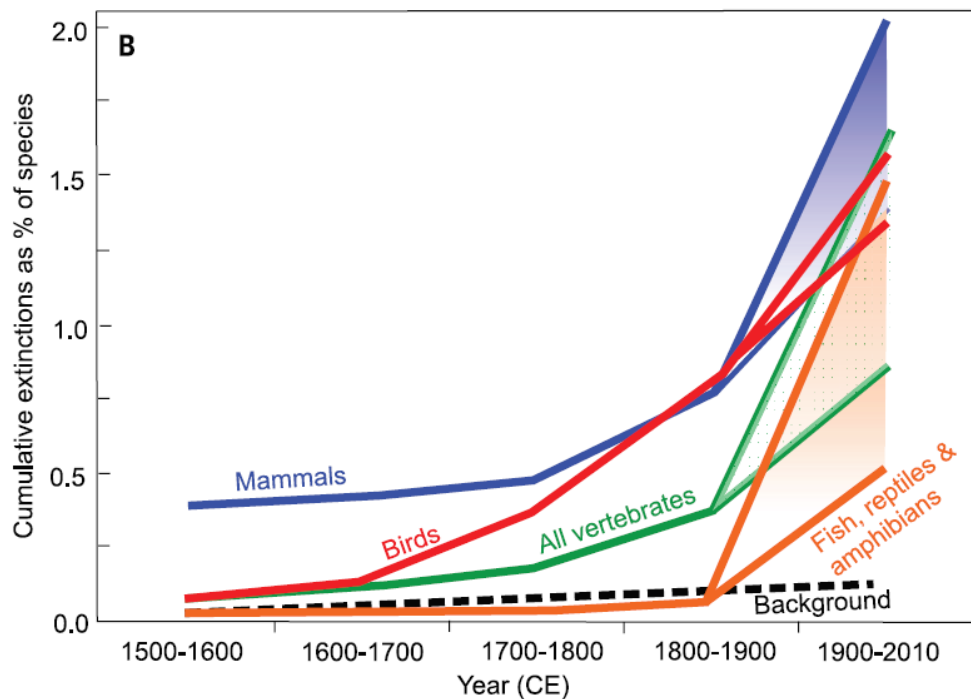
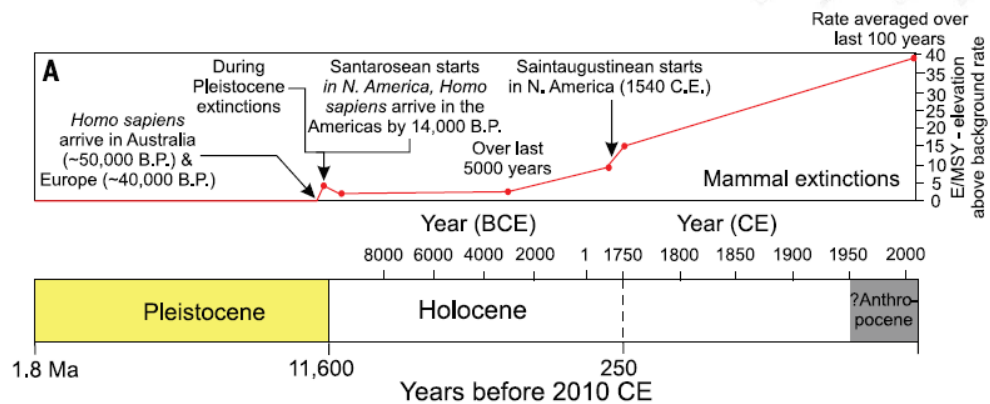
Les perturbations prochaines



