



Conférence – Inspection / APBG



# Des émissions de gaz à effet de serre au changement climatique : que nous disent les données scientifiques les plus récentes ?

Laurent Bopp

Directeur du Département de Géosciences, ENS

Directeur de Recherche au CNRS

Laboratoire de Météorologie Dynamique

Institut Pierre-Simon Laplace

[Laurent.Bopp@ens.fr](mailto:Laurent.Bopp@ens.fr)

Bopp – Orléans – 05 Février 2020

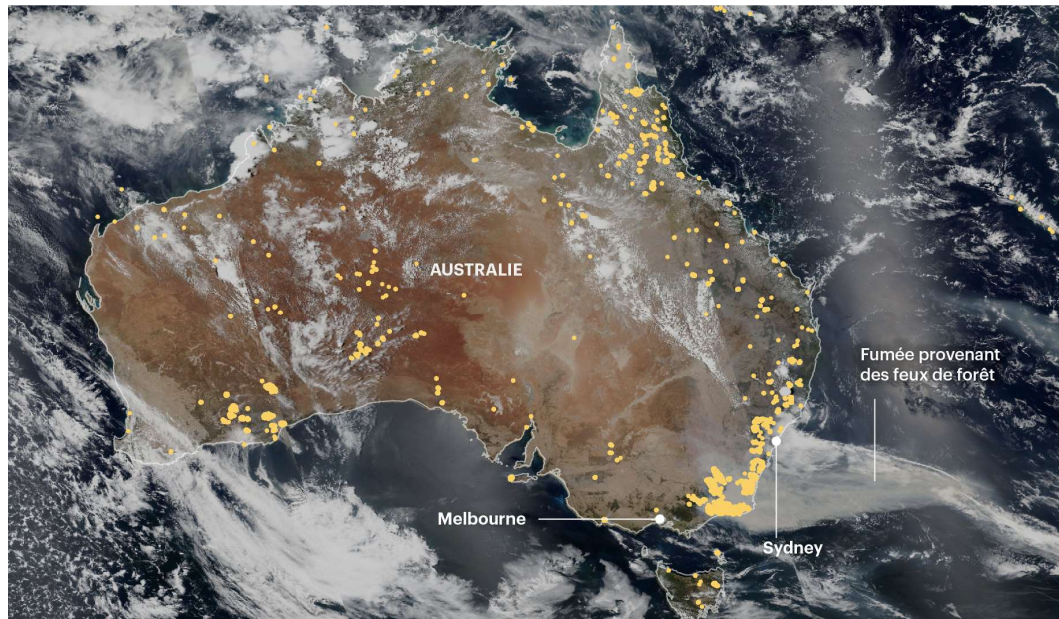


Institut  
Pierre  
Simon  
Laplace



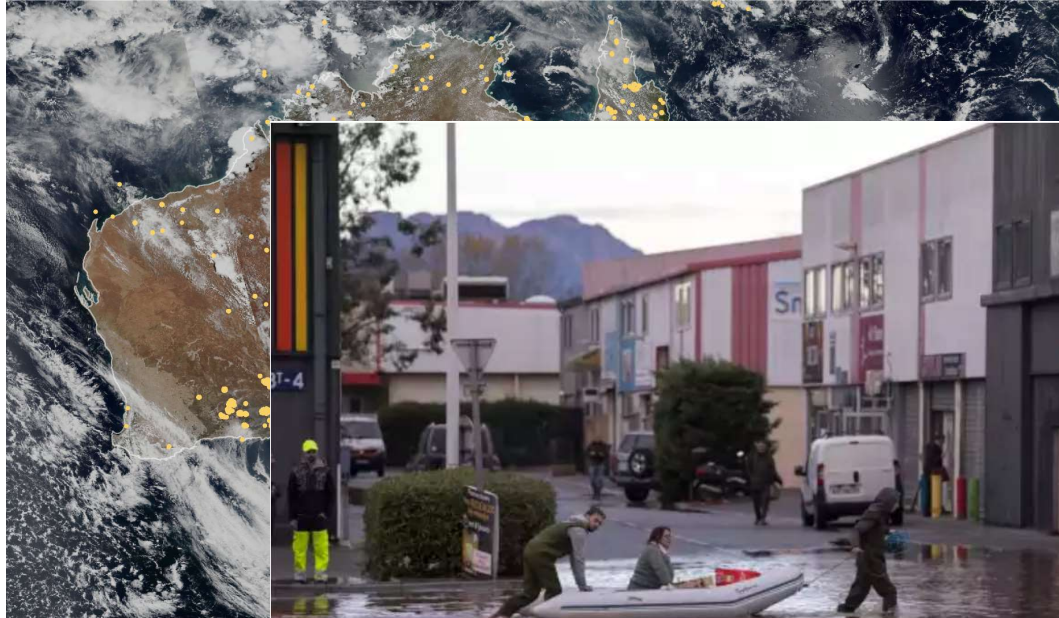
# Introduction : Le changement climatique ?

Sécheresse et Feux de forêt en Australie - Jan 2020



# Introduction : Le changement climatique ?

Sécheresse et Feux de forêt en Australie - Jan 2020



Fortes pluies,  
Inondations, France - 2019



Des résidents inspectent les dommages causés par les inondations, à Fréjus (Var), le 2 décembre. DANIEL COLE / AP

# Introduction : Le changement climatique ?

Sécheresse et Feux de forêt en Australie - Jan 2020



Fortes pluies,  
Inondations, France - 2019



Montée des eaux  
Venise - 2019

Des résidents inspectent  
le 2 décembre. DANIEL



14 novembre ► La Basilique Saint-Marc ou le théâtre de la Fenice ont été la proie d'une eau boueuse et salée venue de la lagune. / © Filippo MONTEFORTE / AFP

# Introduction : Le changement climatique ?

Sécheresse et Feux de forêt en Australie - Jan 2020



Fortes pluies,  
Inondations, France - 2019



Montée des eaux  
Venise - 2019



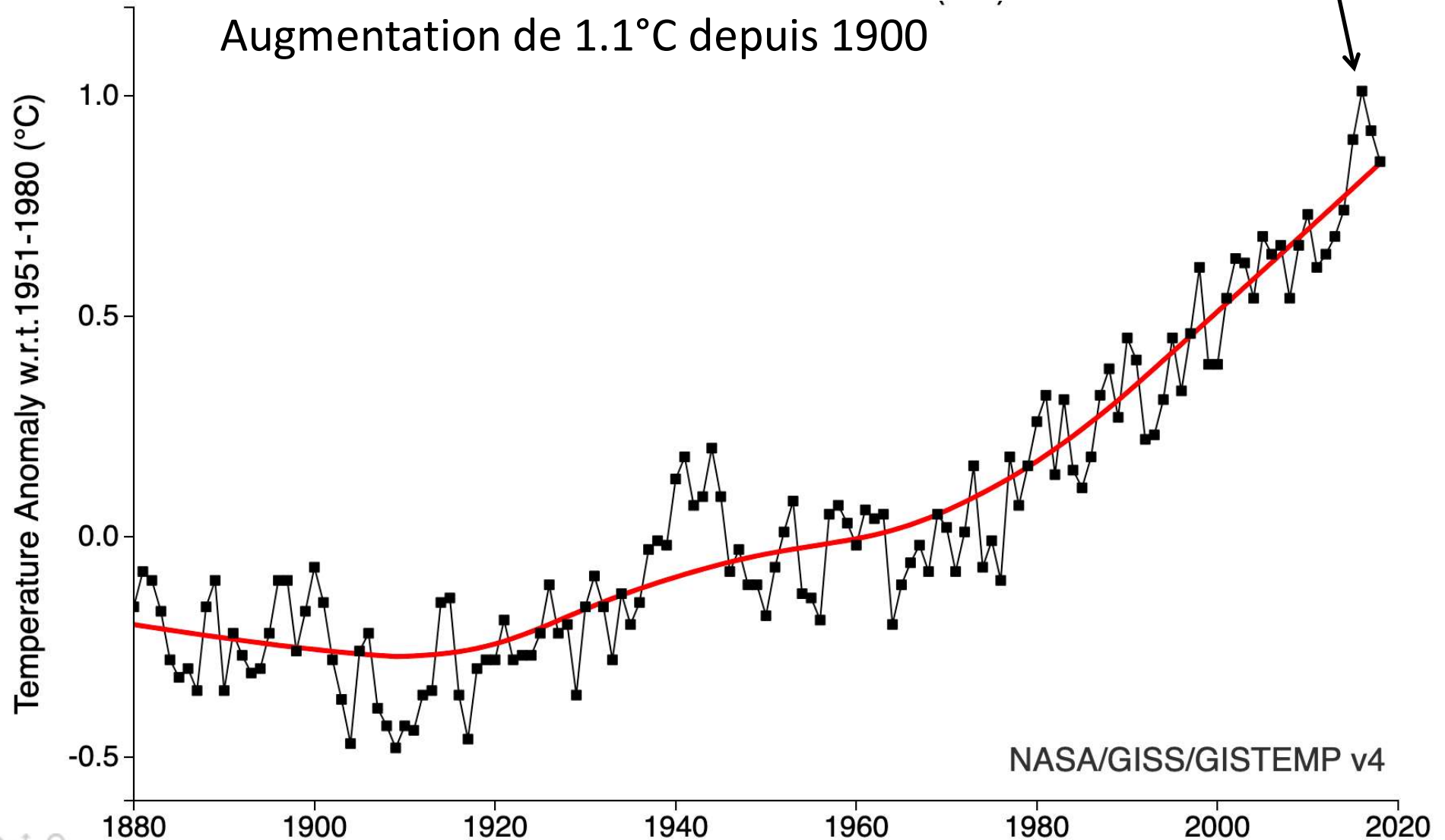
Des résidents inspectent  
le 2 décembre. DANIEL

Cyclones tropicaux  
(Dorian, Fernand, Gabrielle) - 2019



# Introduction : Le changement climatique ?

Réchauffement Global :  
Augmentation de 1.1°C depuis 1900



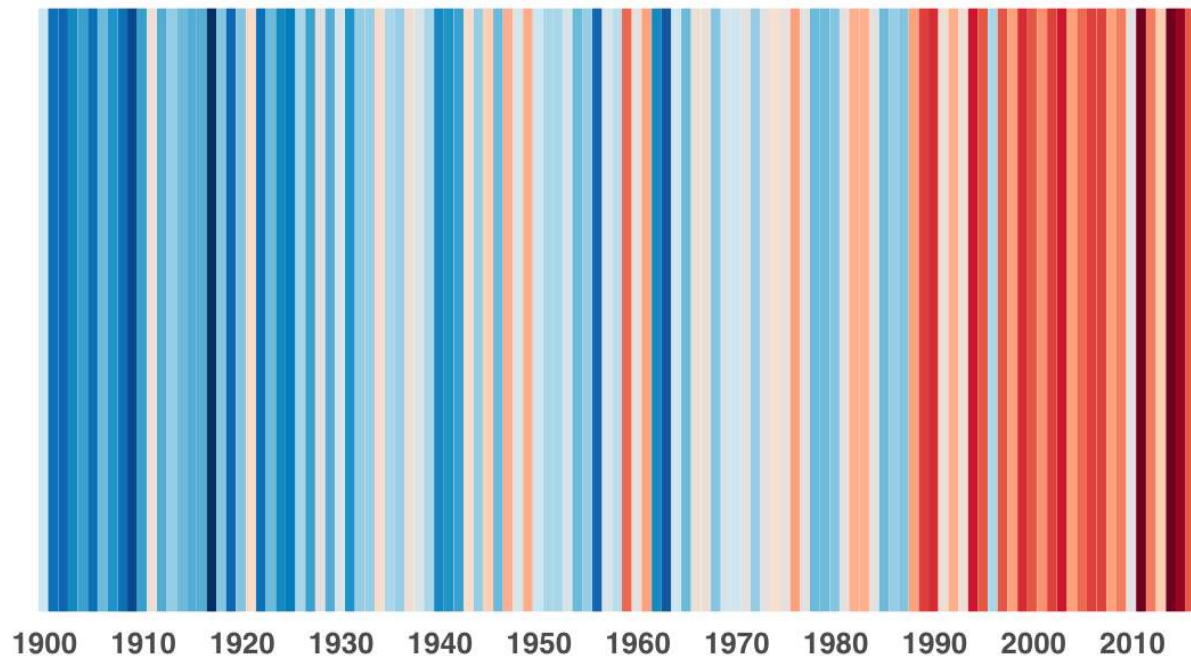
# Introduction : le changement climatique - Paris

## Le réchauffement climatique se ressent-il dans votre ville ?

**LES DÉCODEURS**  
VENONS-EN AUX FAITS

CHOISISSEZ UNE STATION MÉTÉO : 75 - Paris ▼

10 °C  13,7 °C

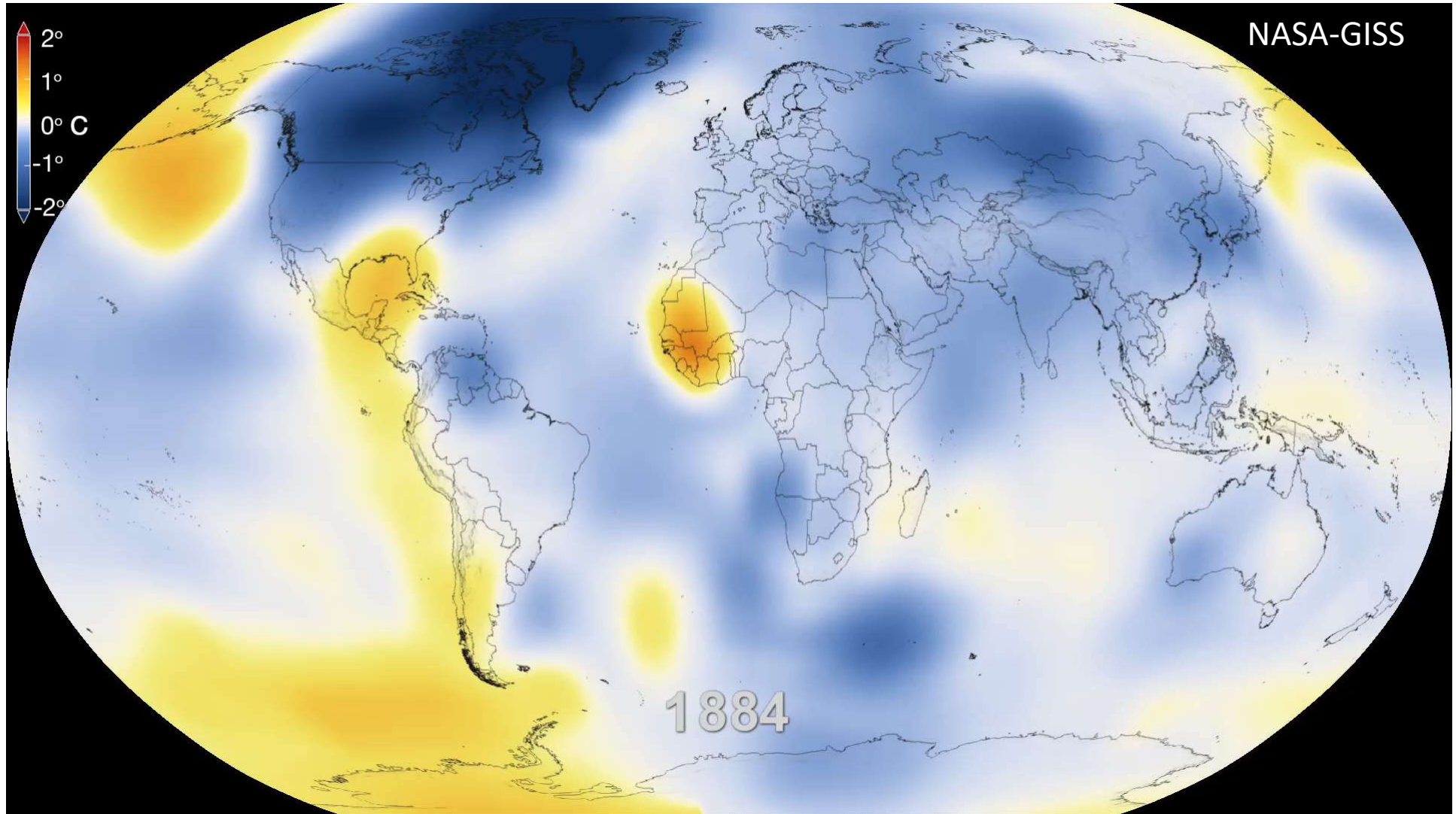


Evolution de la température par année depuis 1900

[https://www.lemonde.fr/les-decodeurs/article/2018/09/08/le-rechauffement-climatique-au-pas-de-la-porte-retrouvez-l-evolution-des-temperatures-dans-votre-ville\\_5352167\\_4355770.htm](https://www.lemonde.fr/les-decodeurs/article/2018/09/08/le-rechauffement-climatique-au-pas-de-la-porte-retrouvez-l-evolution-des-temperatures-dans-votre-ville_5352167_4355770.htm)

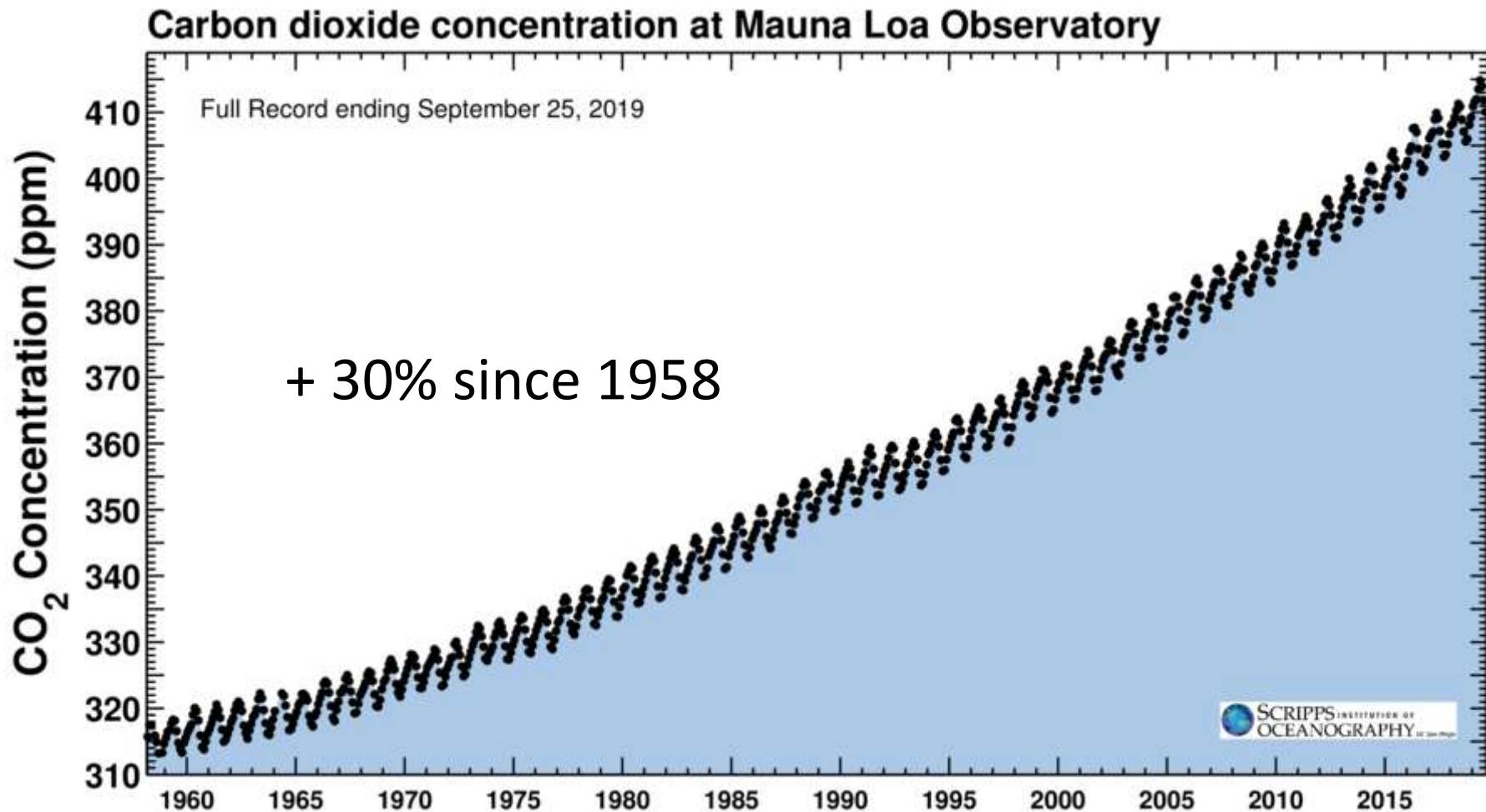
Climate Stripes

# Introduction : le changement climatique – sur le globe



# Introduction : Un CO<sub>2</sub> qui n'en finit pas de croître...

La Courbe de Keeling : +30% depuis 1958 !