ÉVOLUTION DES ESSENCES D'ARBRES EN FRANCE



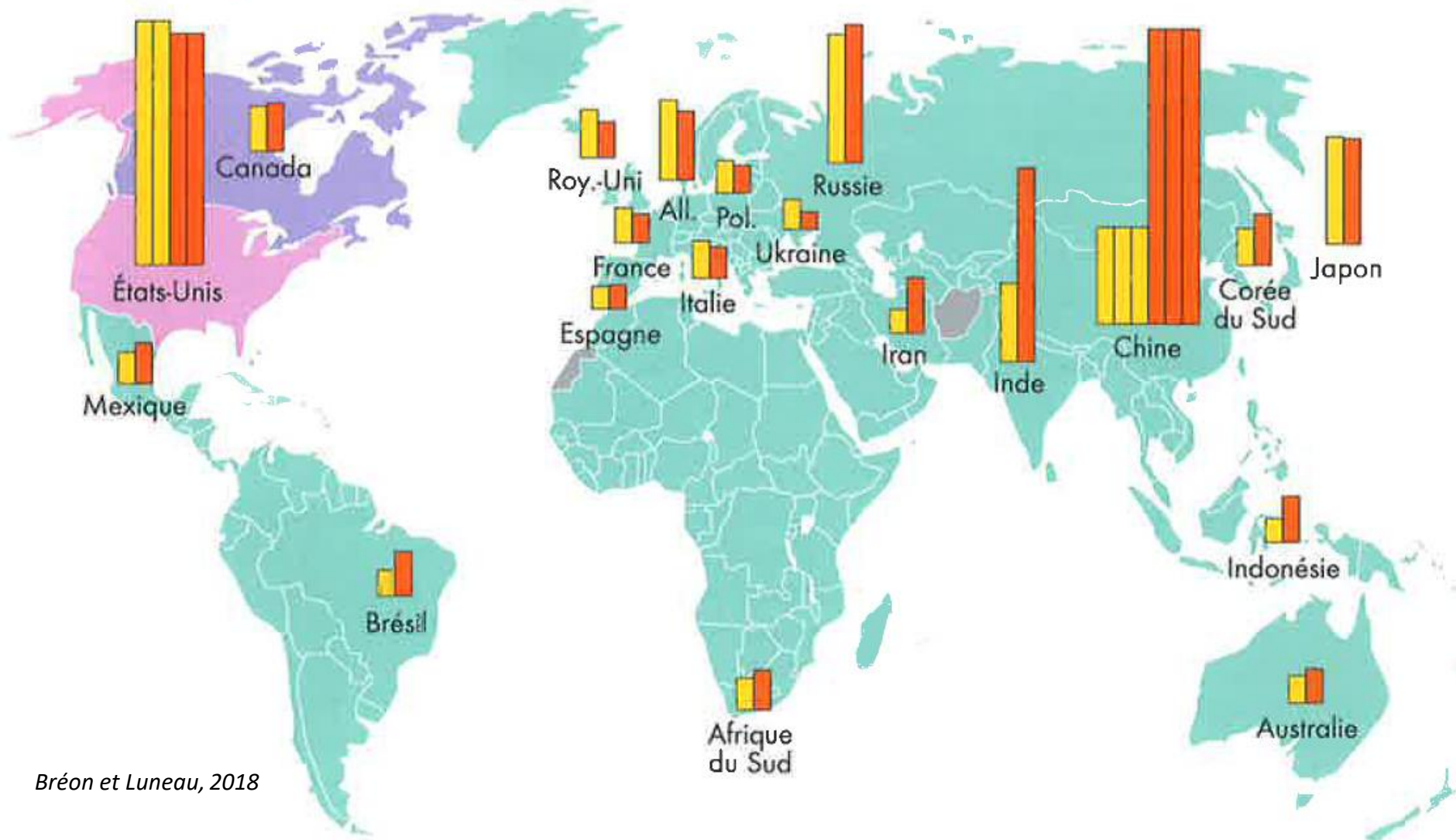
Bréon et Luneau, 2018



Le temps de l'action



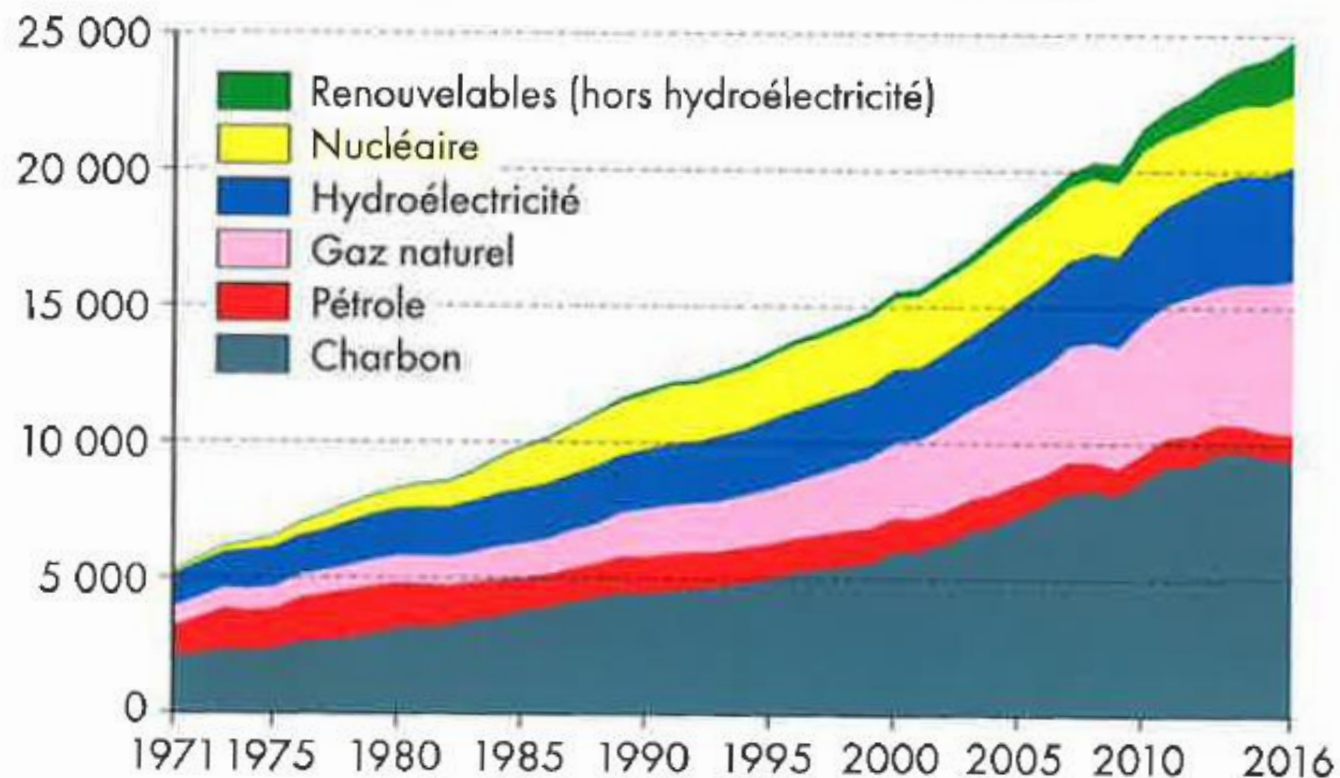
ÉMISSIONS DE CO₂ : BONS ET MAUVAIS ÉLÈVES



Le temps de l'action : Energie



PRODUCTION ÉLECTRIQUE MONDIALE, PAR SOURCE, EN TWH



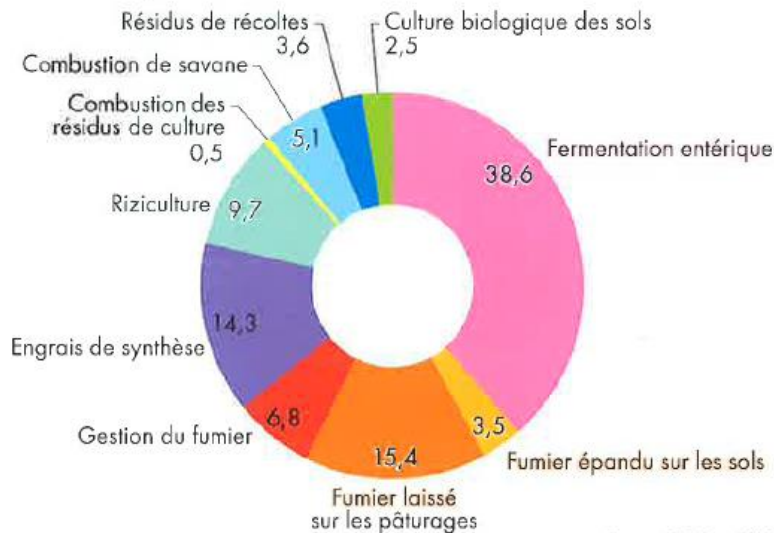
Source : AIEA, *Energy, Electricity and Nuclear Power Estimates for the Period up to 2050*, 2017.

Le temps de l'action : Agriculture



LE SECTEUR AGRICOLE ÉMETTEUR DE GES

Origine des émissions de gaz à effet de serre du secteur agricole dans le monde, en %

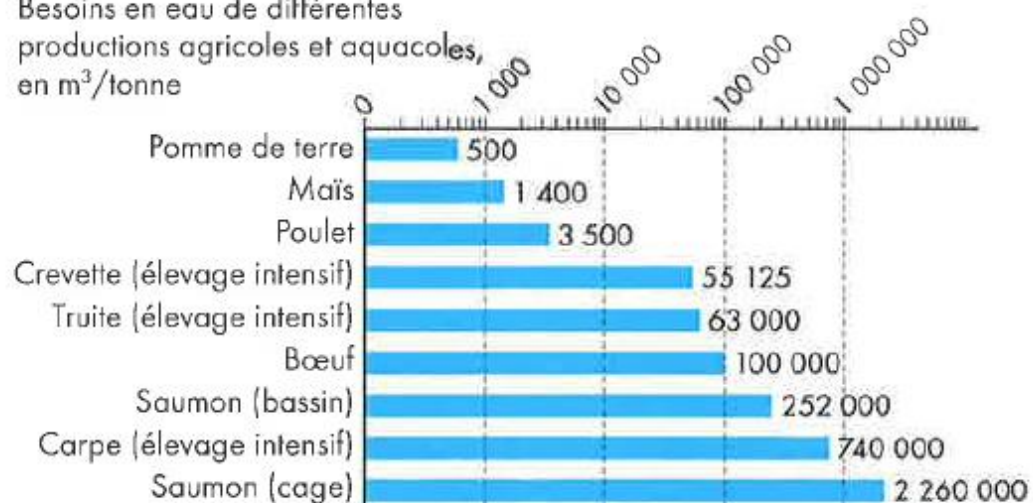


Source : FAO Stats, 2015.

Bréon et Luneau, 2018

LES BESOINS EN EAU DE CERTAINES CULTURES

Besoins en eau de différentes productions agricoles et aquacoles, en m³/tonne

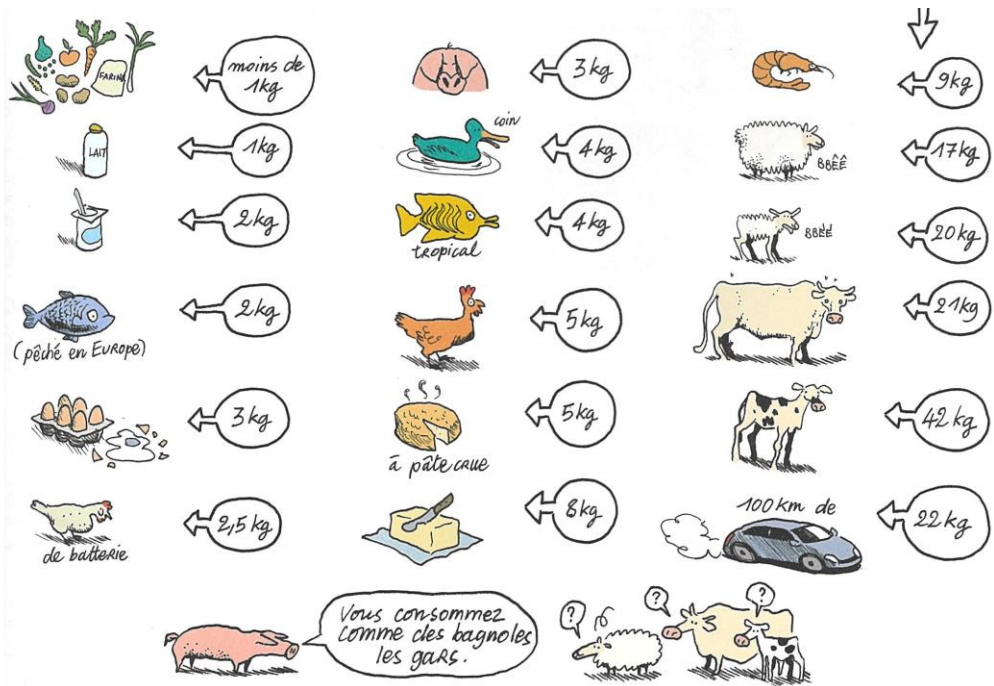


Source : Philipps, Beveridge et Clarke 1991 ; Piemental et al. 1997 ; Brummelt 2006.