# Introduction : les mouvements citoyens

Marche pour le Climat (13 Octobre 2018)



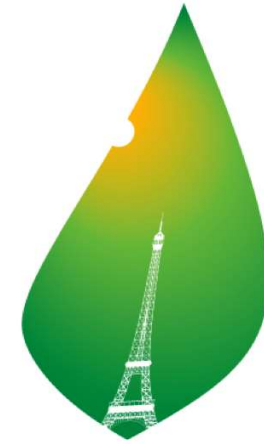
# Introduction : Un accord International

21<sup>st</sup> Conférence des Parties (COP) de la  
Convention Cadre des Nations Unies sur le  
Changement Climatique

Organisée à Paris-Le Bourget du 30 Novembre  
au 11 Décembre 2015

Accord de Paris

→ Contenir le réchauffement  
global à moins de **+2° C**,  
et si possible à moins de  
**+1.5°** (par rapport à  
l'époque pré-industriel)




**PARIS2015**  
UN CLIMATE CHANGE CONFERENCE  
COP21·CMP11





Aujourd'hui – quelques éléments pour comprendre



Pourquoi le CO<sub>2</sub> augmente ?



Le Changement climatique – au delà de la température globale



Et demain ? – les projections climatiques

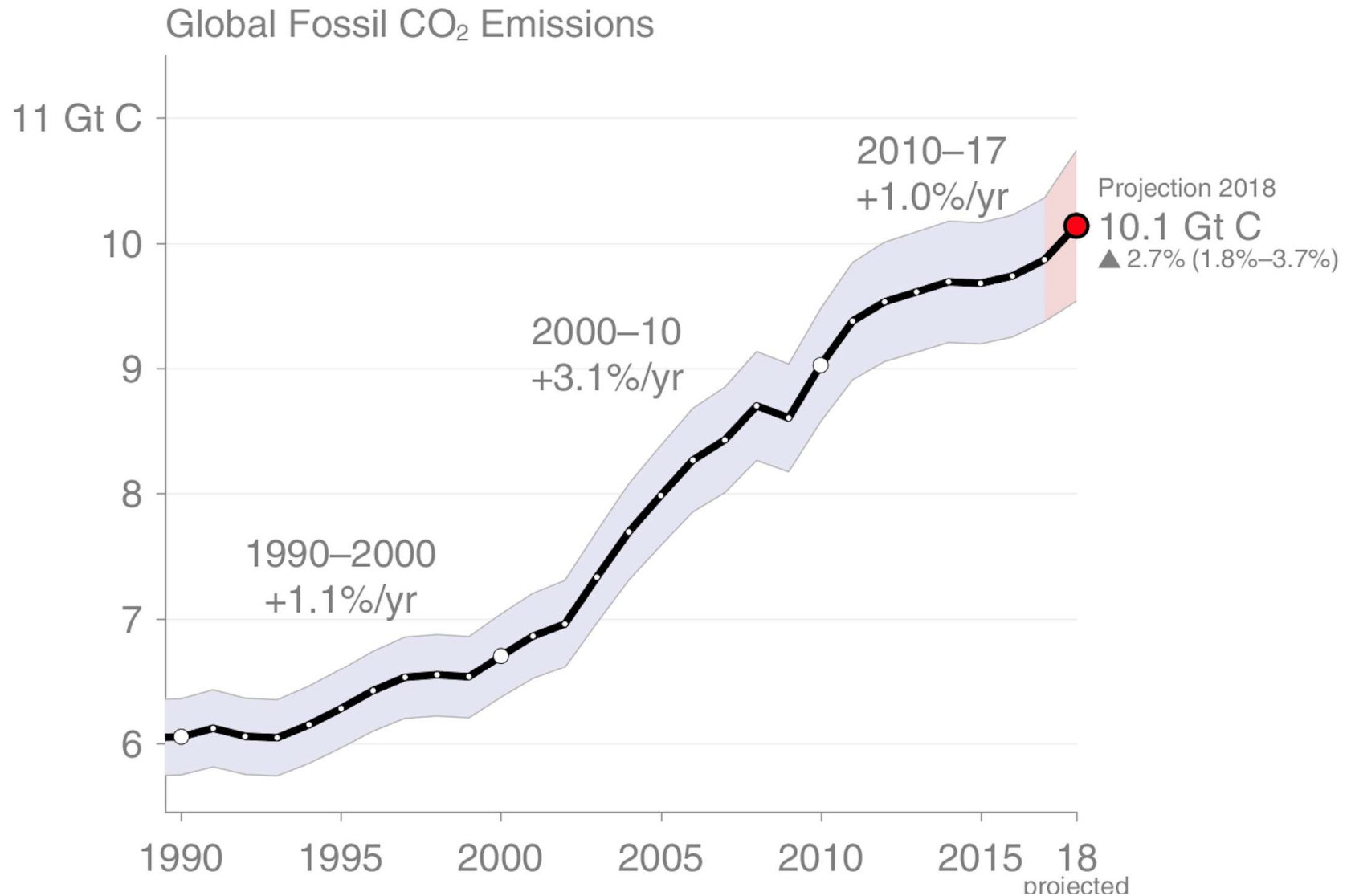


Conclusions



# Le cycle du Carbone : les émissions anthropiques

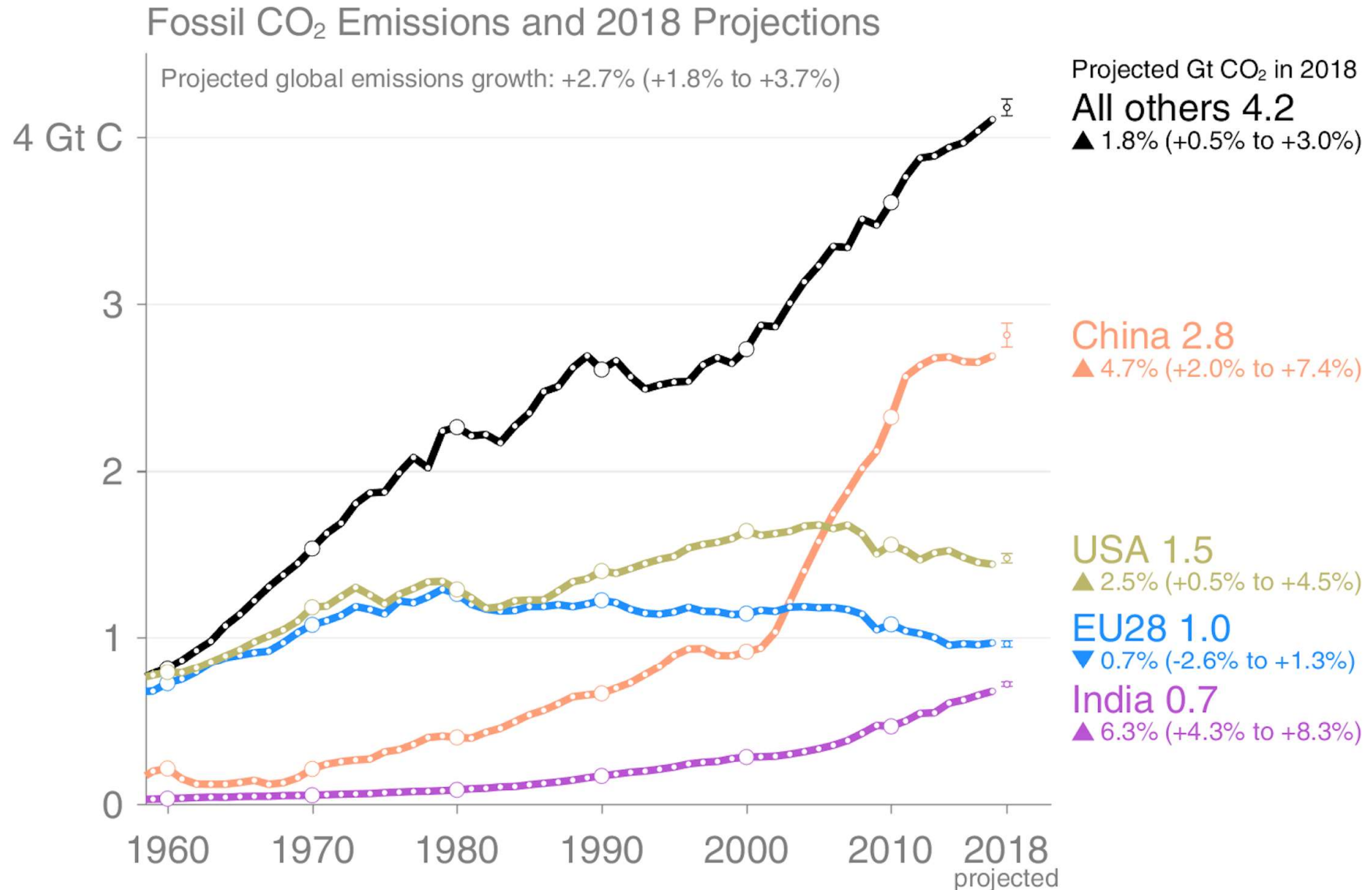
## Combustibles Fossiles et Production de Ciment





# Le cycle du Carbone : les émissions anthropiques

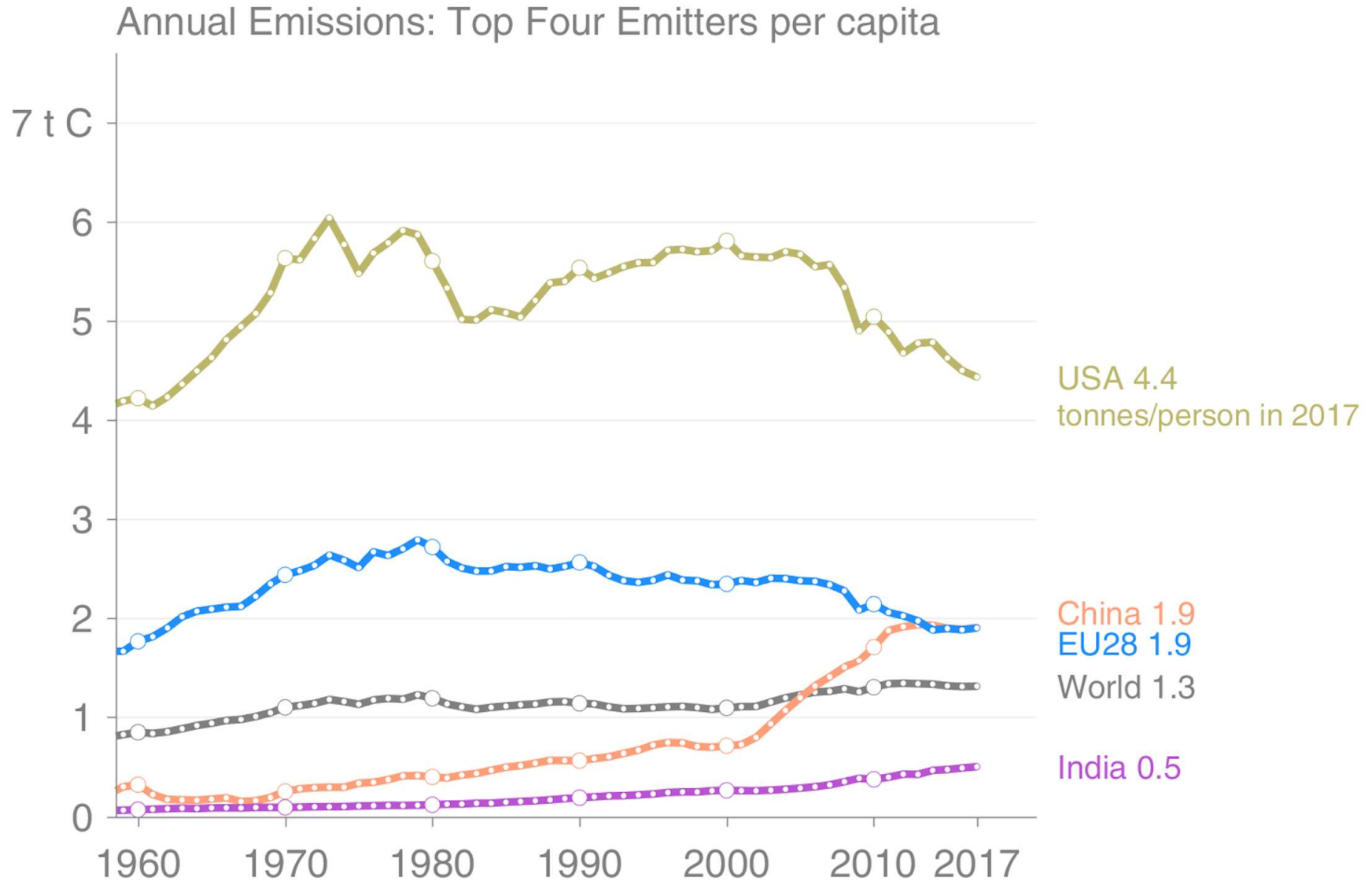
## Combustibles Fossiles et Production de Ciment





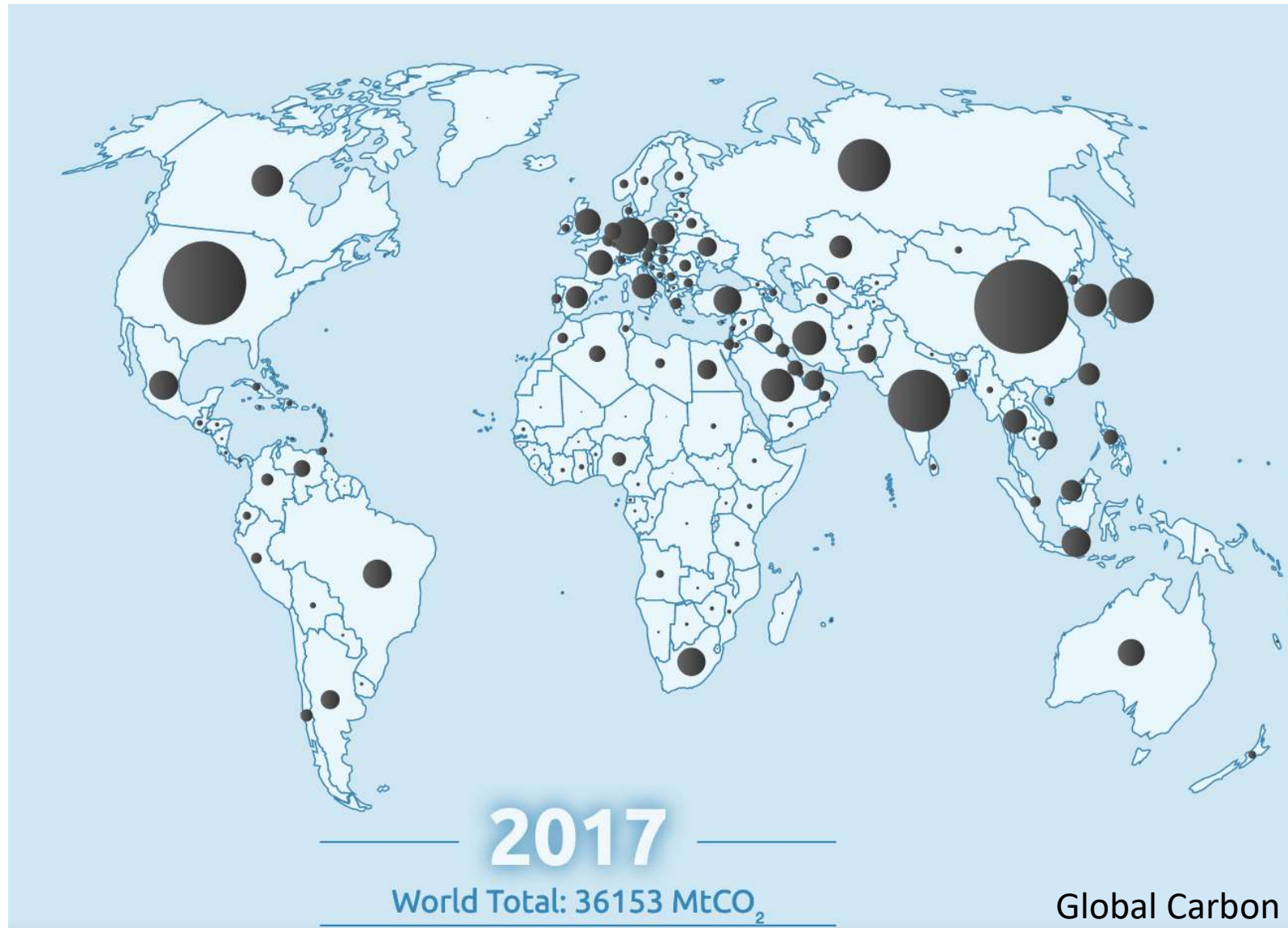
# Le cycle du Carbone : les émissions anthropiques