Le temps de l'action : Agriculture



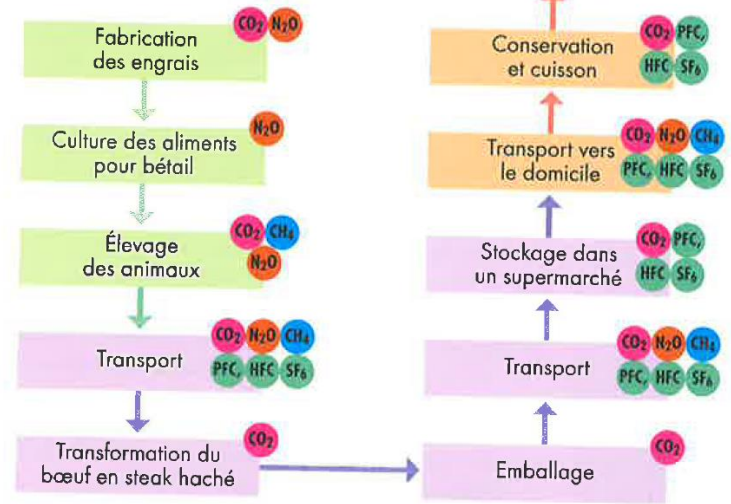
Empreinte carbone (en Kg de CO2) par type d'aliments (pour 1 Kg)



Jancovici et Blain, 2021

ITINÉRAIRE D'UN STEAK HACHÉ

Notre alimentation émet plus ou moins de gaz à effet de serre, à nous d'agir pour réduire les émissions liées à notre consommation !



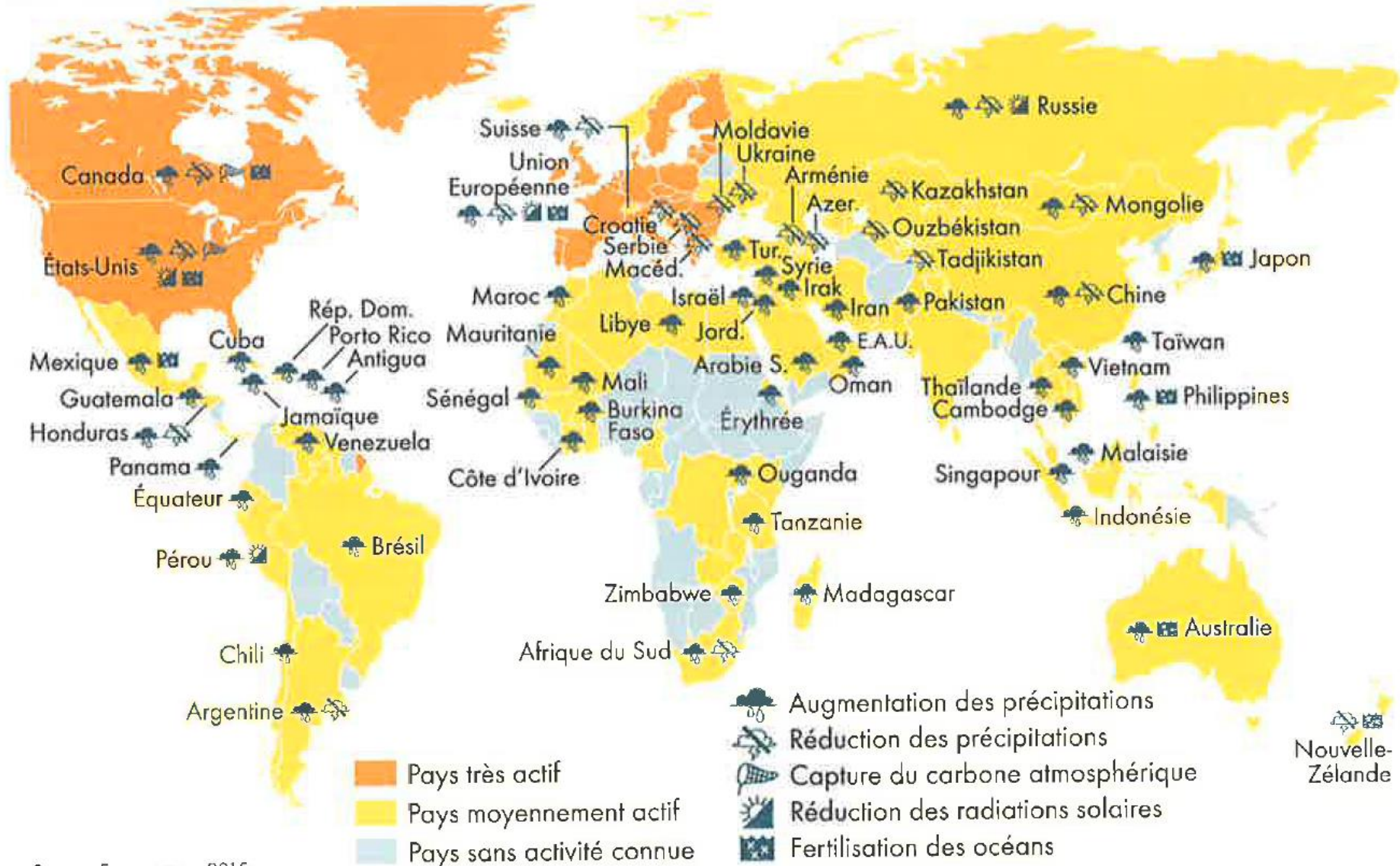
Source : Réseau action climat, Kit pédagogique sur les changements climatiques, 2015.