## Combustibles Fossiles et Production de Ciment



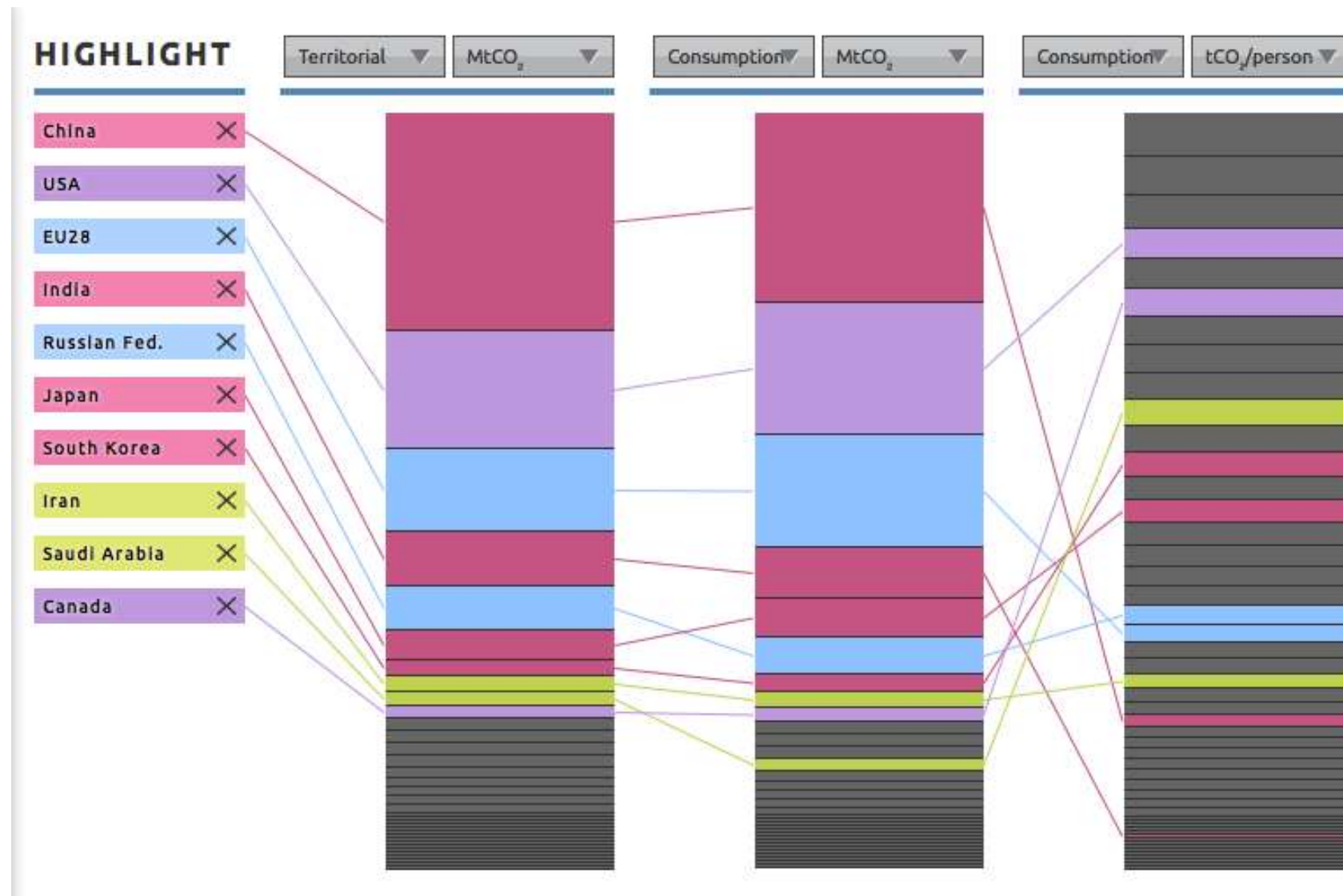
# Le cycle du Carbone : les émissions anthropiques

Les émissions de CO<sub>2</sub> par les différents pays du Monde

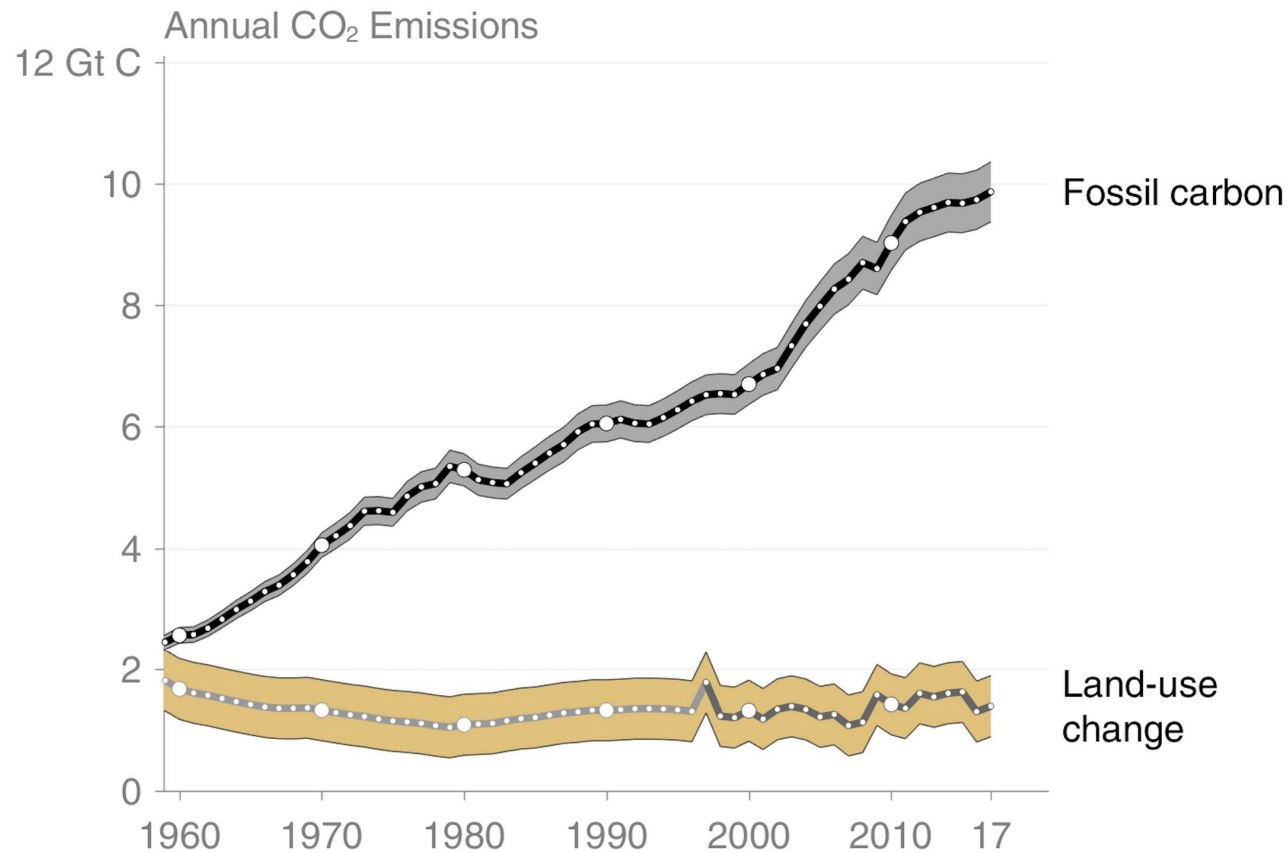


# Le cycle du Carbone : les émissions par pays

Global Carbon Atlas, <http://www.globalcarbonatlas.org>



# Le cycle du Carbone : Combustibles Fossiles et changement d'utilisation des terres

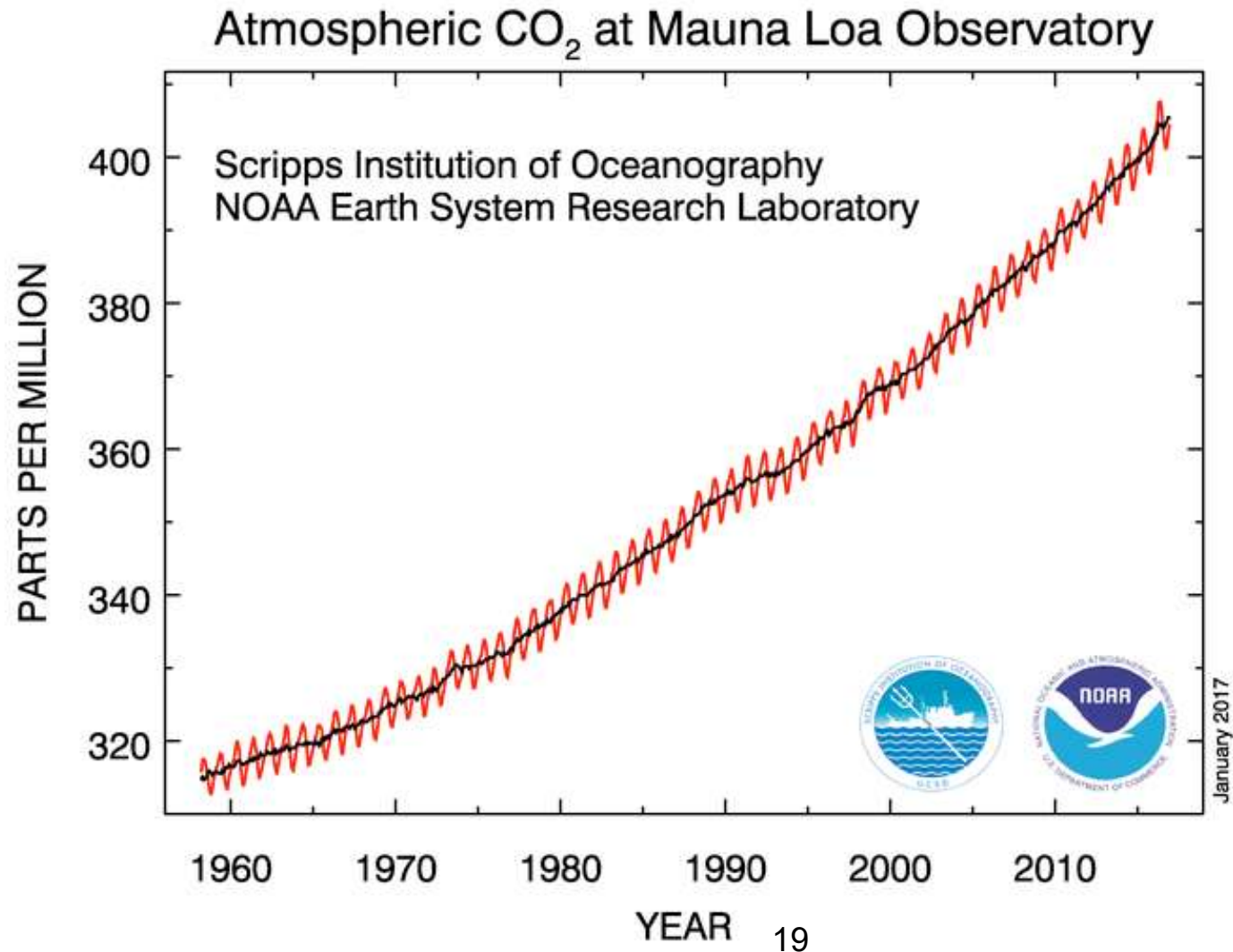


Current LUC emissions  
~10% of total CO<sub>2</sub> emissions



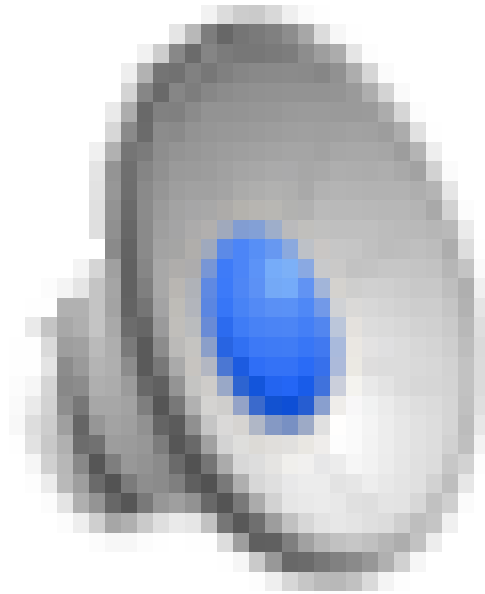
Source: [CDIAC](#); [Houghton et al 2012](#); [Giglio et al 2013](#); Le Quéré et al 2018; Global Carbon Budget 2018

# Retour au CO<sub>2</sub> atmosphérique...





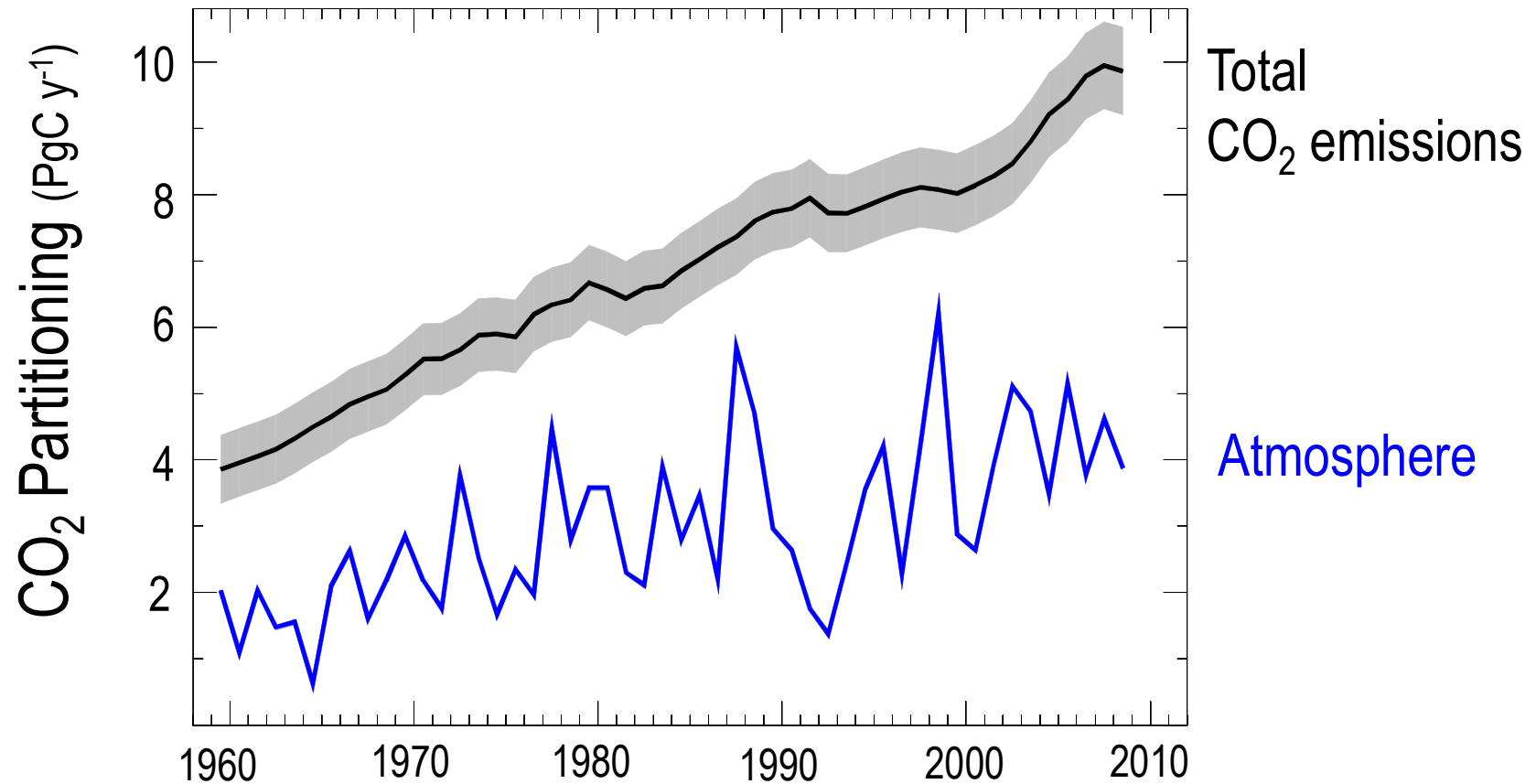
Retour au CO<sub>2</sub> atmosphérique...



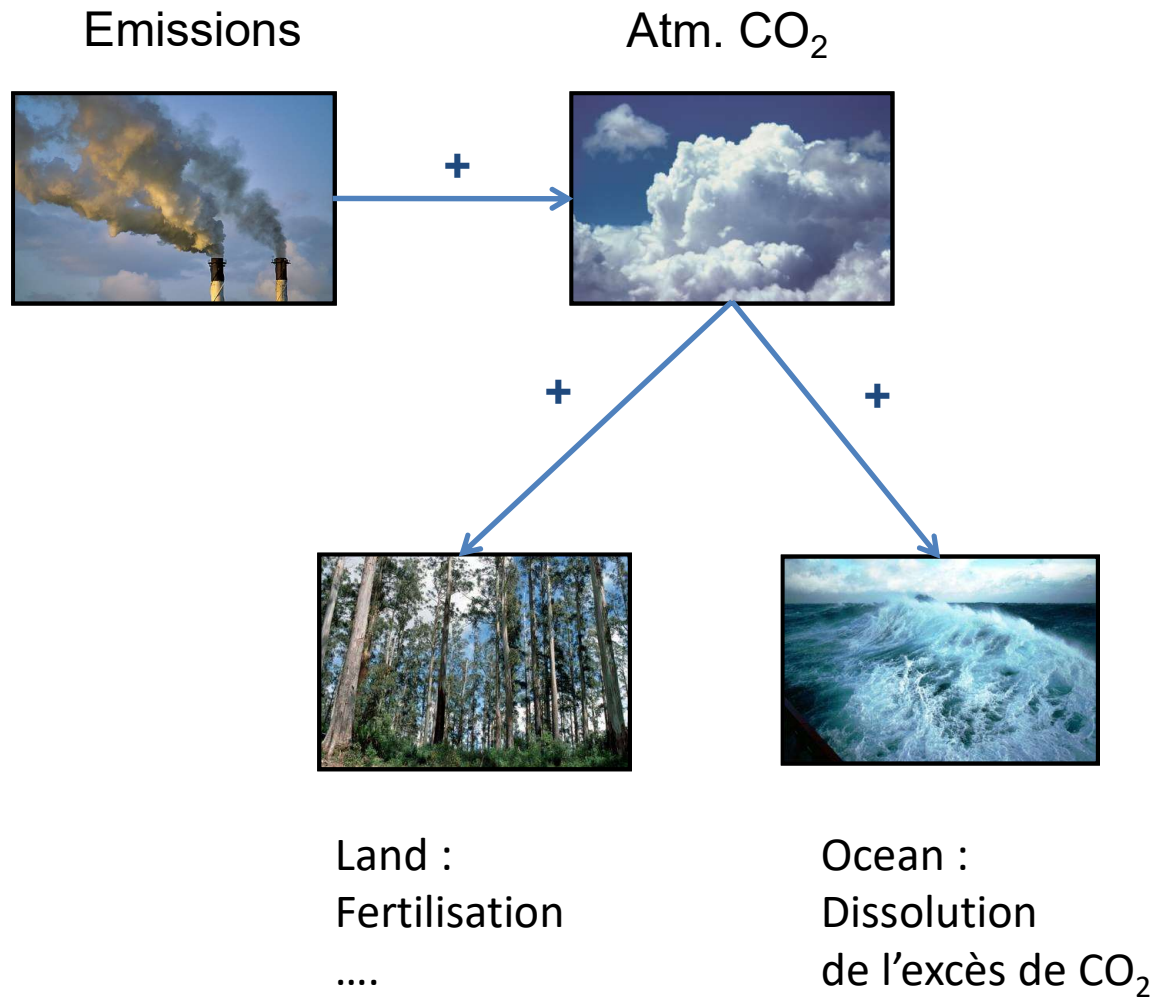


# CO<sub>2</sub> atmosphérique et Emissions...

Evolution of the fraction of total emissions that remain in the atmosphere



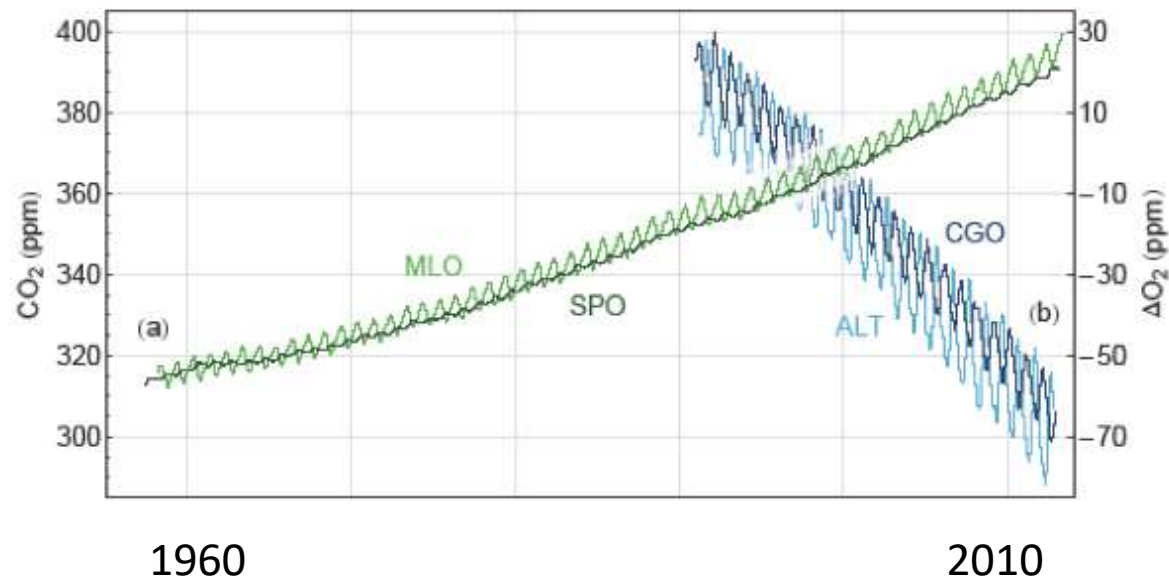
# Les puits de carbone !...