Le temps de l'action : Geo ingénierie



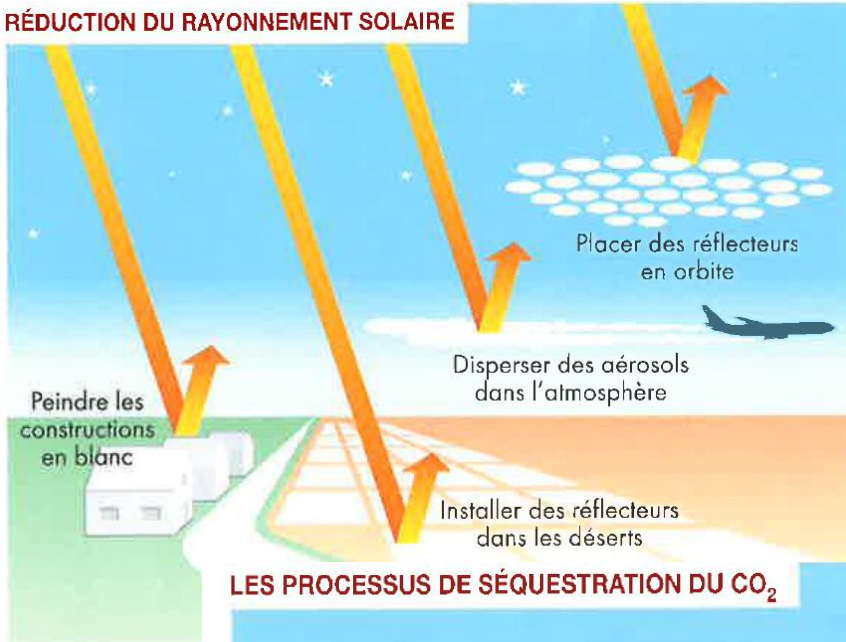
Bréon et Luneau, 2018

LES PROJETS DE GÉO-INGÉNIERIE SUR LA PLANÈTE



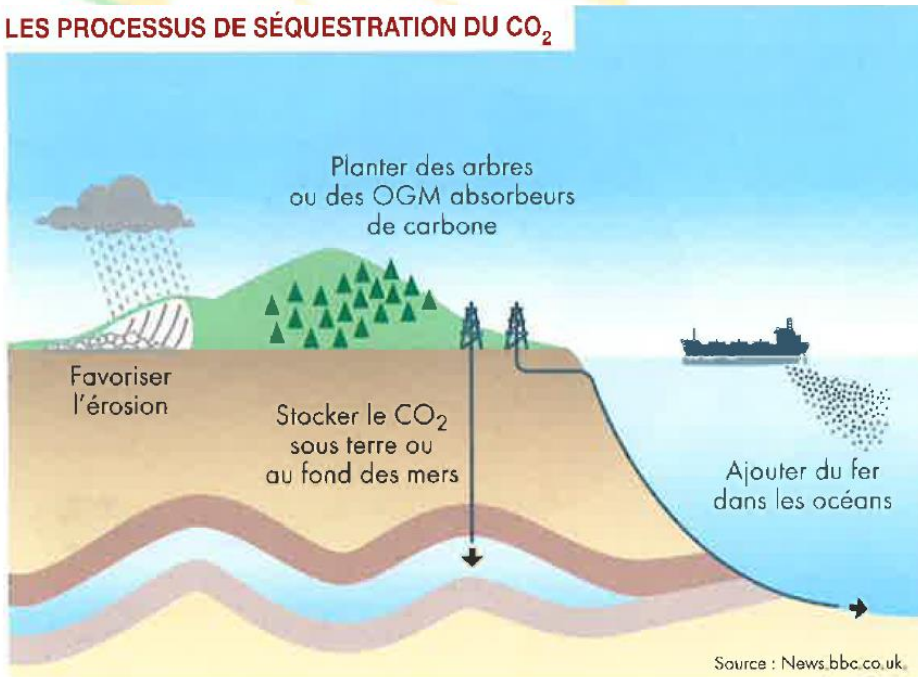
Geo ingénierie

RÉDUCTION DU RAYONNEMENT SOLAIRE



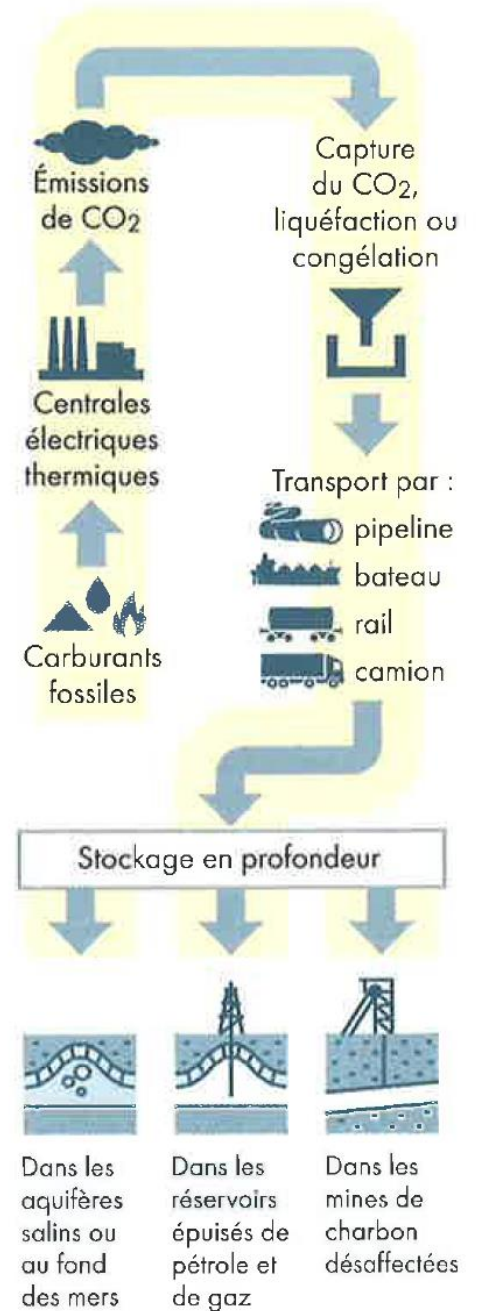
Bréon et Luneau, 2018

LES PROCESSUS DE SÉQUESTRATION DU CO₂

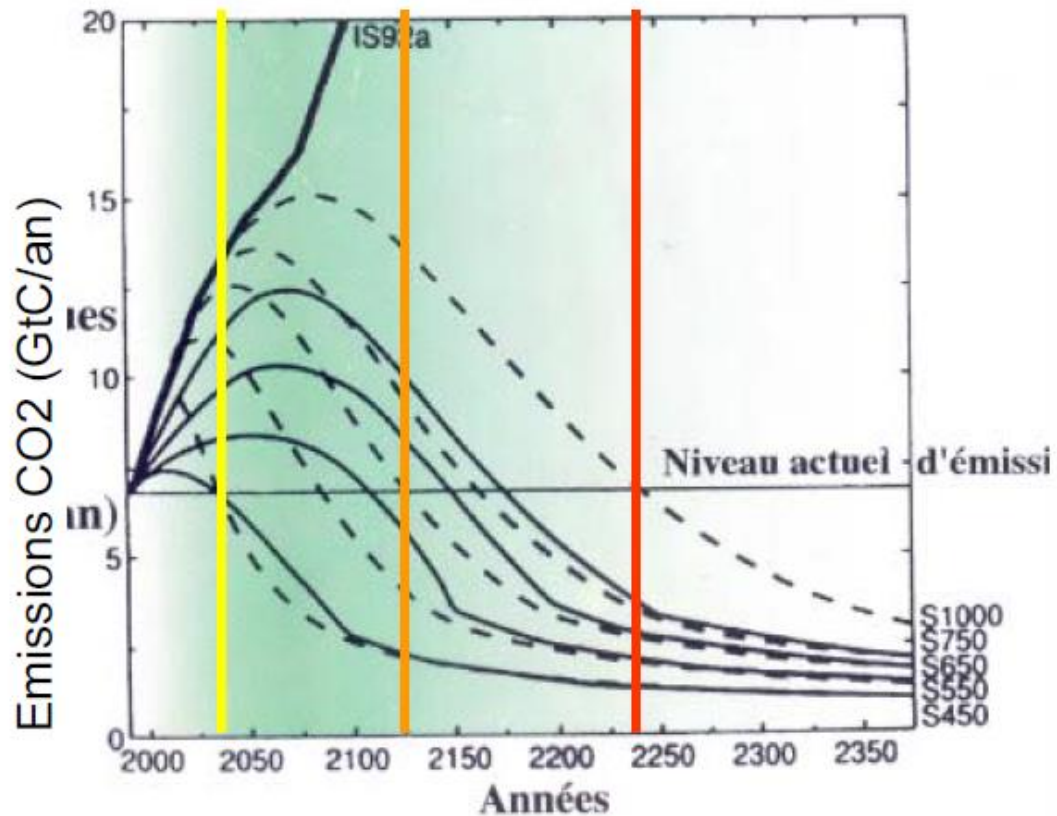


Source : News.bbc.co.uk

COMMENT STOCKER LE CO₂



Source : École polytechnique de Lausanne



Il faudrait que les émissions tombent en-dessous de leur niveau de 1990 :

→ En qq décennies pour stabiliser le CO2 à 450 ppm et le réchauffement à 2°C

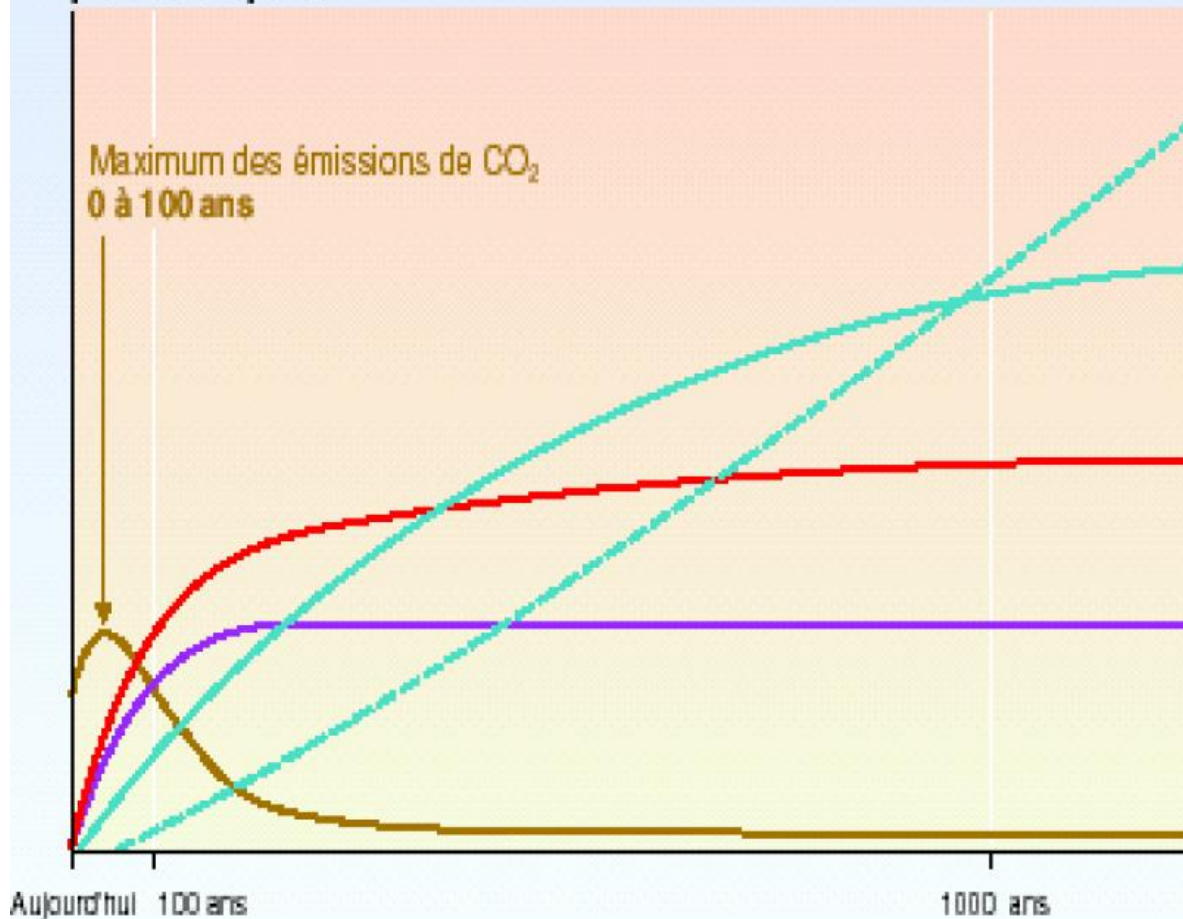
→ En un siècle environ pour stabiliser le CO2 à 650 ppm et le réchauffement à 3.5°C