$$\Delta\text{CO}_2 = \text{Emissions} - F_{\text{ocean}} - F_{\text{land}}$$

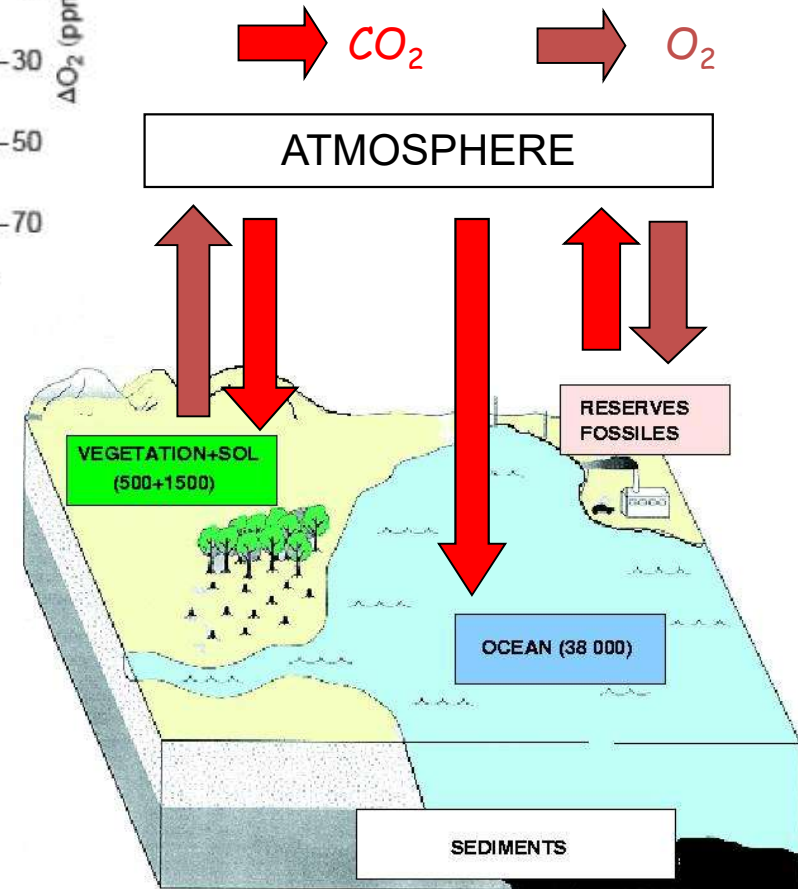
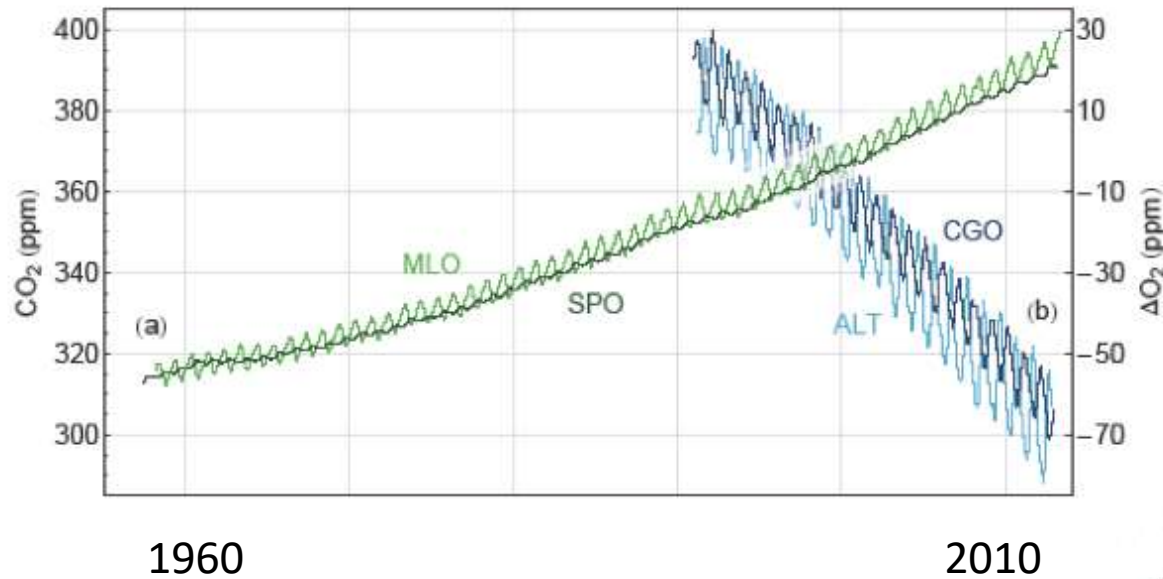
# Pour estimer les puits : la méthode $O_2 / CO_2$

Use of  $O_2$  atm. observations to constrain the carbon cycle (Keeling and Shertz, 1992)



# Pour estimer les puits : la méthode $O_2 / CO_2$

Use of  $O_2$  atm. observations to constrain the carbon cycle (Keeling and Shertz, 1992)



# Le cycle du carbone : heureusement, il y a des puits !

9.4 ± 0.5 PgC/yr 86%



1.5 ± 0.7 PgC/yr 14%



+

4.7 ± 0.1 PgC/yr

45%



3.2 ± 0.7 PgC/yr

32%



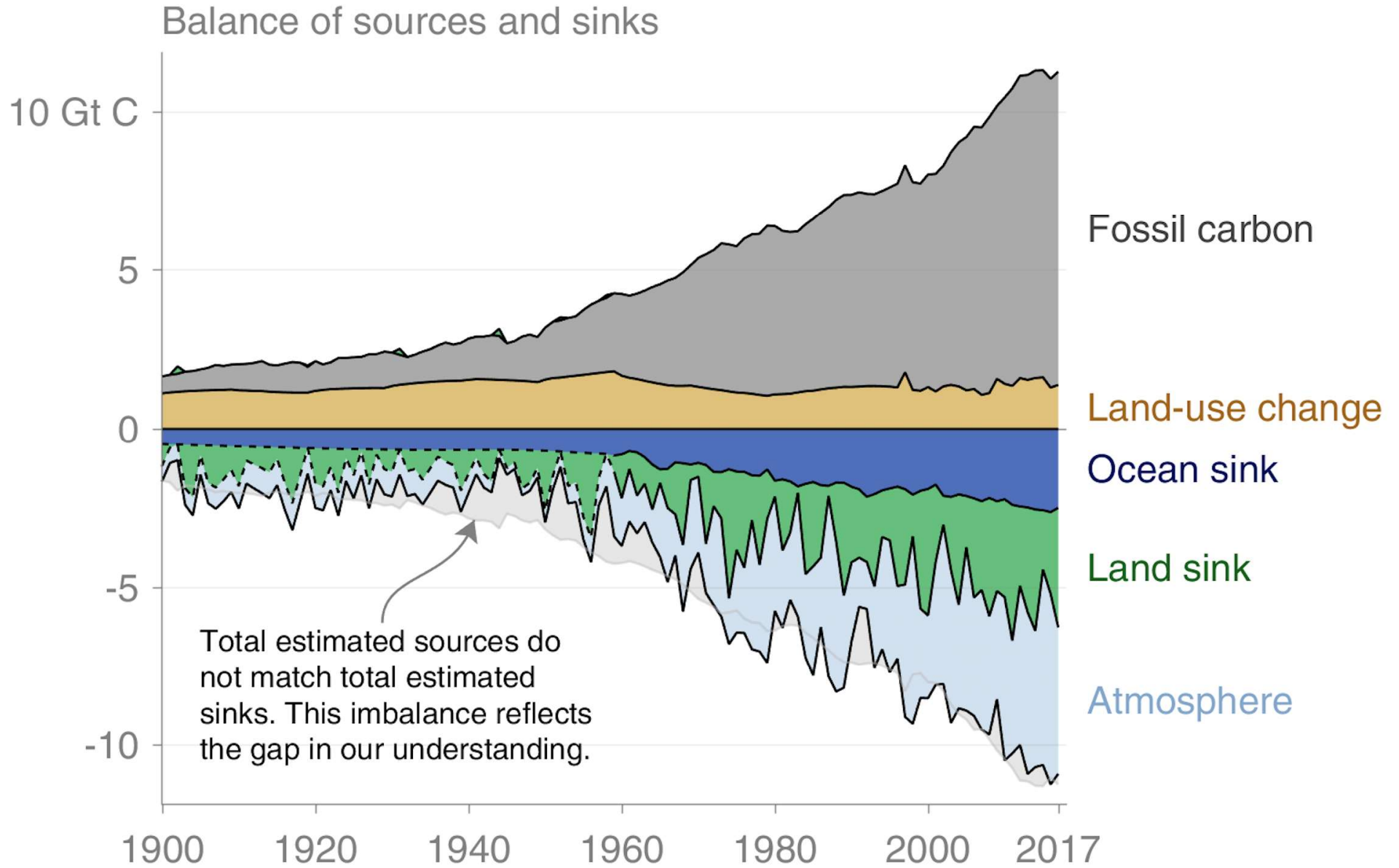
2.4 ± 0.5 PgC/yr

23%



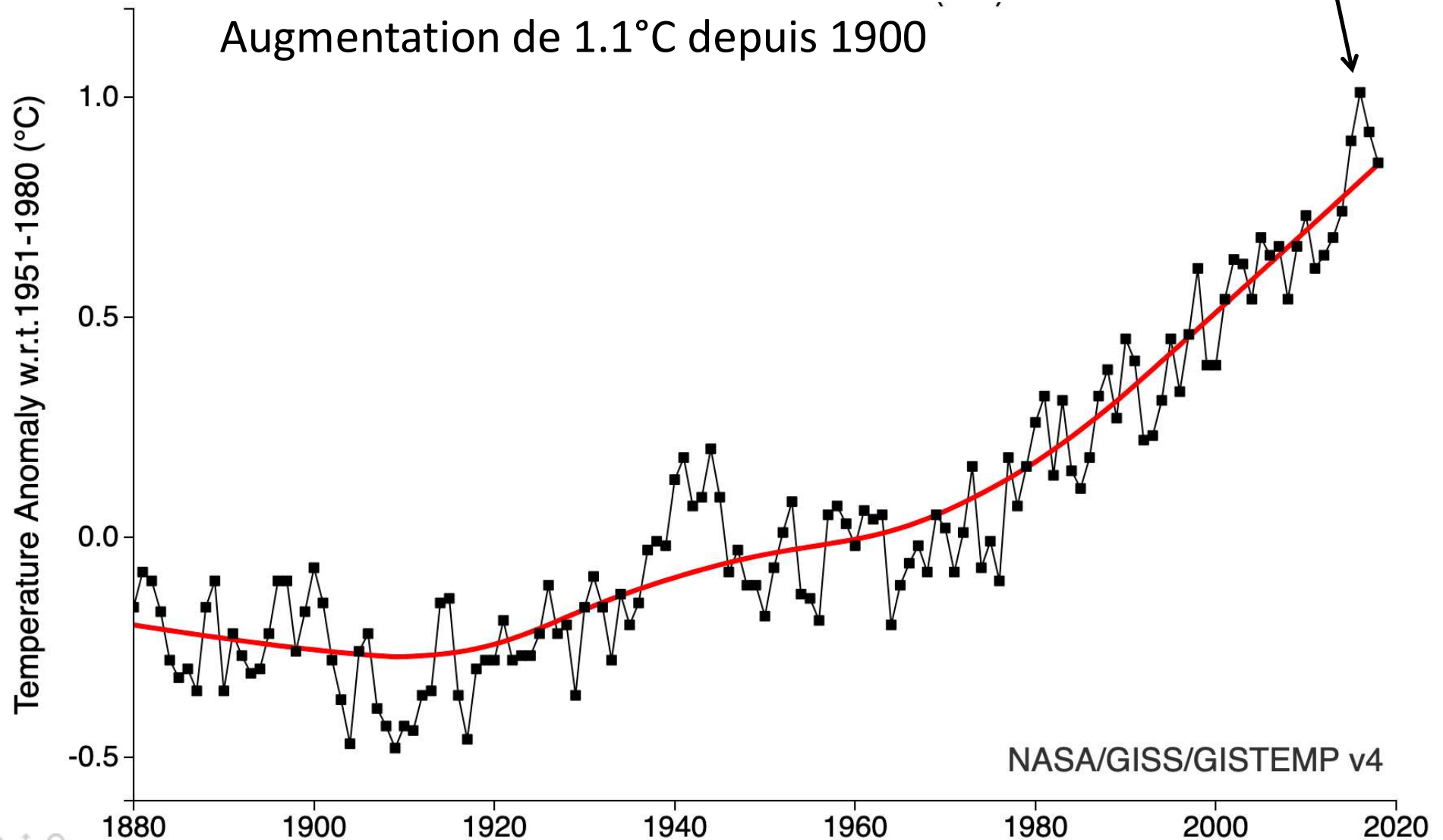


# Le cycle du carbone : heureusement, il y a des puits !



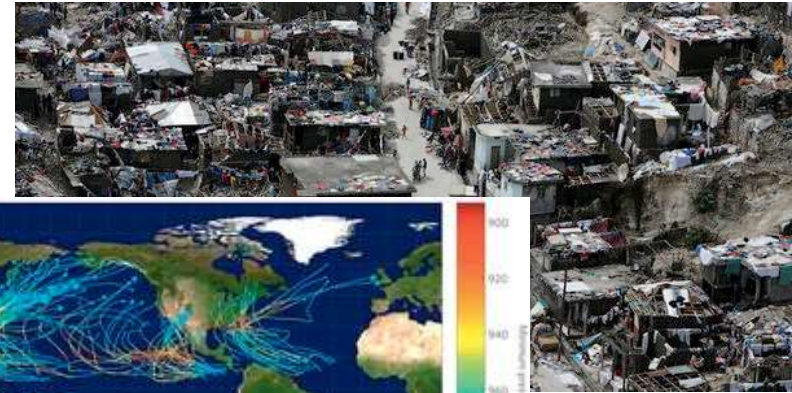
# Changement Climatique : la température

Réchauffement Global :  
Augmentation de 1.1°C depuis 1900



# Au delà de la température

## Evènements Extrêmes



©Le Monde



## Fonte de la glace

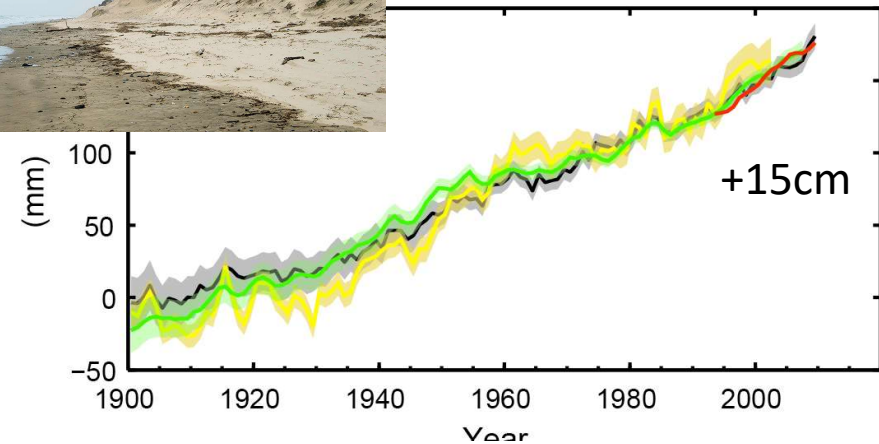


National Snow and Ice Data Center, Boulder, CO



©CNRS

## Augmentation du niveau des mers

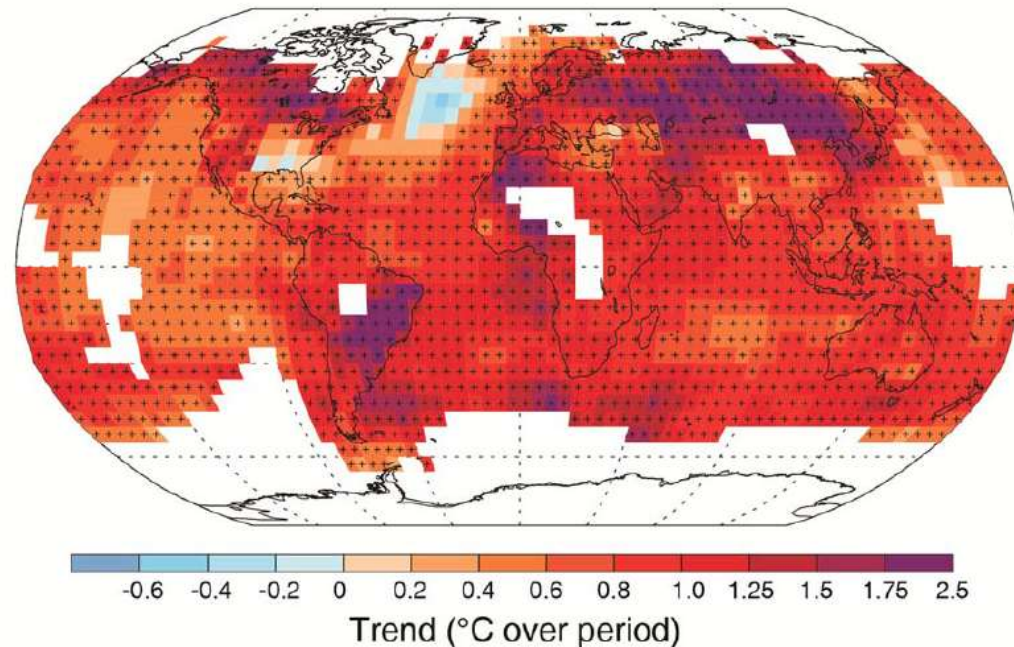


# Changement Climatique : les observations

Le réchauffement du système climatique est sans équivoque, et depuis les années 1950, beaucoup des changements observés sont sans précédent depuis des décennies jusqu'à des millénaires.

L'atmosphère et l'océan se sont réchauffés, la quantité des neiges et glaces a diminué et le niveau des mers s'est élevé.

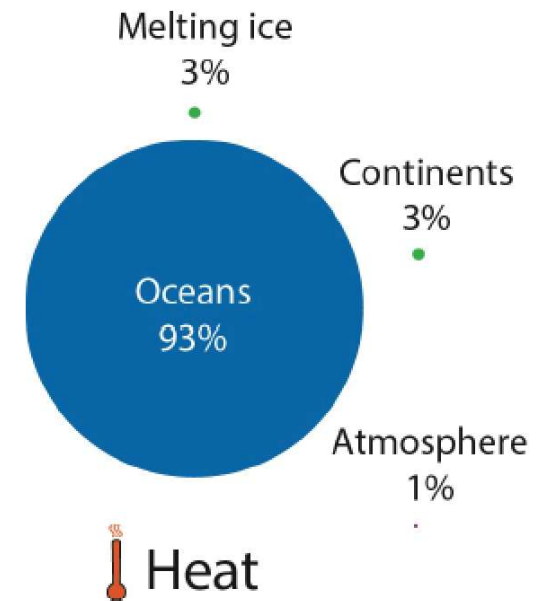
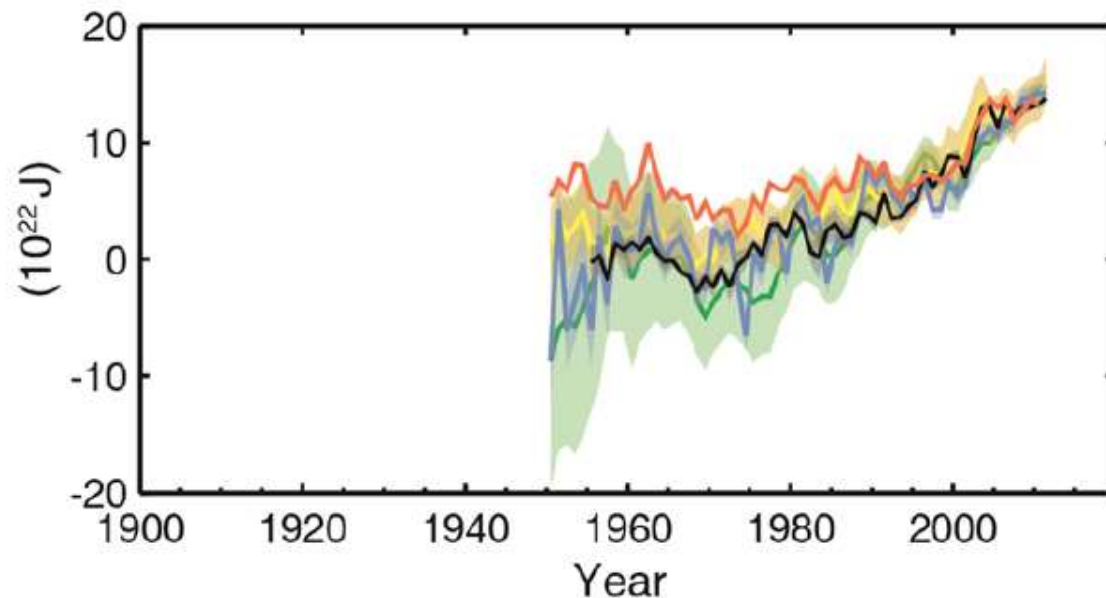
Observed change in average surface temperature 1901–2012



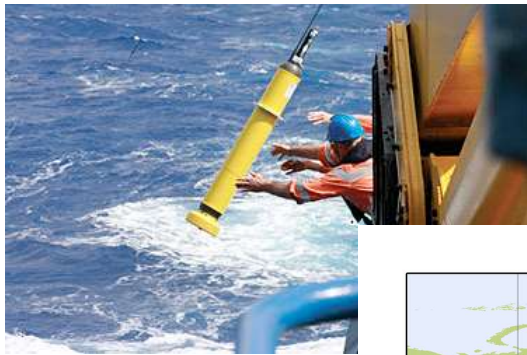
# Le contenu thermique des océans

Le réchauffement des océans représente l'essentiel de l'augmentation de la quantité d'énergie stockée dans le système climatique et représente plus de 90% de l'énergie accumulée entre 1971 et 2010

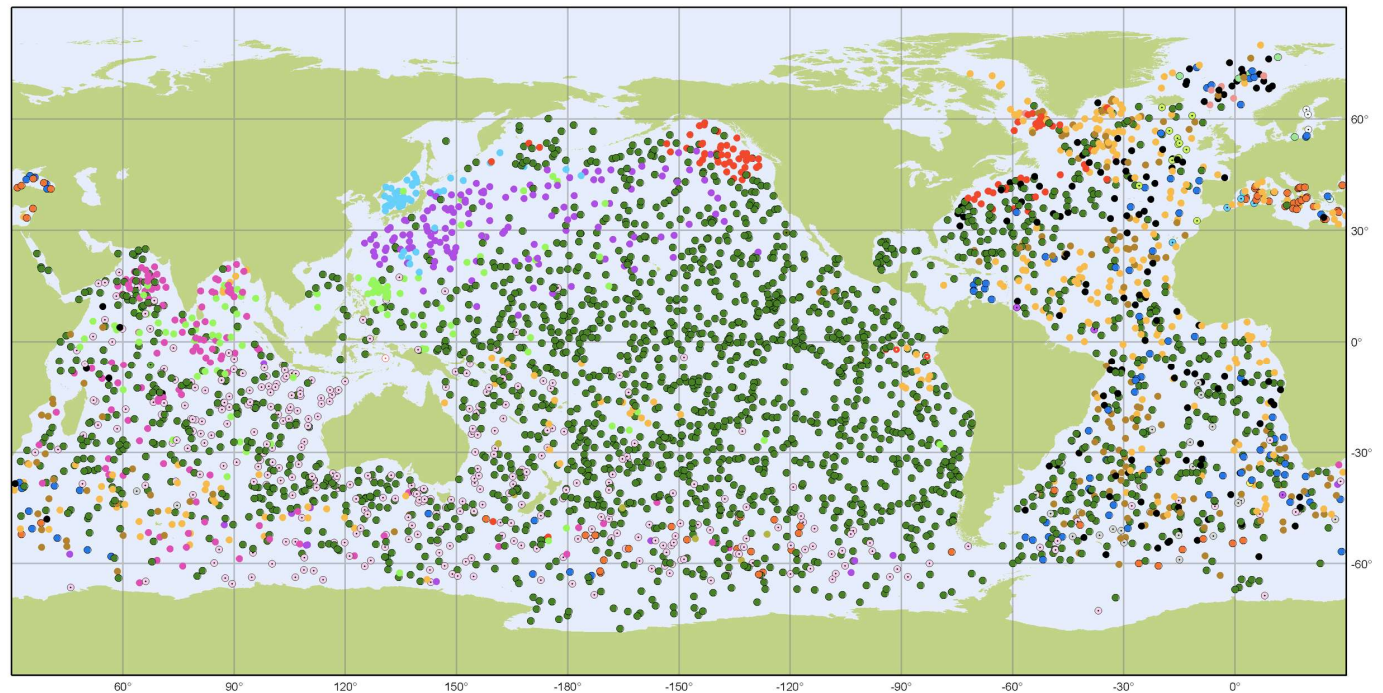
Change in global average upper ocean heat content



# Le contenu thermique des océans



## ARGO since 2005



Argo

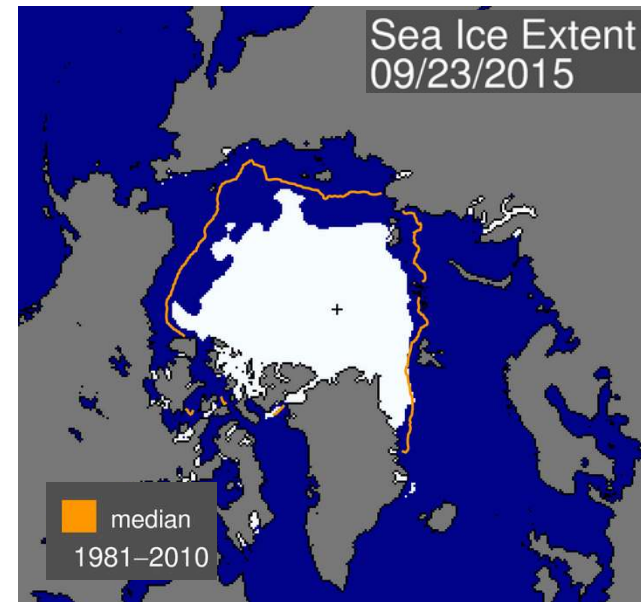
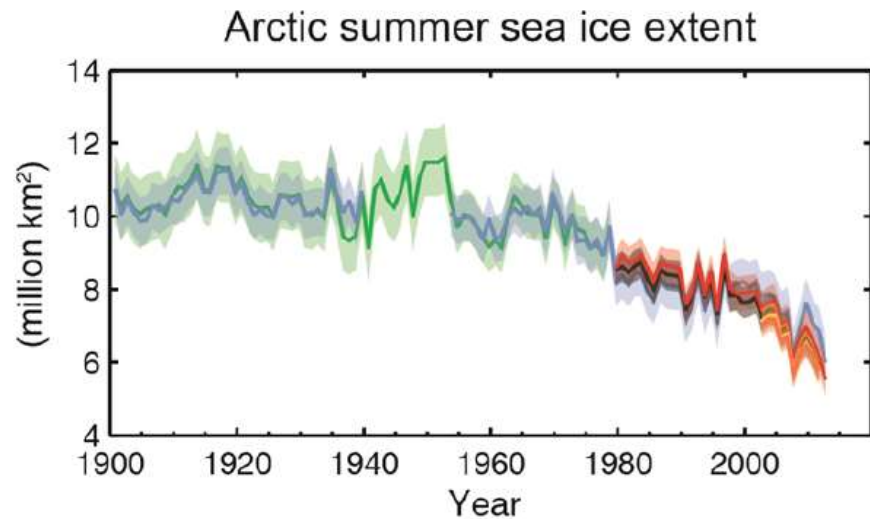
National contributions - 3881 Operational Floats

February 2018

Latest location of operational floats (data distributed within the last 30 days)



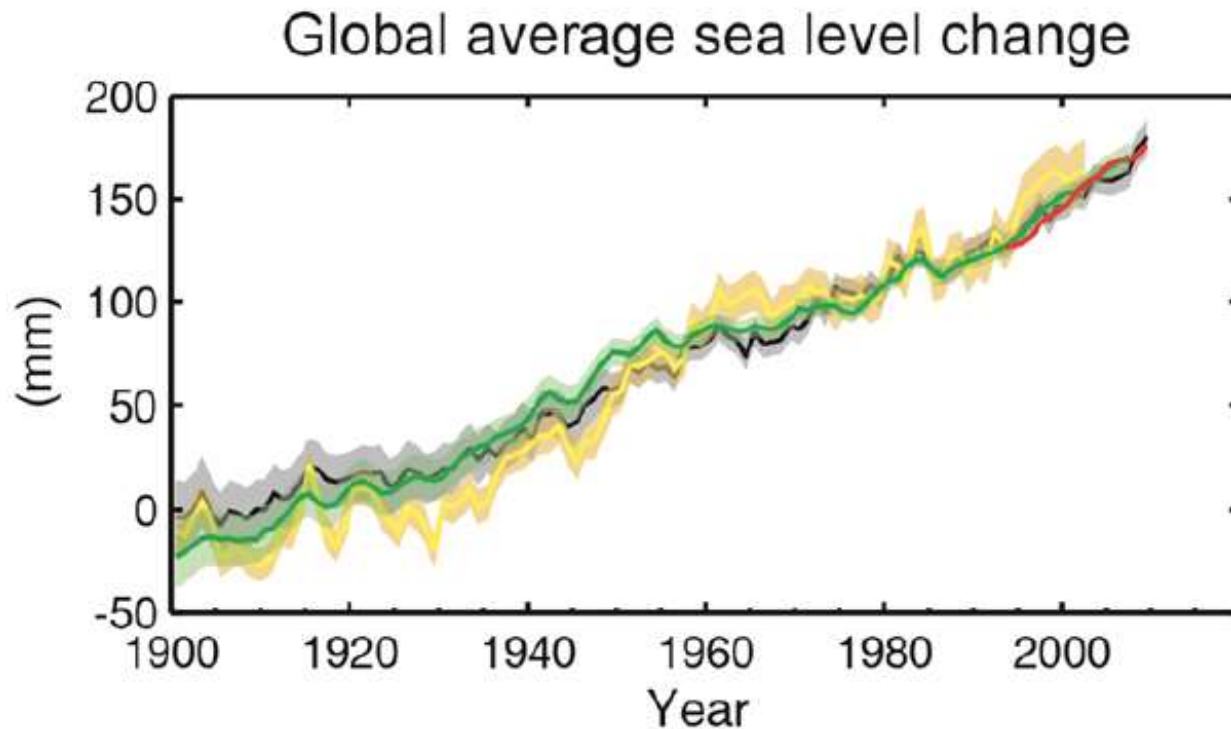
# Evolution des surfaces englacées



Sur les deux dernières décennies, la masse des calottes glaciaires a diminué, les glaciers de pratiquement toutes les régions du monde ont continué à reculer, les étendues de la banquise arctique et du manteau neigeux de printemps de l'hémisphère nord ont diminué

De multiples éléments indiquent que l'Arctique connaît un réchauffement important depuis le milieu du XX<sup>e</sup> siècle.

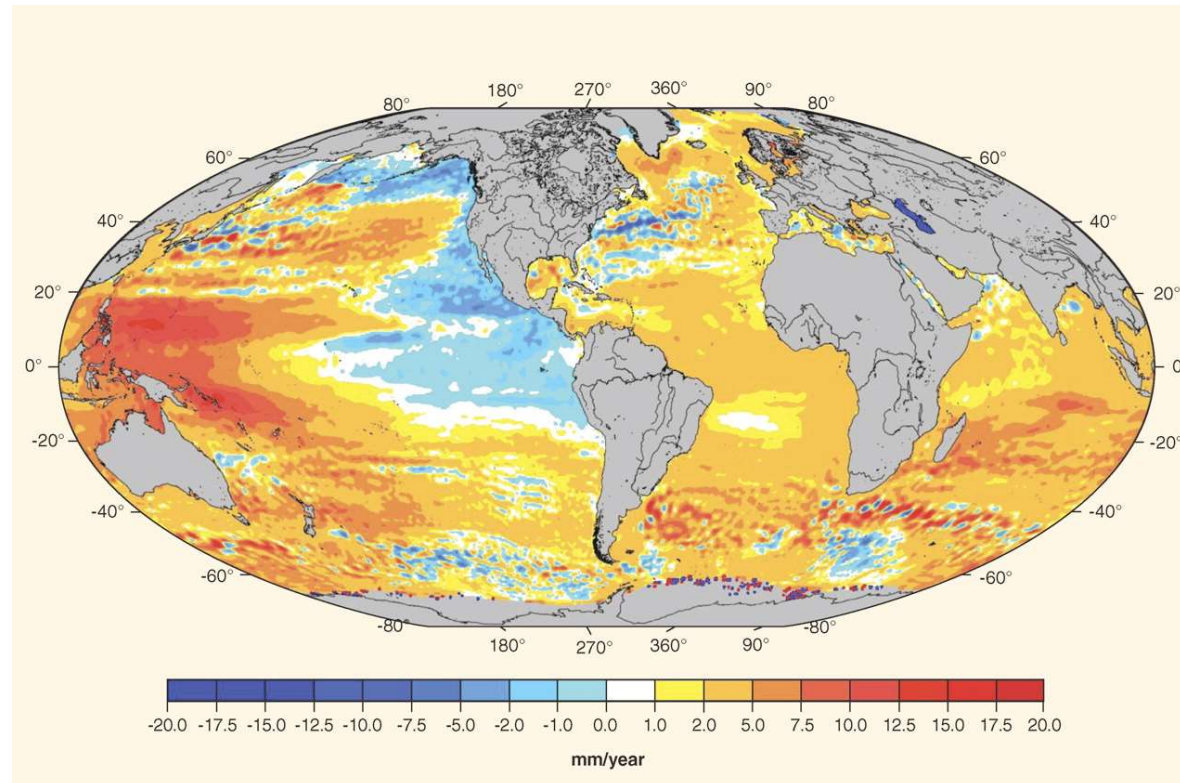
## Evolution du niveau de la mer



Depuis le milieu du XIX<sup>ème</sup> siècle, le taux d'élévation du niveau moyen des mers est supérieur au taux moyen des deux derniers millénaires.

Le niveau moyen des mers s'est élevé de 0,19 [0,17 à 0,21] m au cours de la période 1901–2010.