→ En deux siècles pour stabiliser le CO2 à 1000 ppm et le réchauffement à 5°C

IPSL, 2001

La concentration de CO₂, la température, et le niveau de la mer continuent d'augmenter bien après la réduction des émissions

Ampleur de la réponse



Temps nécessaire pour parvenir à l'équilibre

Elévation du niveau de la mer due à la fonte des glaces :
Plusieurs milliers d'années

Elévation du niveau de la mer due à la dilatation thermique :
Des siècles à des millénaires

Stabilisation de la température :
Quelques siècles

Stabilisation du CO₂ :
100 à 300 ans

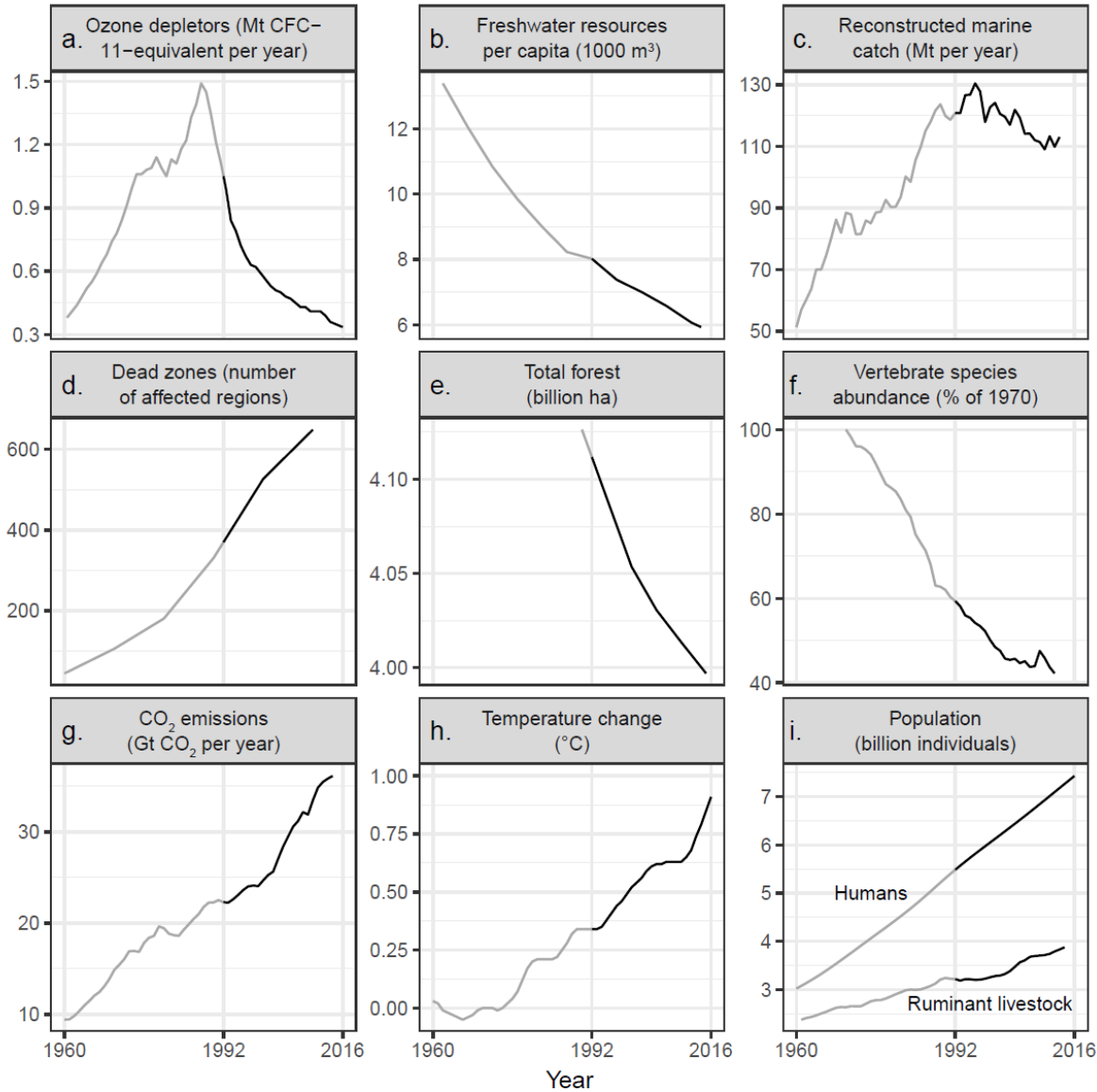
Emissions de CO₂

Vers un nouvel équilibre ? (horizon 2100)

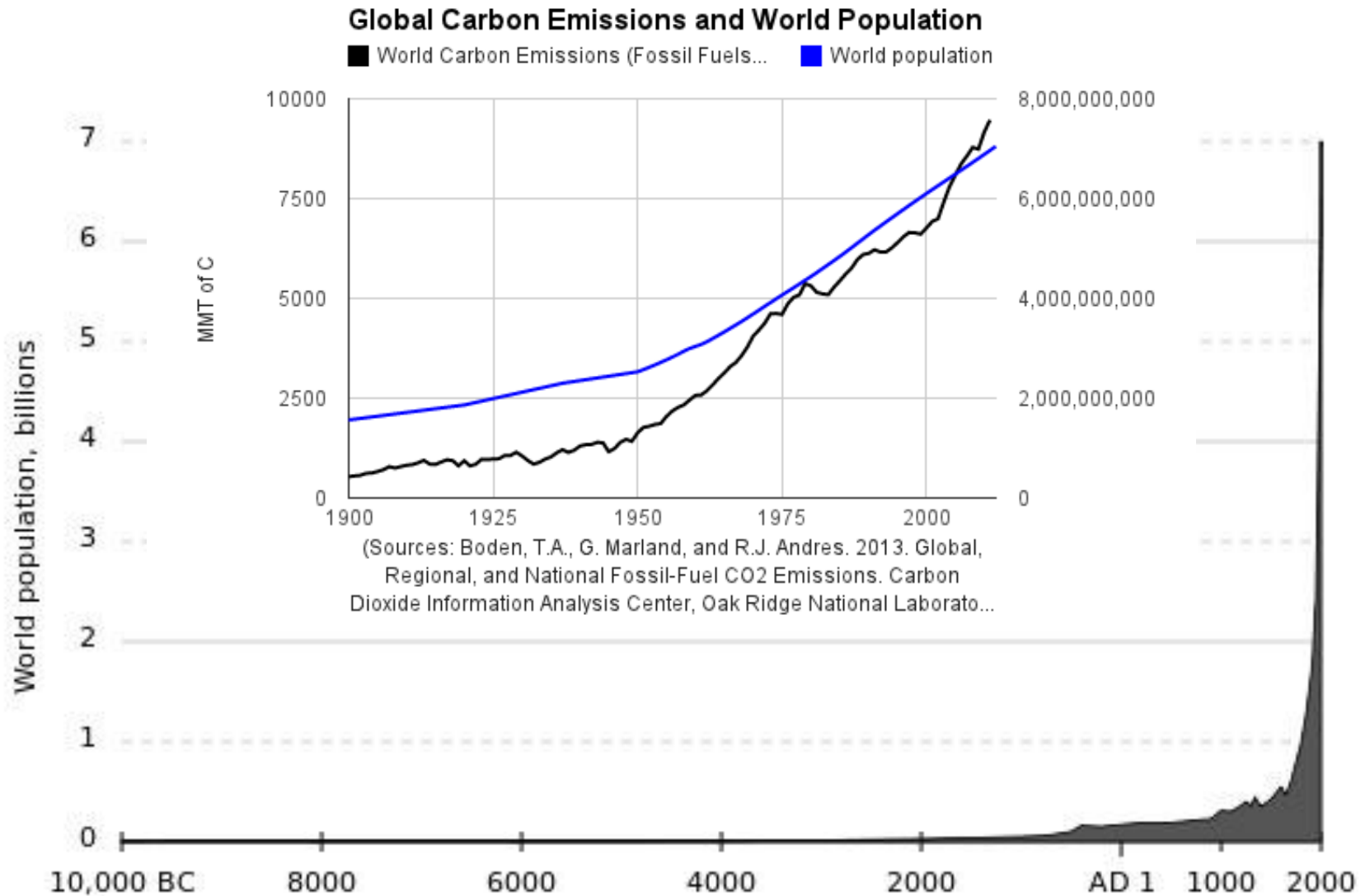
World Scientists' Warning to Humanity: A Second Notice