# Evolution du niveau de la mer

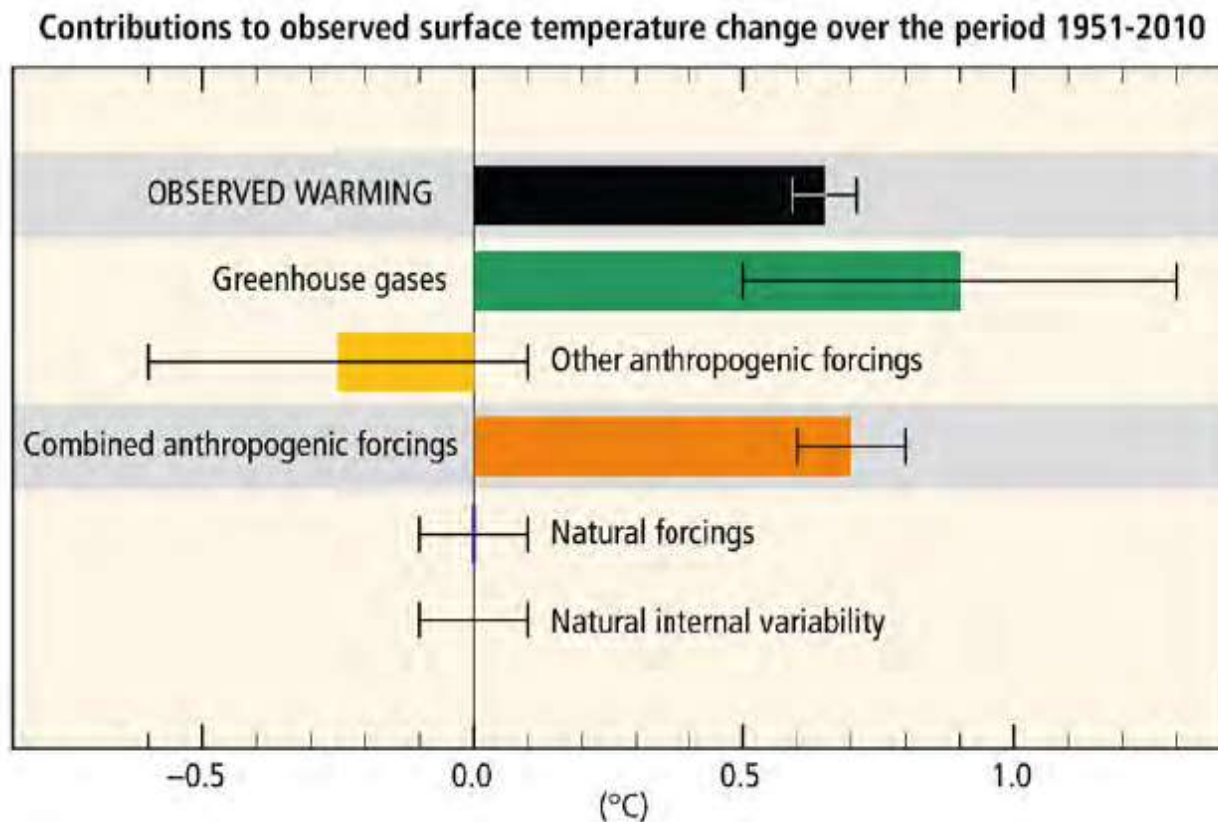


Depuis le milieu du XIX<sup>ème</sup> siècle, le taux d'élévation du niveau moyen des mers est supérieur au taux moyen des deux derniers millénaires.

Le niveau moyen des mers s'est élevé de 0,19 [0,17 à 0,21] m au cours de la période 1901–2010.

## Le lien entre l'Homme, gaz à effet de serre et climat

L'influence humaine a été la cause principale du réchauffement observé depuis le milieu du XX<sup>ème</sup> siècle.



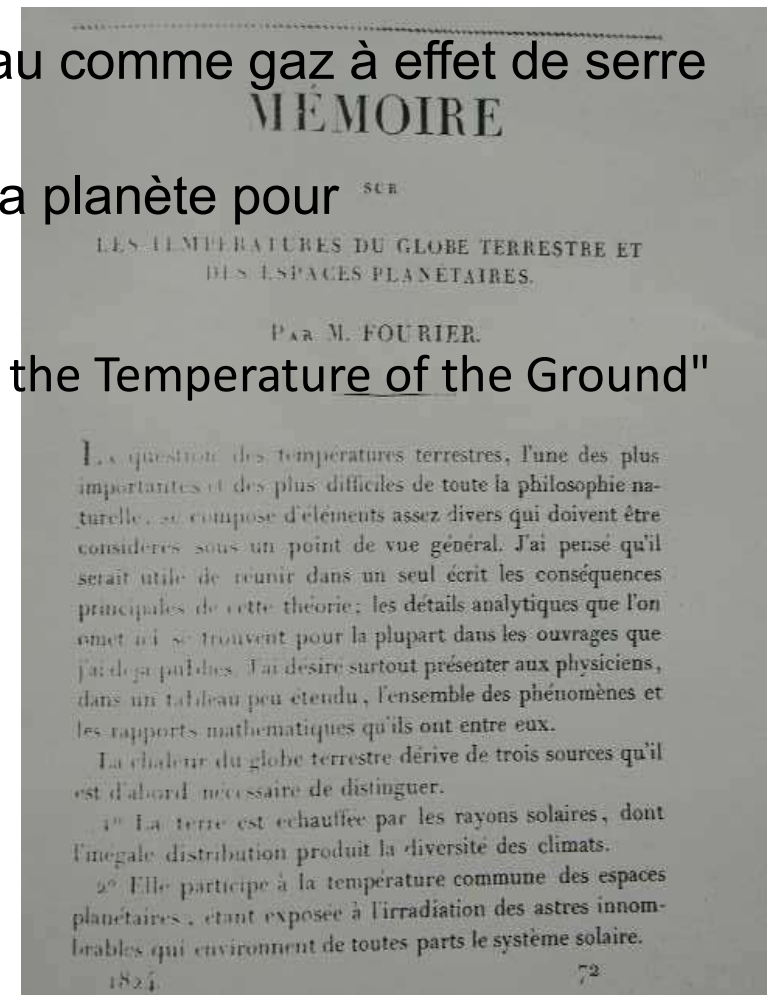
# CO<sub>2</sub> et effet de serre – un peu d’histoire

- 1827 Fourier suggère l’existence d’un “effet de serre”
- 1860 Tyndal identifie le CO<sub>2</sub> et la vapeur d’eau comme gaz à effet de serre
- 1896 Arrhenius calcule le réchauffement de la planète pour un doublement du CO<sub>2</sub> dans l’atmosphère

"On the Influence of Carbonic Acid in the Air upon the Temperature of the Ground"  
*Philosophical Magazine* 41, 237 (1896)

Arrhenius' Model Results

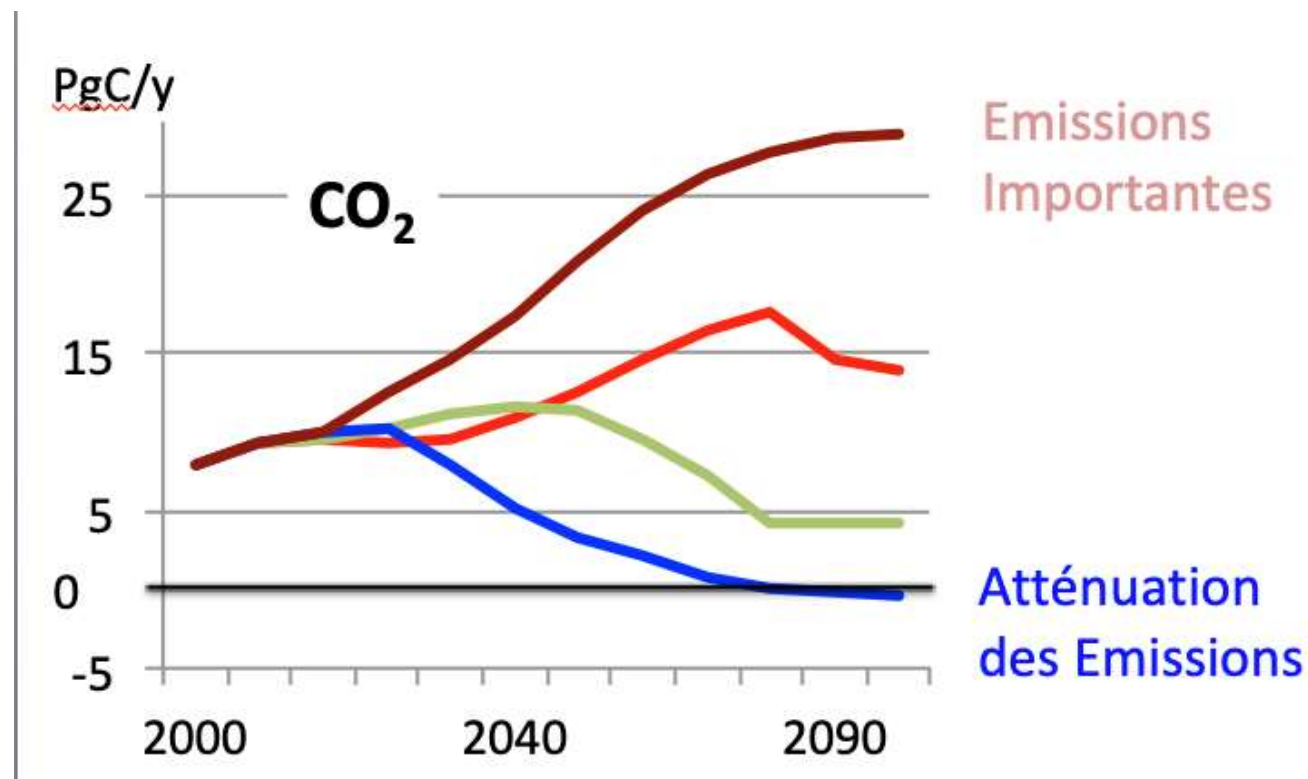
Relative CO <sub>2</sub>	Relative Temperature (°C)
.67	- 3.19
1.5	+3.42
2.0	+5.49
2.5	+7.16
3.0	+8.40



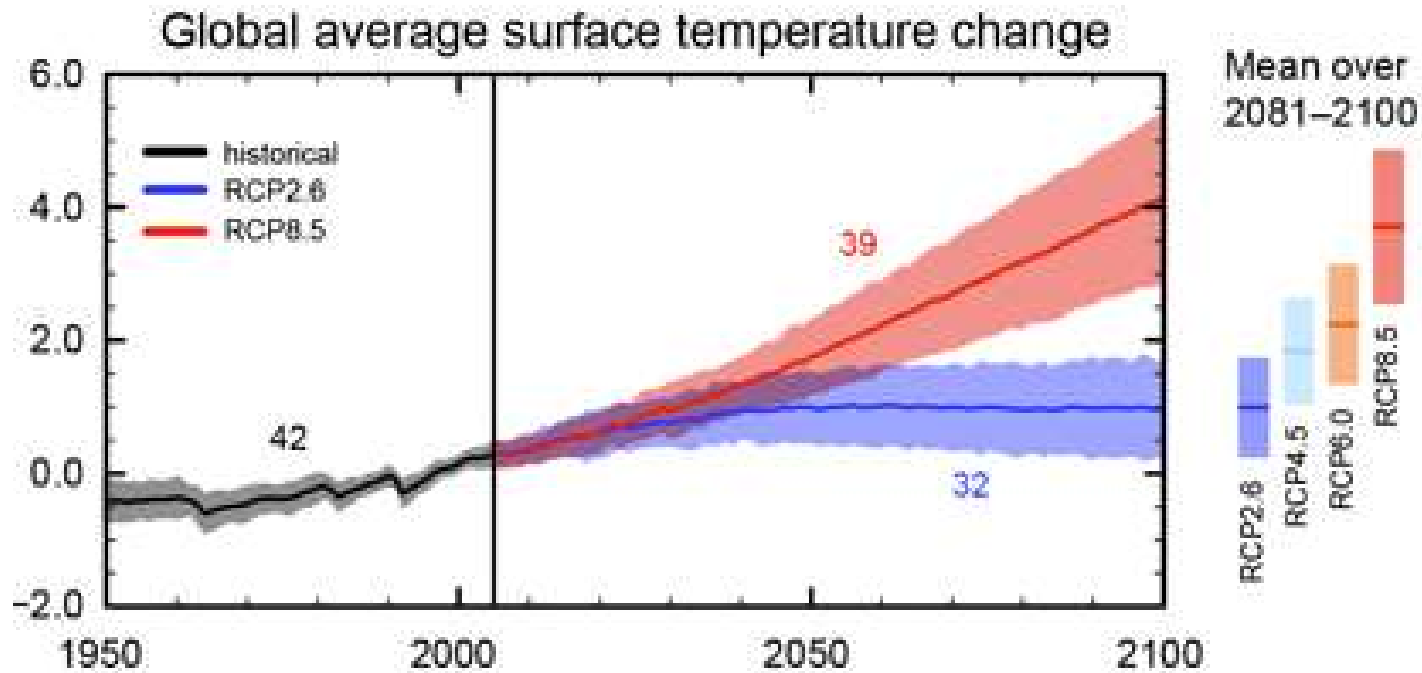
## Les scénarios pour le 21<sup>ème</sup> siècle

Les économistes développent des scénarios d'évolution des émissions de gaz à effet de serre en fonction de la population, des technologies, des politiques, ... pour le 21<sup>ème</sup> siècle.

Ces forçages sont utilisés en entrée des modèles de climat pour simuler l'évolution du climat au 21<sup>ème</sup> siècle



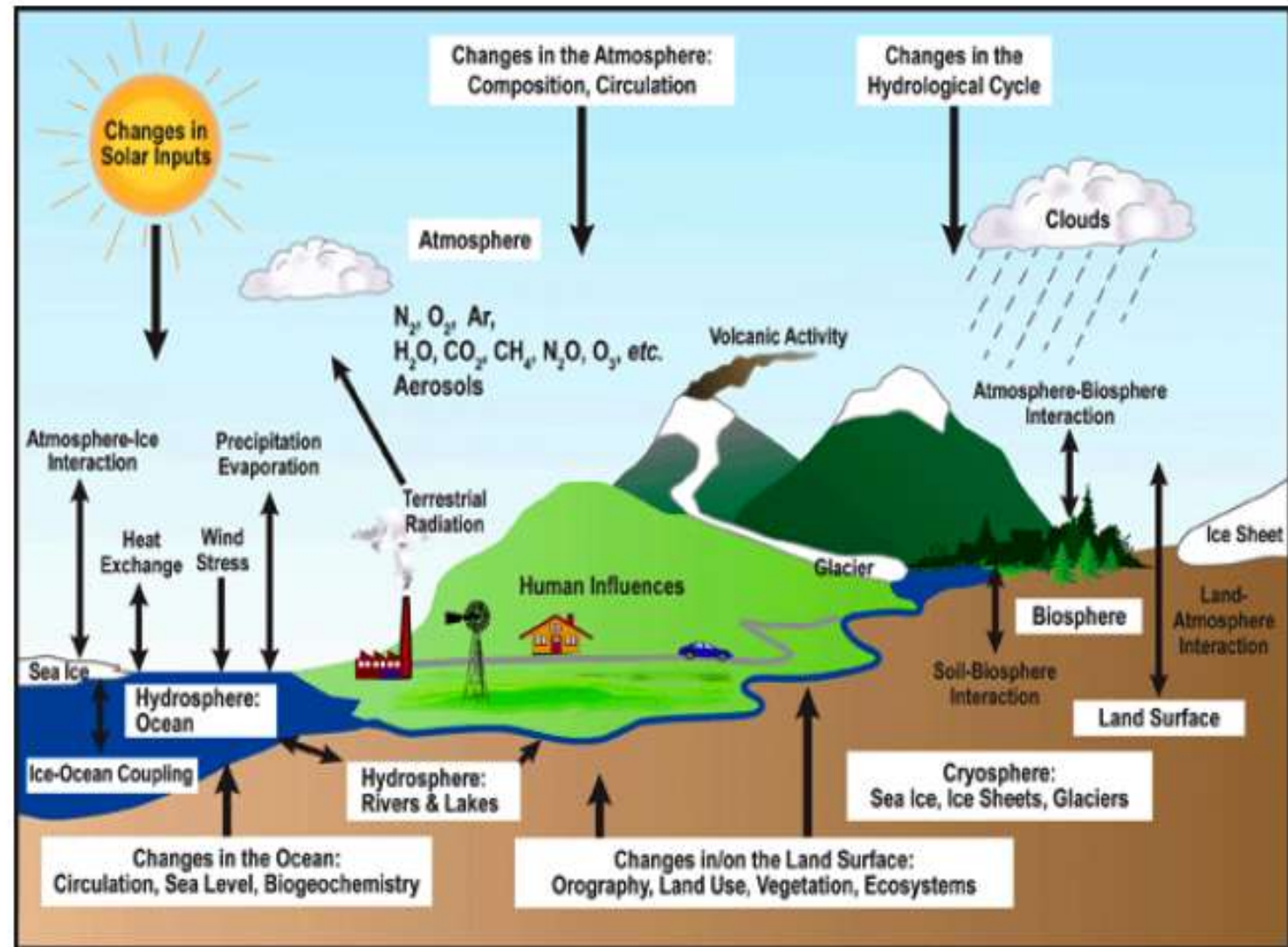
## Les projections climatiques



Le changement de la température moyenne du globe en surface pour la fin du XXI<sup>e</sup> siècle dépassera *probablement* 1,5°C par rapport à 1850-1900 pour tous les scénarios RCP, sauf pour le scénario RCP2.6.