WILLIAM J. RIPPLE, CHRISTOPHER WOLF, THOMAS M. NEWSOME, MAURO GALETTI, MOHAMMED ALAMGIR, EILEEN CRIST, F. LAURANCE, and 15,364 scientist signatories from 184 countries

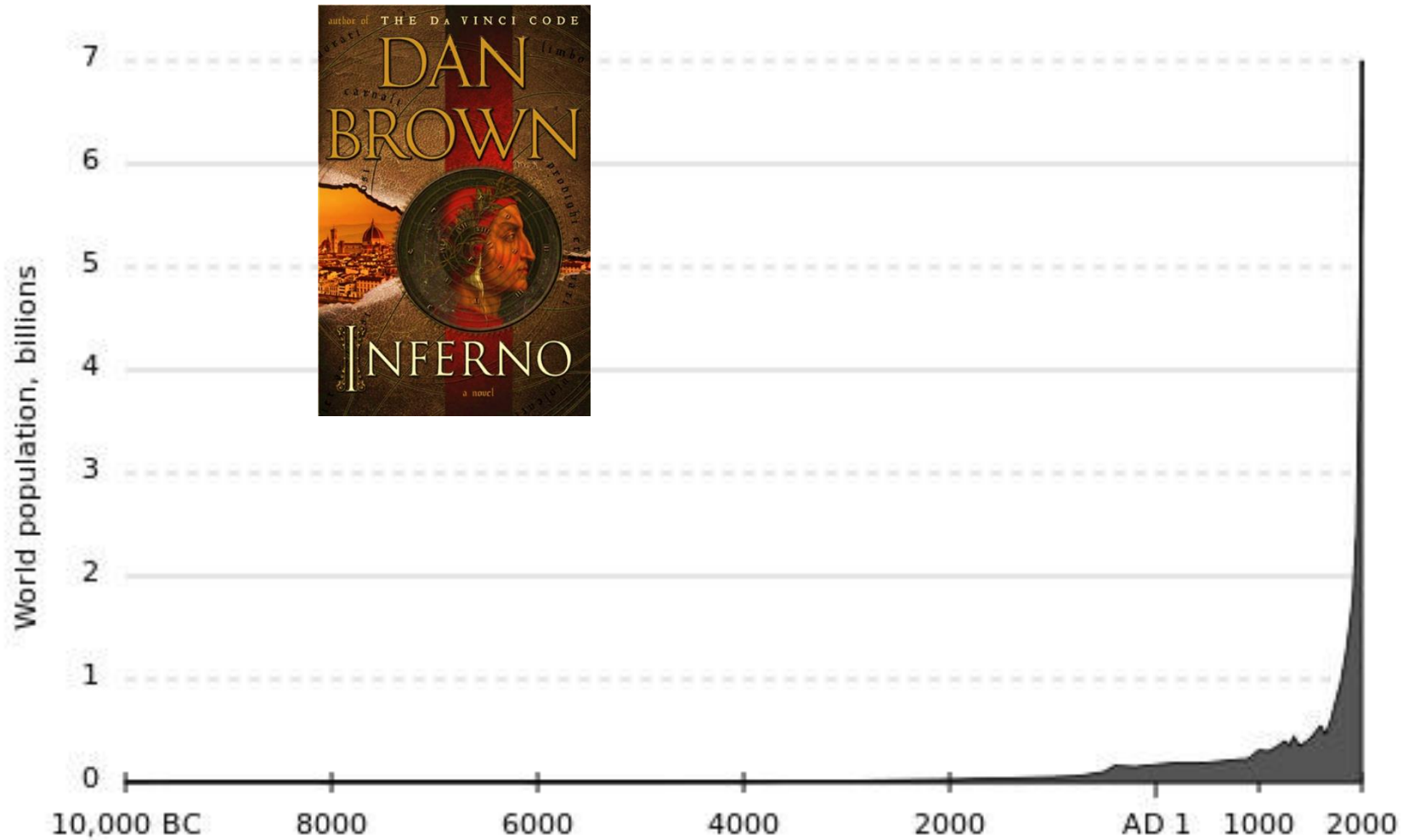
2017



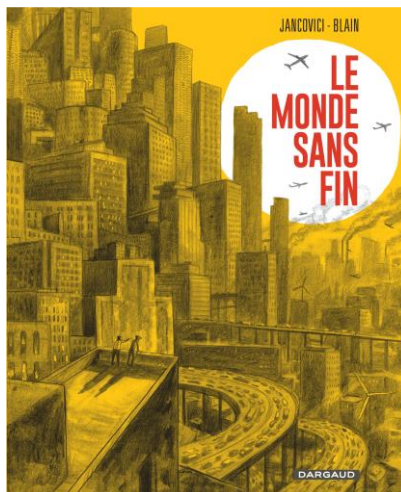
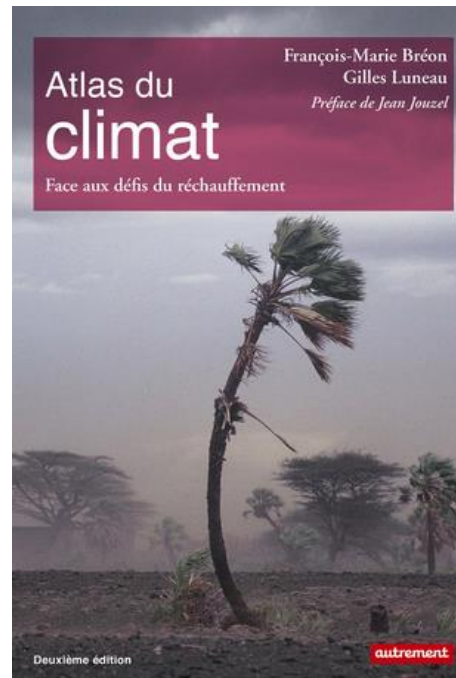
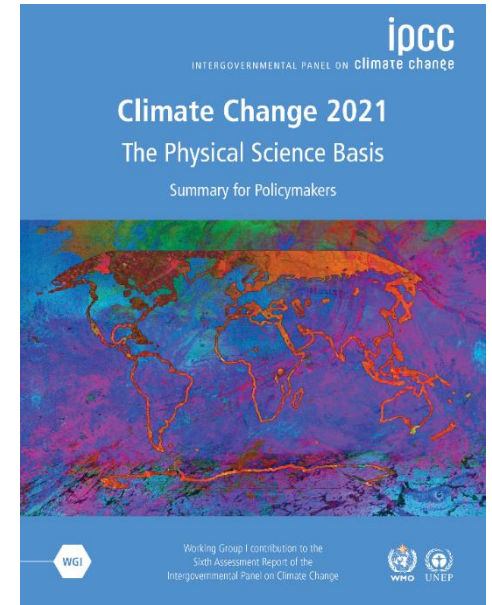
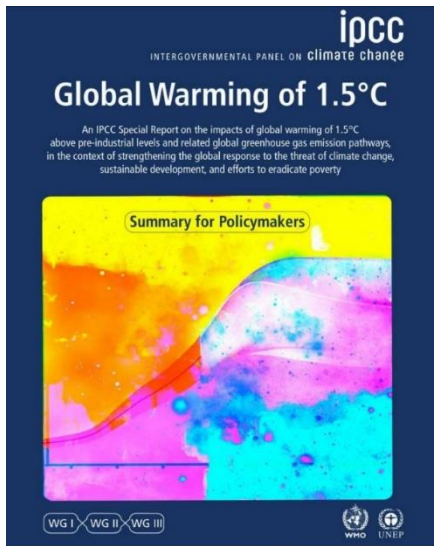
Changements atmosphériques