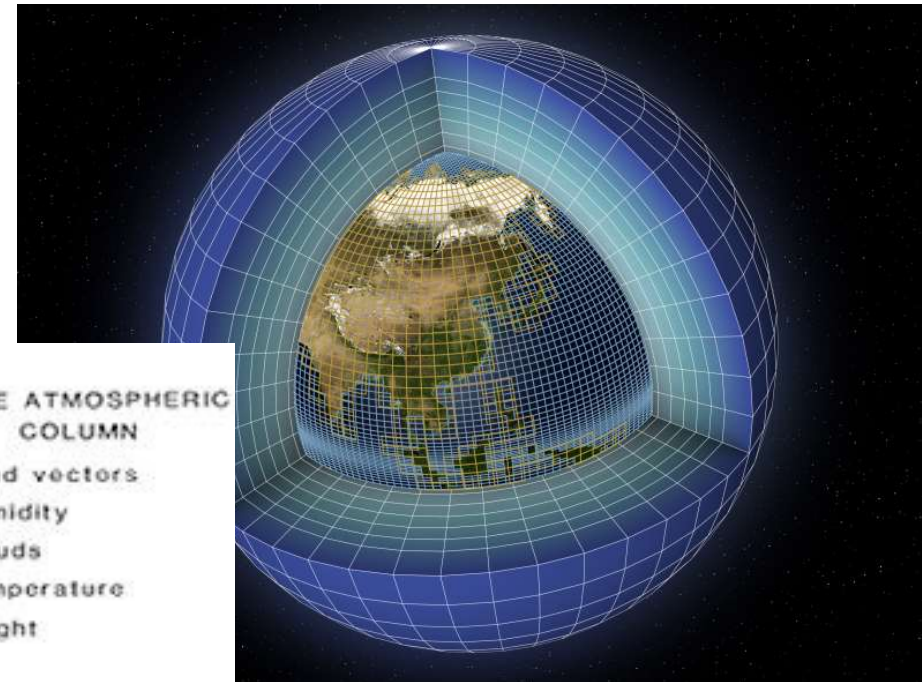
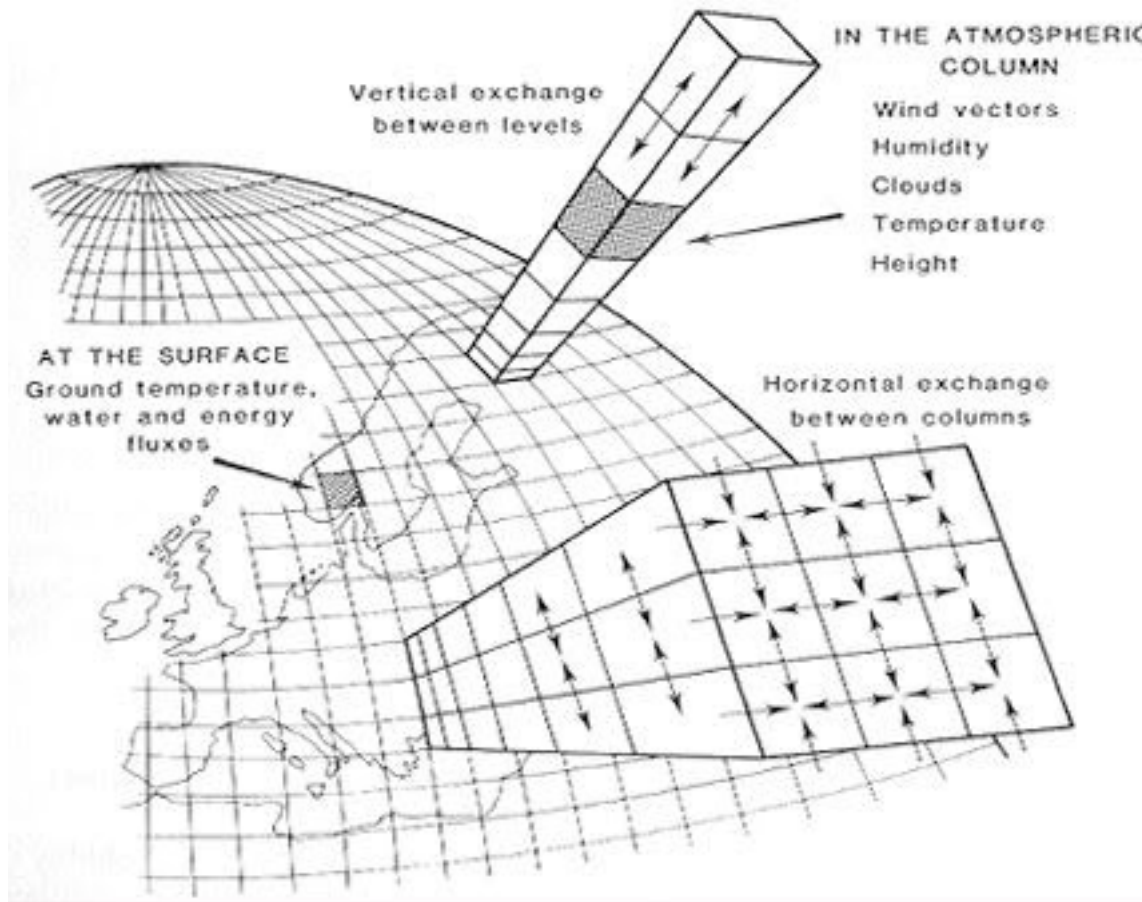
# Modéliser le Climat : Comment ?

Un modèle conceptuel du système Terre...



# Modéliser le Climat : Comment ?

Construction d'un modèle :  
Grille et mailles du modèle



# Modéliser le Climat : Comment ?

Utilisation de super-calculateurs

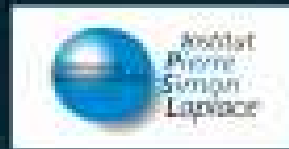


Ada - IBM

Curie - Bull



# Modéliser le Climat : Comment ?



INSTITUT PIERRE SIMON LAPLACE

LABORATOIRE DES SCIENCES  
DU CLIMAT ET DE L'ENVIRONNEMENT

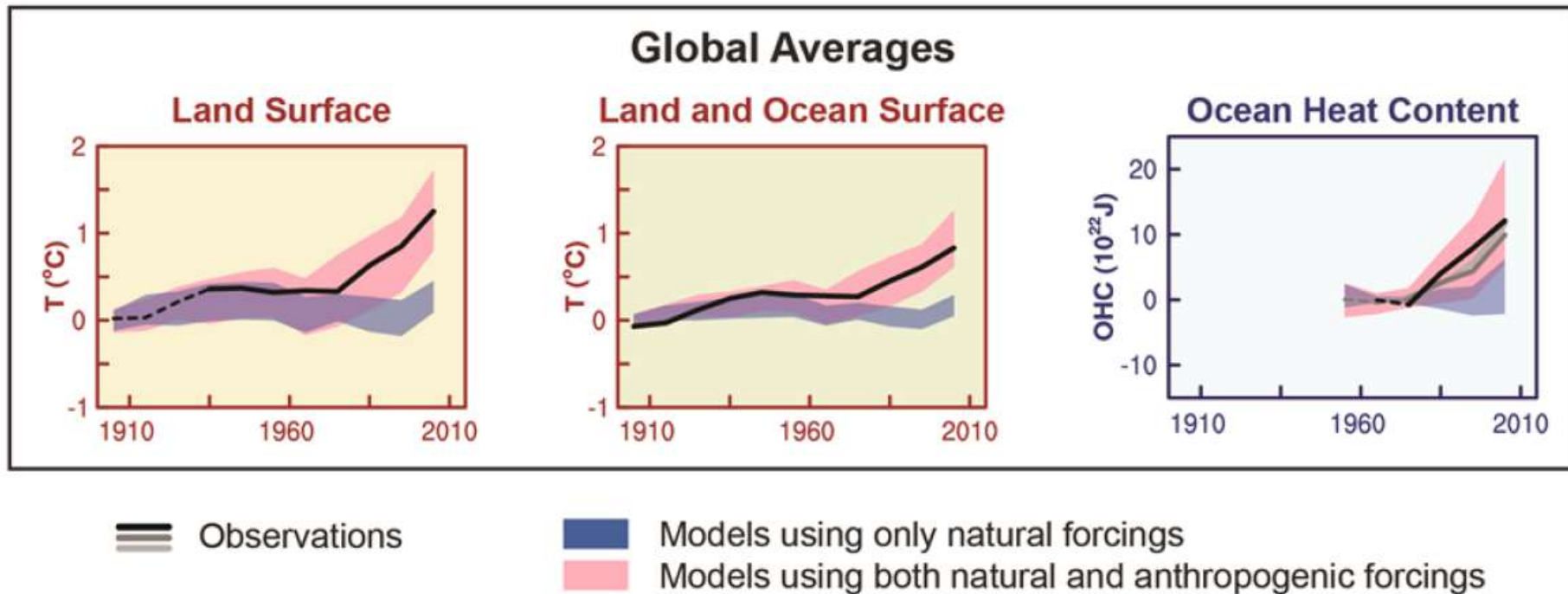
LABORATOIRE DE MÉTÉOROLOGIE DYNAMIQUE

LABORATOIRE D'Océanographie et du Climat:  
EXPÉRIMENTATION ET APPROCHES NUMÉRIQUES



DIRECTION DES SCIENCES DE LA MATIÈRE

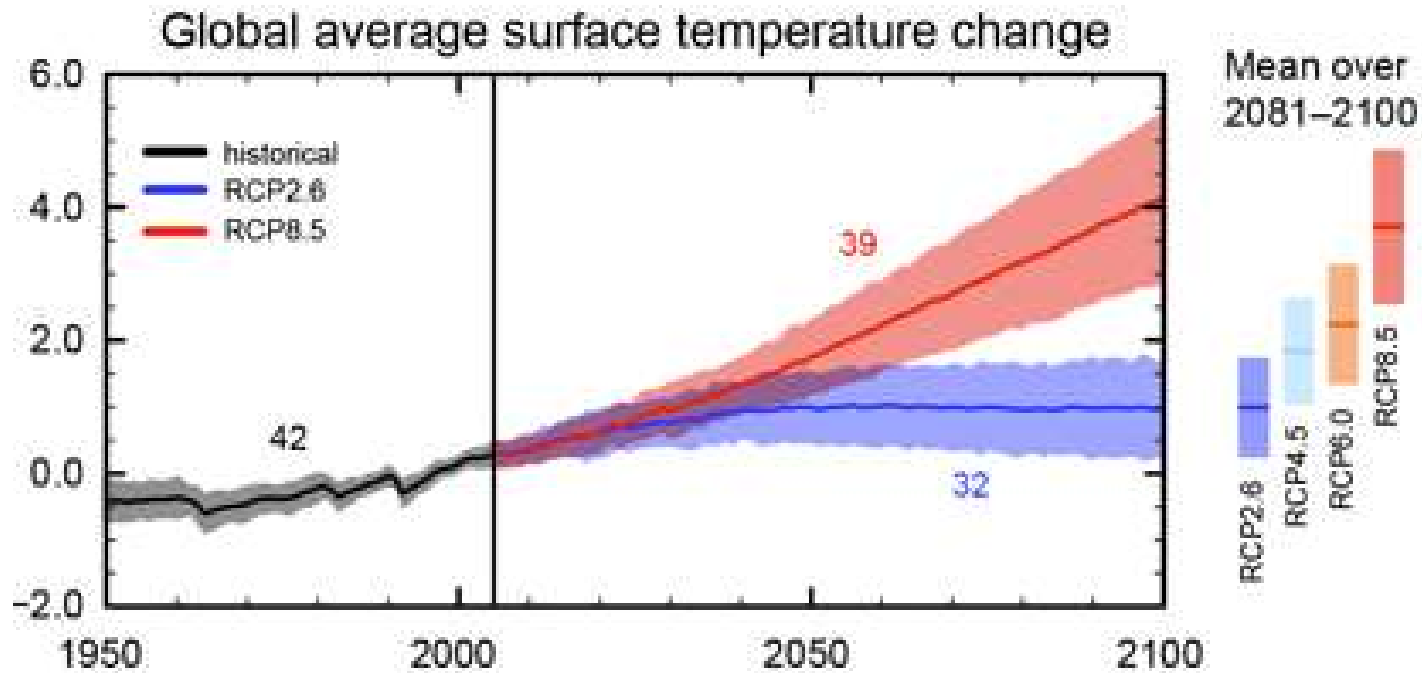
# Modéliser le Climat : Pour attribuer



Il est *extrêmement probable* que l'influence humaine a été la cause principale du réchauffement observé depuis le milieu du XX<sup>ème</sup> siècle.

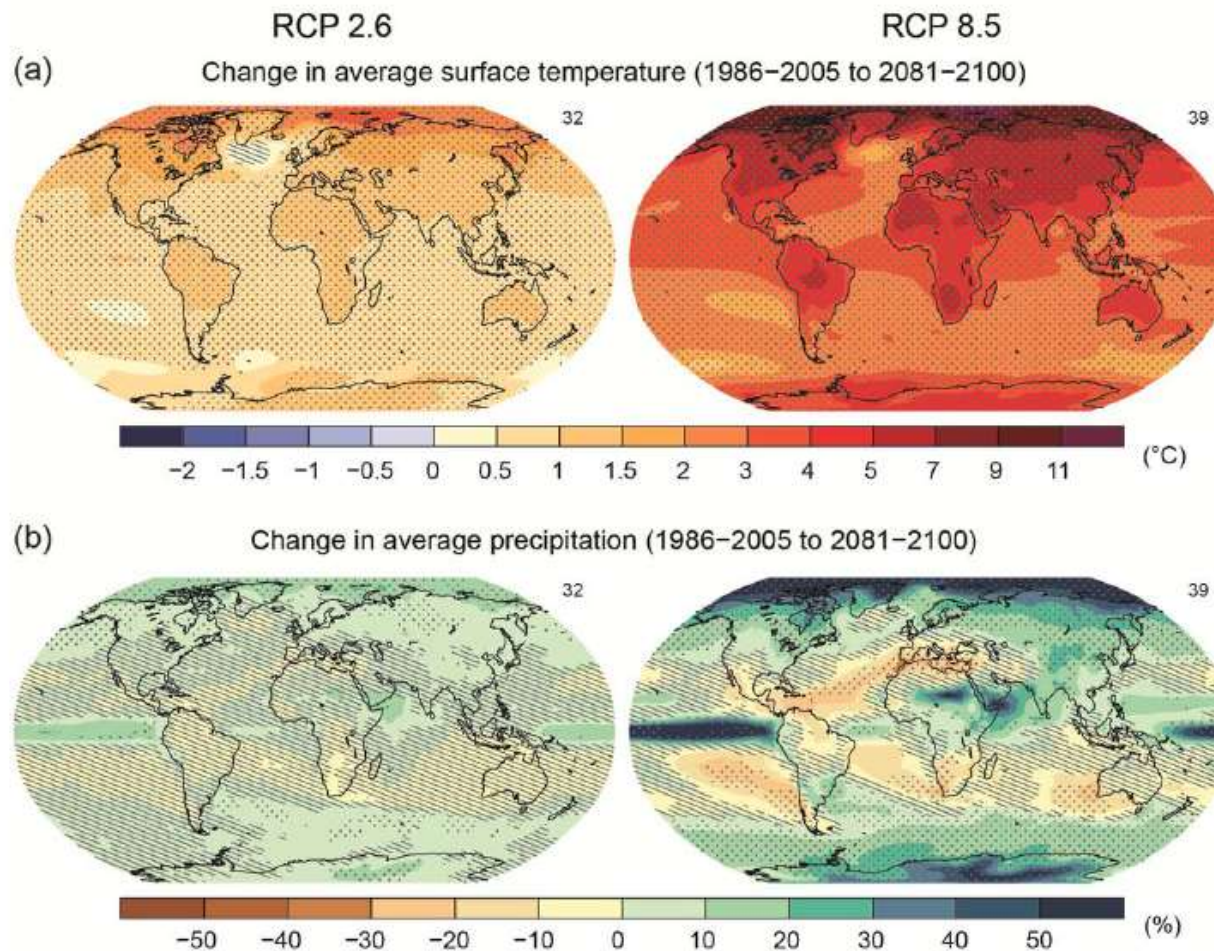
Concerne aussi le réchauffement de l'océan, les changements du cycle de l'eau, la fonte des neiges et glaces, l'élévation du niveau marin, certains extrêmes climatiques

# Modéliser le Climat : Pour projeter



Le changement de la température moyenne du globe en surface pour la fin du XXI<sup>e</sup> siècle dépassera *probablement* 1,5°C par rapport à 1850-1900 pour tous les scénarios RCP, sauf pour le scénario RCP2.6.

# Températures et Précipitations



Température

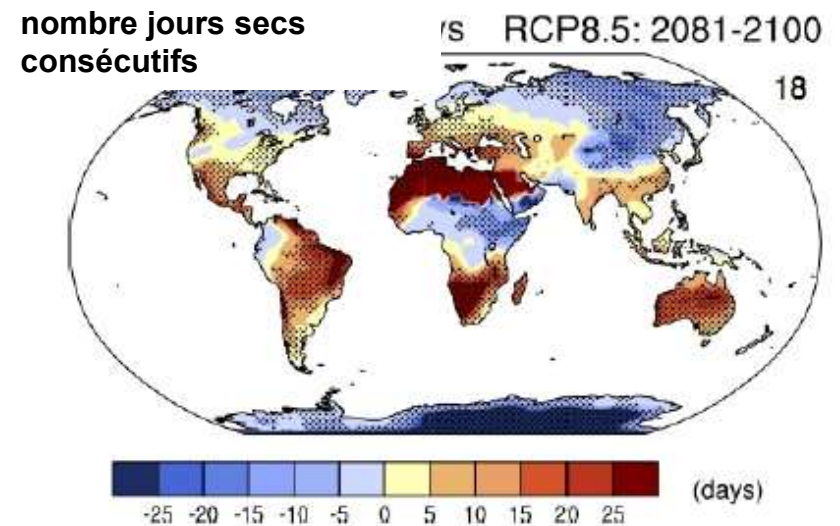
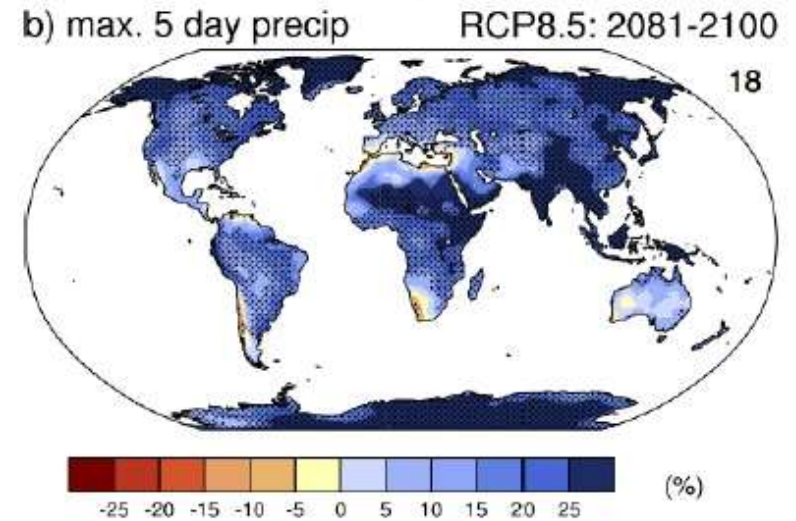
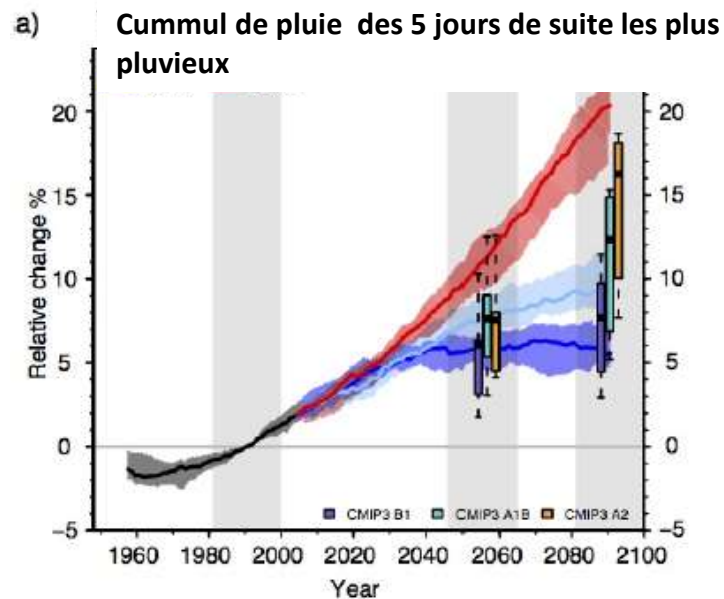
Signal/bruit élevé

Signal/bruit faible

Précipitation

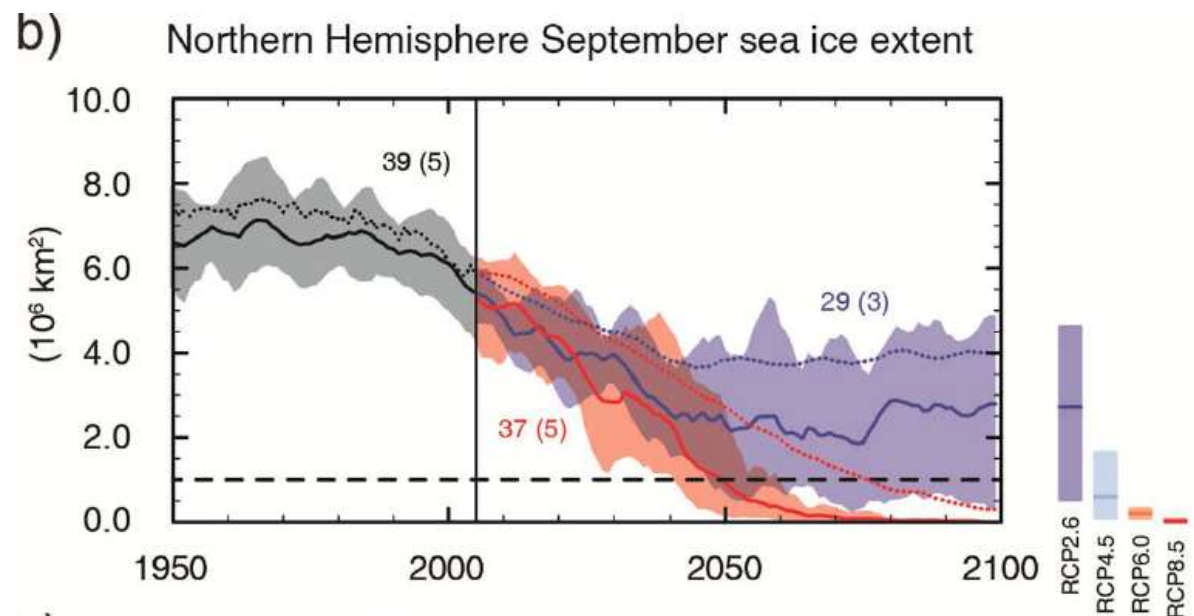
Le contraste de précipitation entre régions humides et régions sèches, et entre saisons humides et saisons sèches augmentera, bien qu'il puisse exister des exceptions régionales.