Changements atmosphériques



Bibliographie



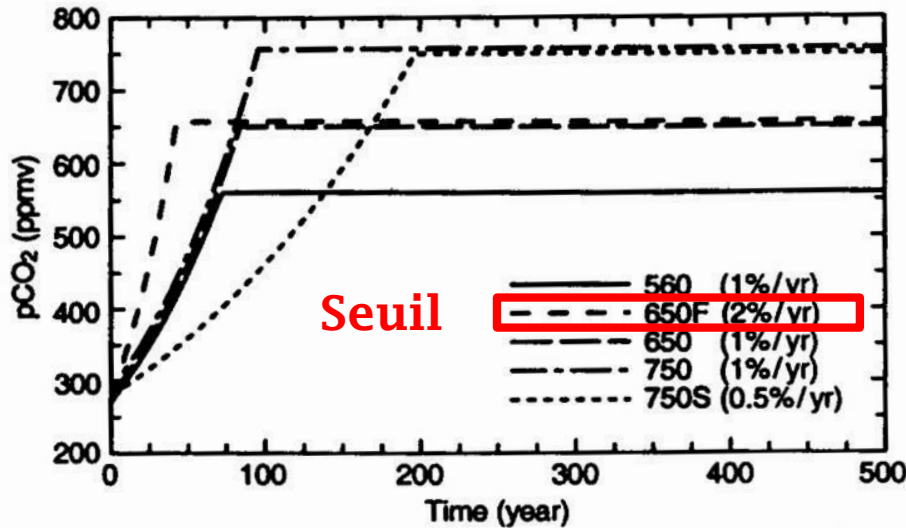
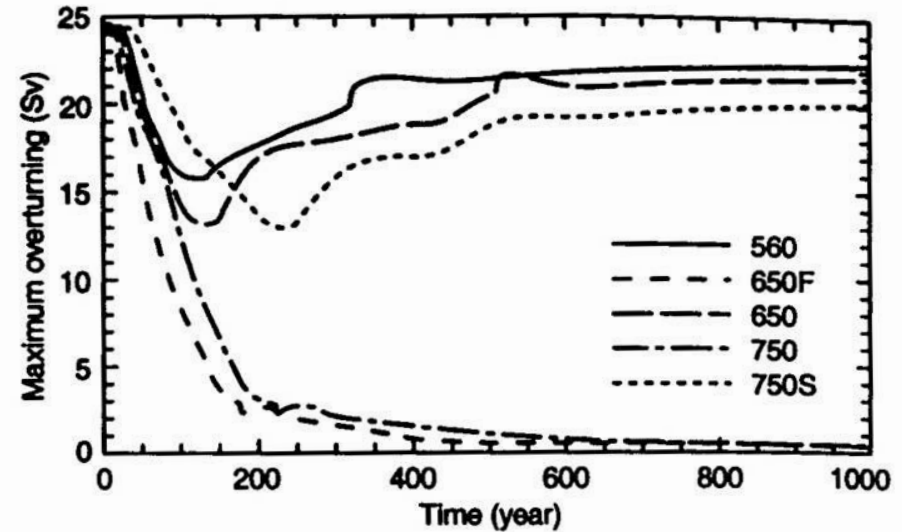


Fig. 6 a Prescribed increase of atmospheric CO₂ until a maximum concentration is reached. The rates of increase are 1% per year (exps. 560, 650, 750) and are slightly higher than the increase of CO₂ in the 1980s. Additional experiments are performed at 0.5% per year (exp. 750 S) and 2% per year (exp. 650F).



b Evolution of the overturning volume transport of the thermohaline circulation in the North Atlantic. For an increase of 1% per year the threshold value is between 650 and 750 ppm. When passed, the thermohaline circulation decreases and a new stable state is reached. The circulation recovers, if the CO₂ increase is slower (exp. 750S), or it collapses if it is faster (exp. 650F). (From Stocker and Schmittner 1997)

S. Rahmstorf, 1998

Retour à un état d'équilibre : 350 000 ans ???



LE JOUR D'APRES...

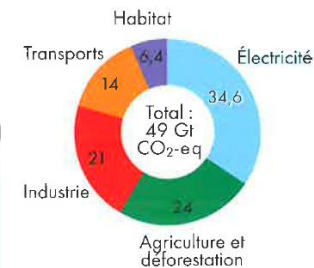
Vers un nouvel équilibre ?



WHERE WILL YOU BE?



Répartition des activités humaines génératrices de gaz à effet de serre, en %

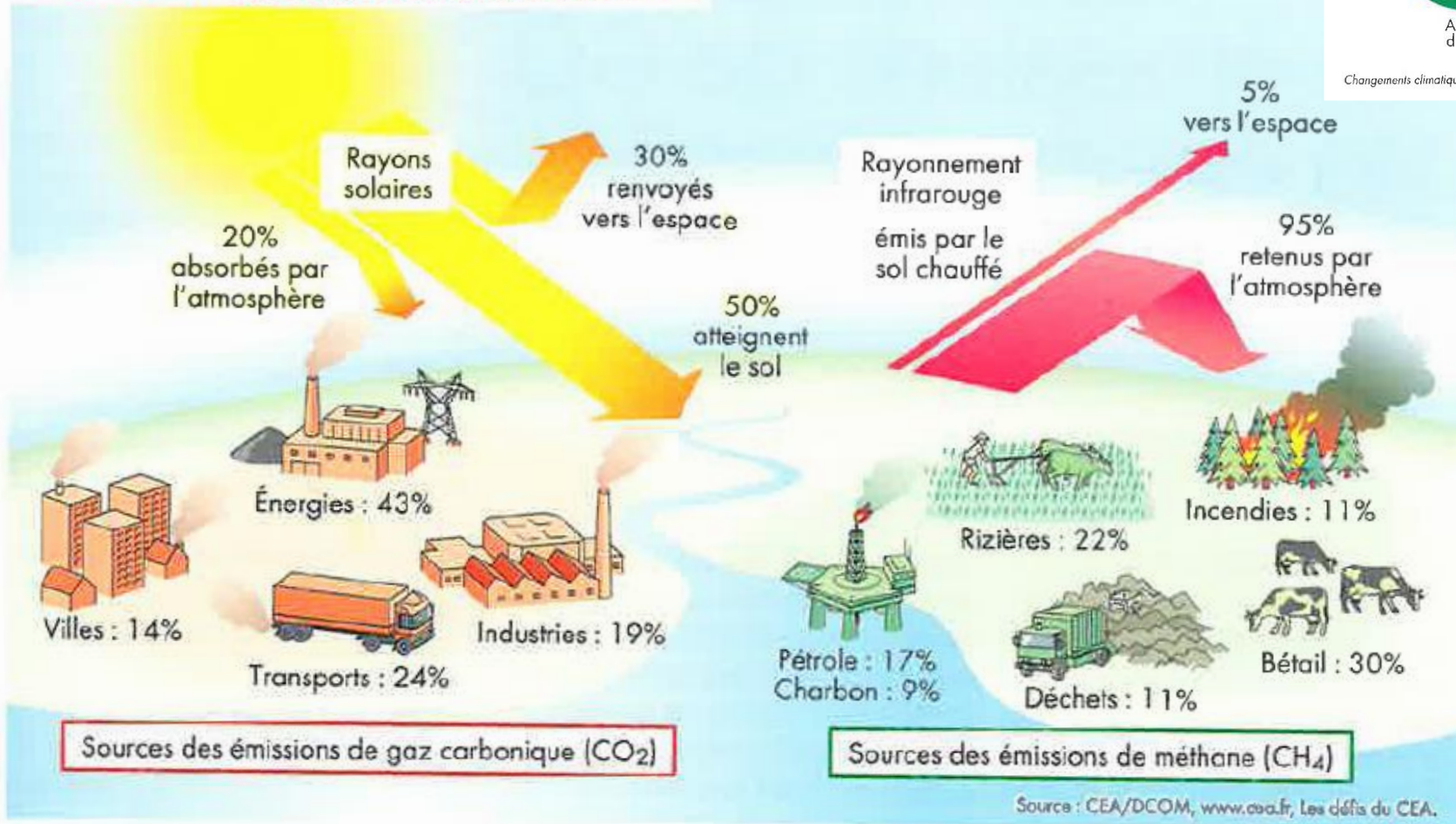


Source : GIEC, Changements climatiques 2013 : rapport de synthèse.

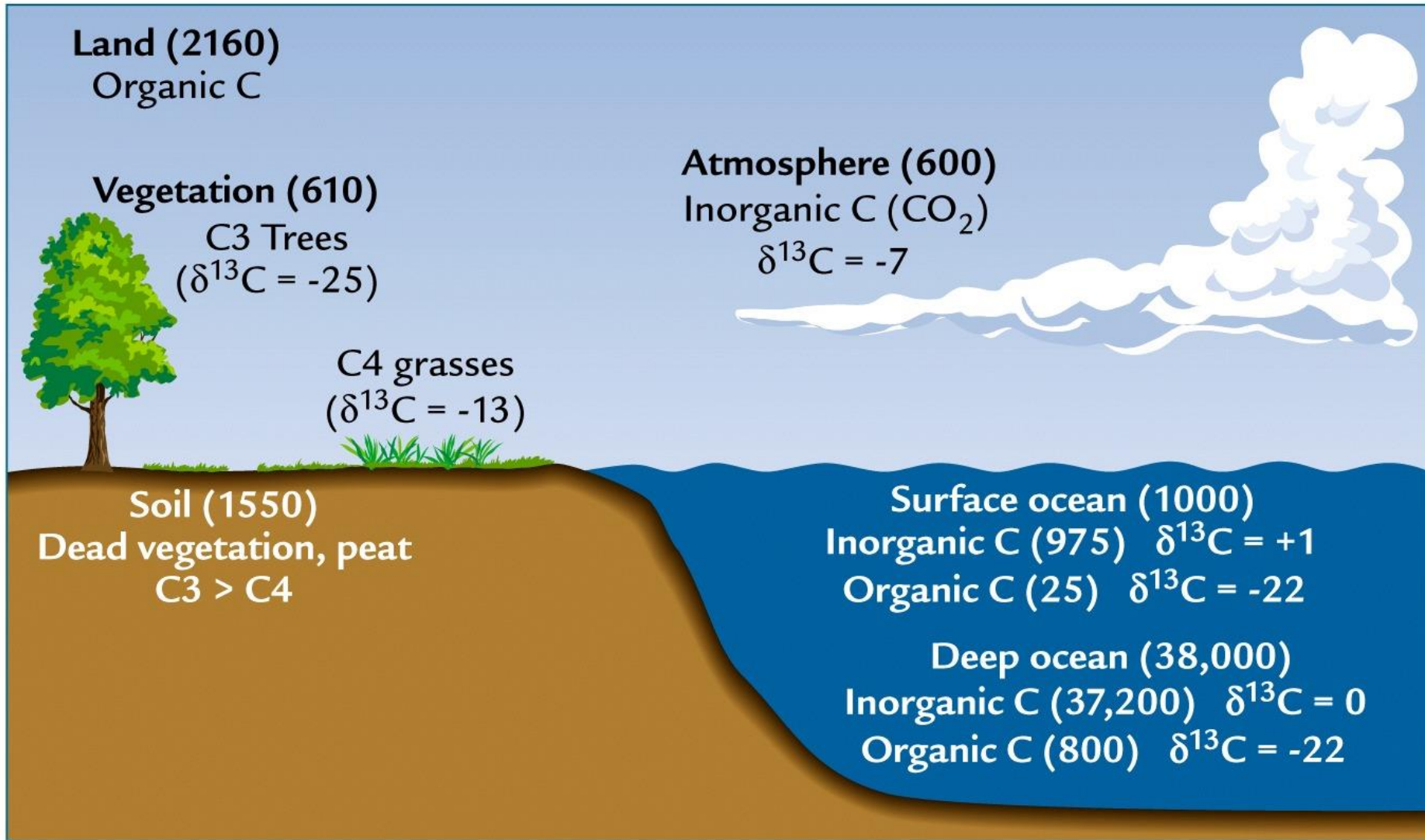
Les perturbations actuelles et leurs impacts

QUAND L'HOMME PERTURBE LE CLIMAT

ÉMISSIONS ANTHROPIQUES DE GAZ À EFFET DE SERRE



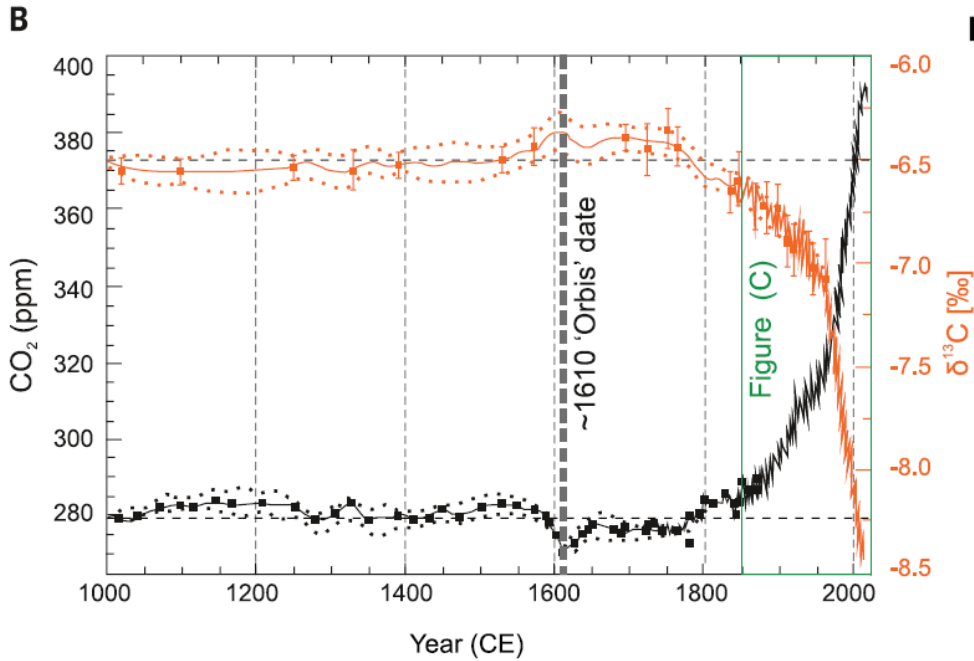
Changements atmosphériques



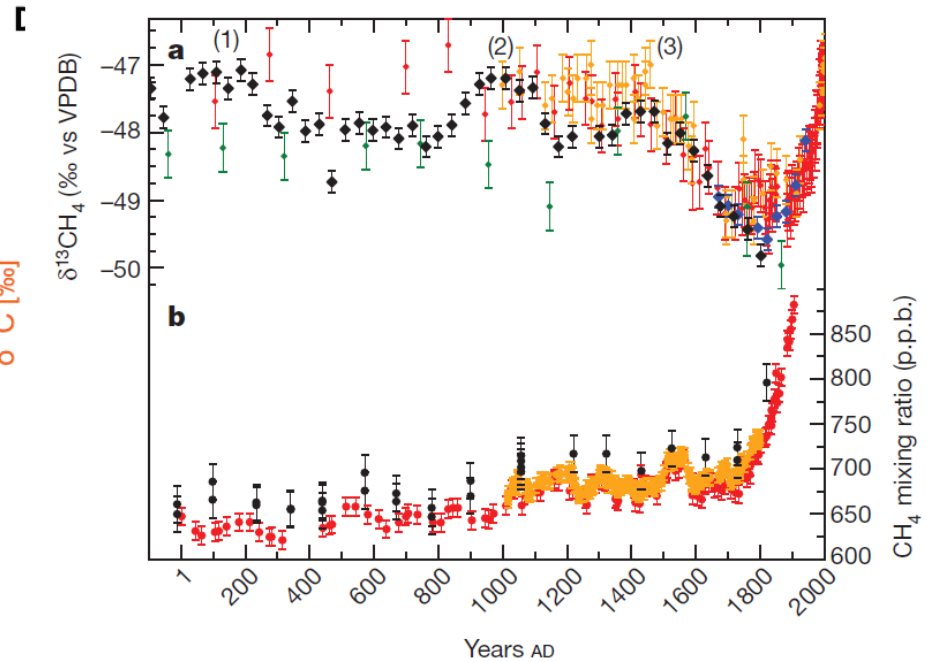
Les perturbations actuelles et leurs impacts

Effet Suess

Dilution isotopique : Injection de ^{13}C fossile dont le δ est très négatif



waters et al., , 2016



Sapart et al., , 2012