# Évènements Extrêmes

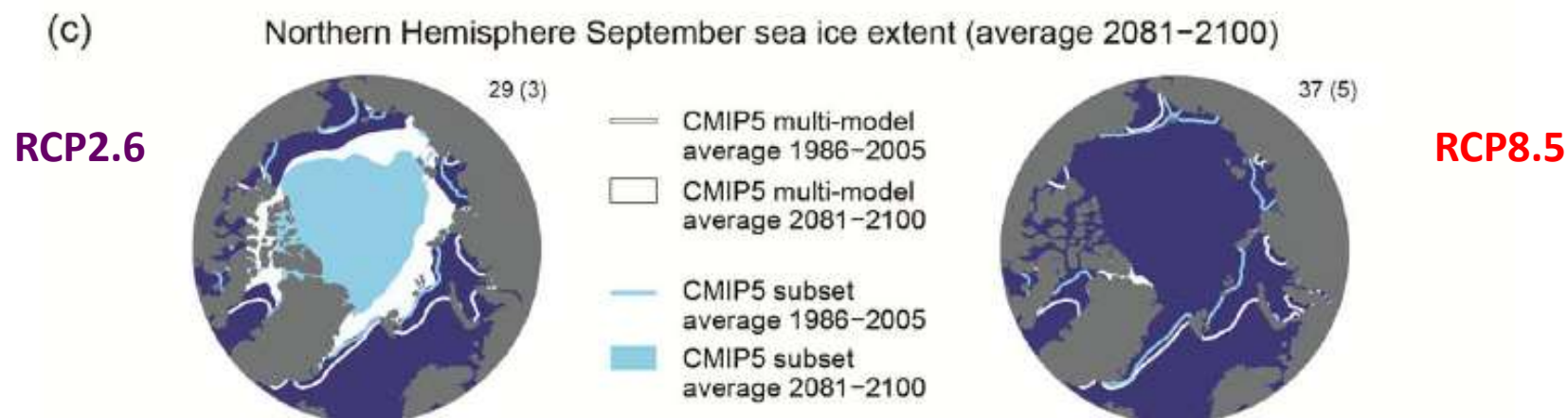


Les événements de précipitations extrêmes deviendront très probablement plus intenses et fréquents sur les continents des moyennes latitudes et les régions tropicales humides d'ici la fin de ce siècle.

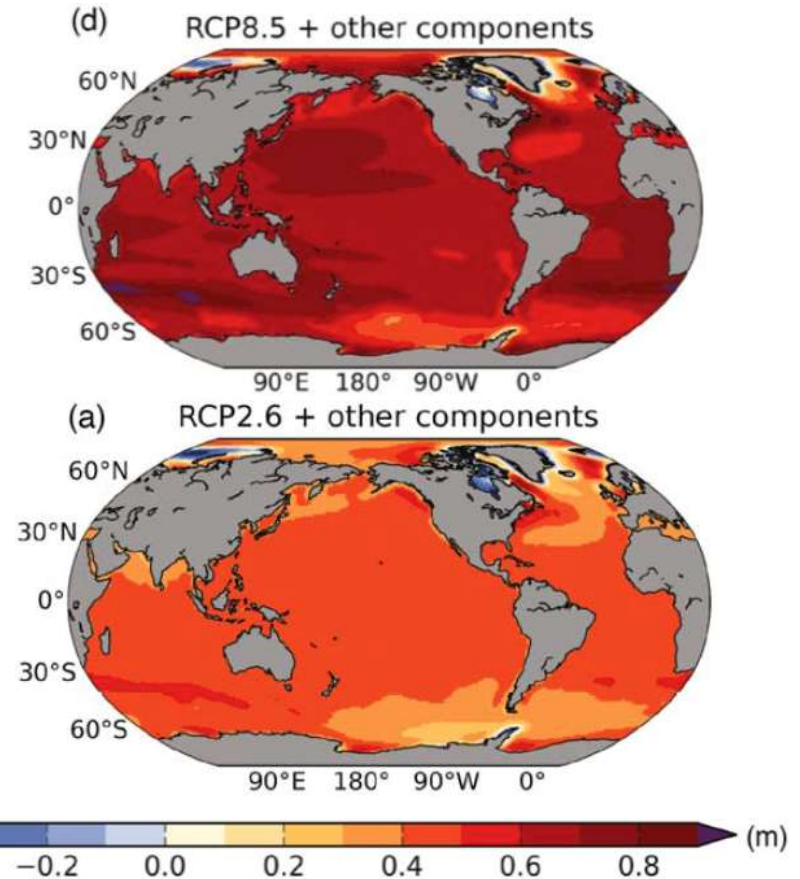
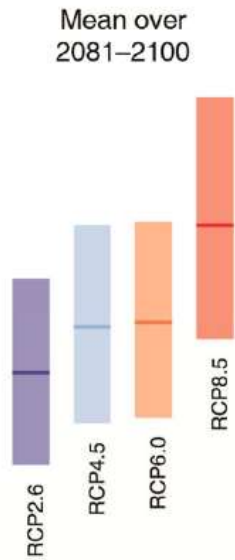
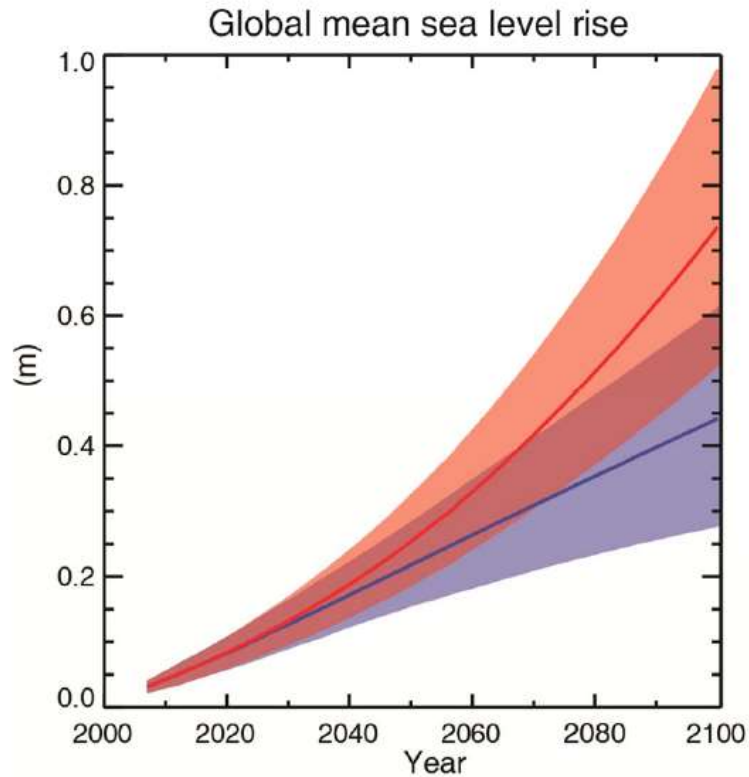
# La banquise Arctique



Un océan Arctique pratiquement sans glace en septembre avant le milieu du siècle est *probable* d'après le scénario RCP8.5.



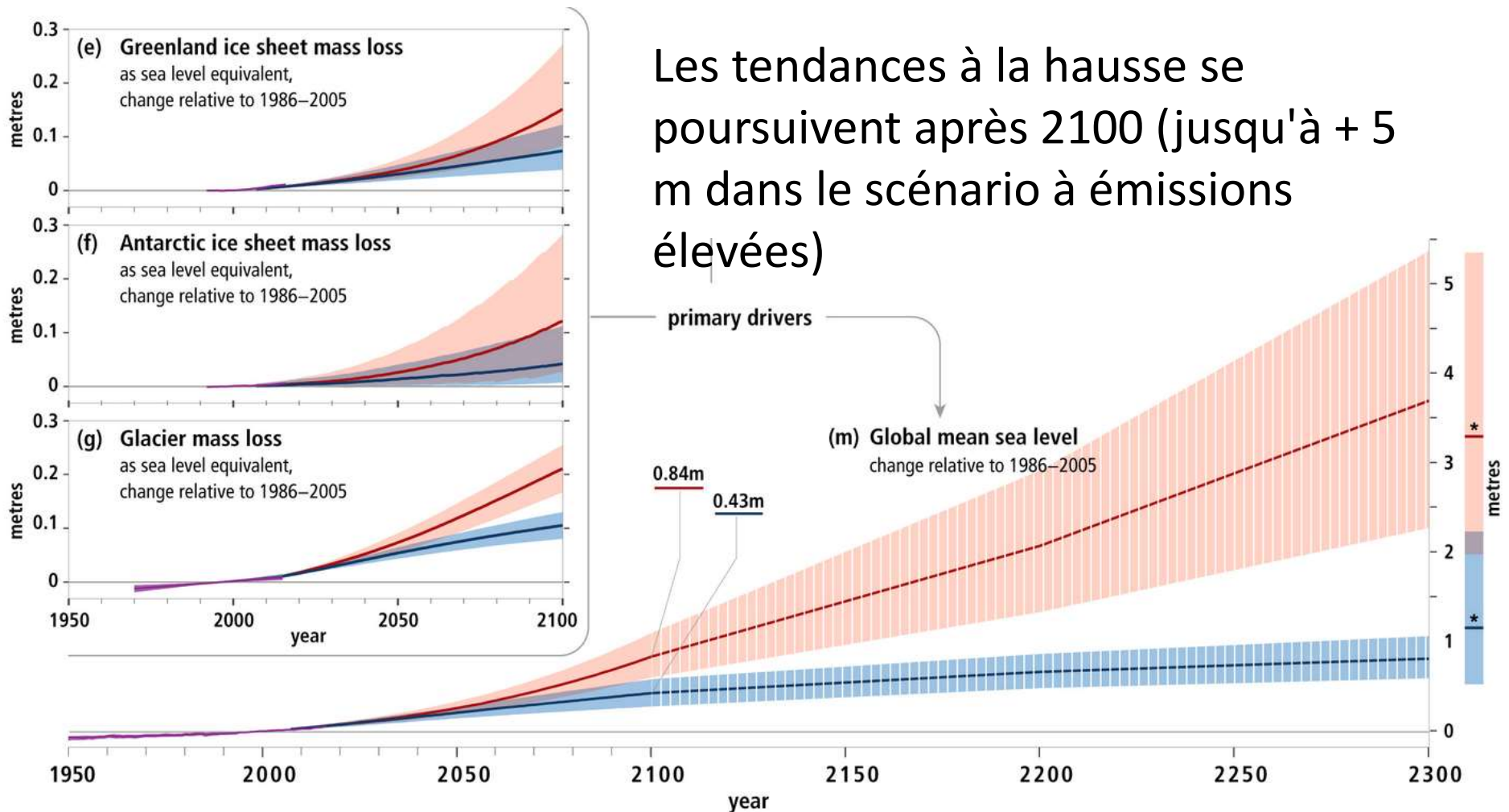
# Le niveau des mers



Le niveau moyen des mers continuera à s'élever au cours du XXI<sup>e</sup> siècle en raison du réchauffement accru des océans et de l'augmentation de la perte de masse des glaciers et des calottes glaciaires.

# Le niveau des mers – IPCC SROCC 2019

Les projections pour 2100 ont été revues à la hausse (jusqu'à 110 cm pour le scénario à forte émission) - mais plus limitées dans un monde à «2°C».

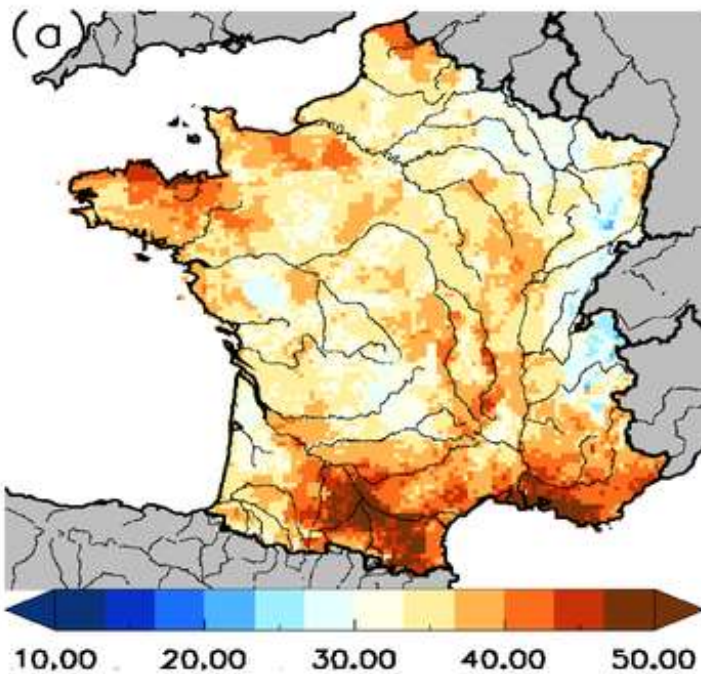


Les tendances à la hausse se poursuivent après 2100 (jusqu'à + 5 m dans le scénario à émissions élevées)

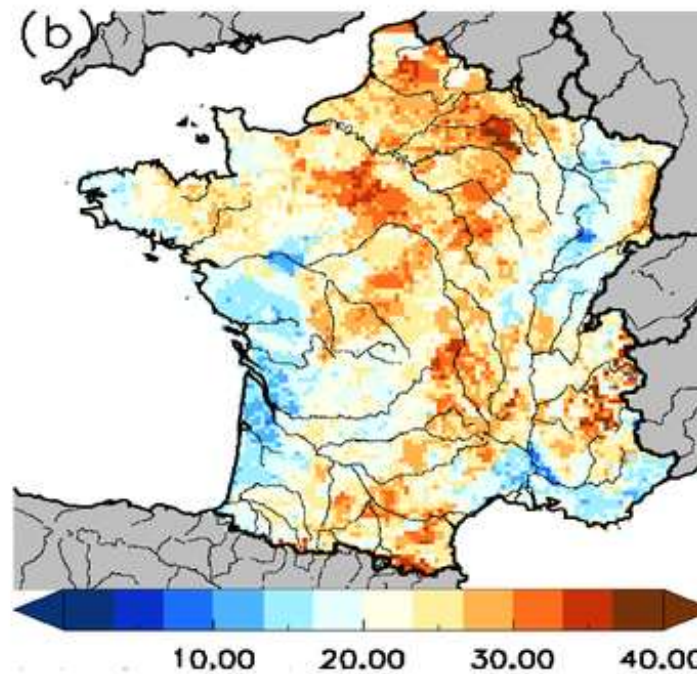
## Climate Projections: Extreme Events

Increase in frequency, intensity, duration of heat waves and droughts (IPCC Climate & Land Report, 2019)

Agricultural droughts in France in 2031-2060  
(compared to 1961-1990)



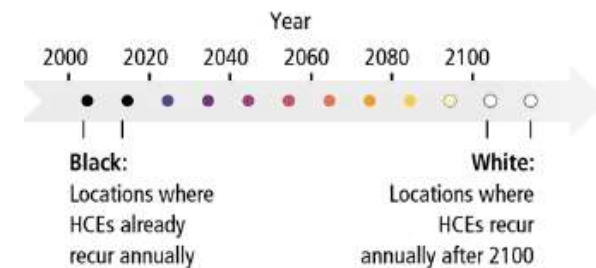
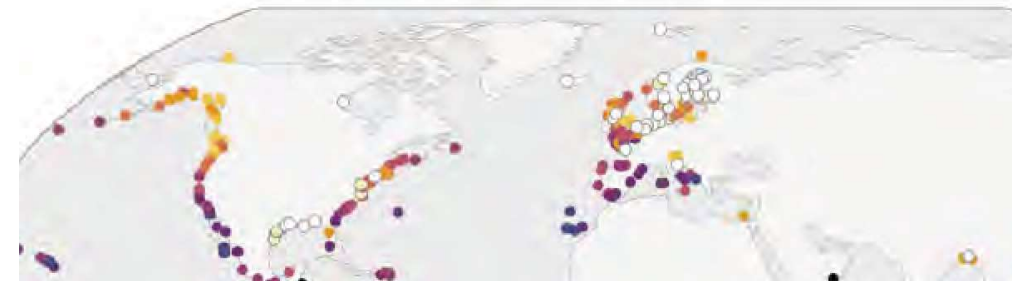
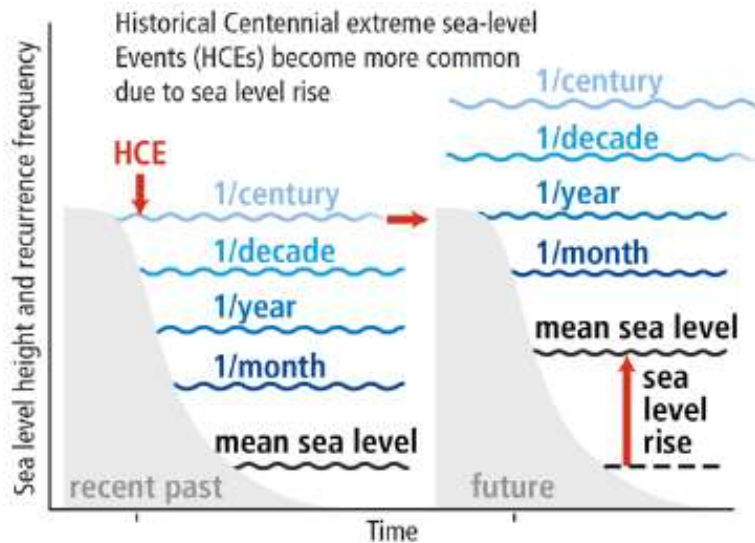
% du temps en sécheresse



Sévérité des Sécheresses

# Climate Projections: Extreme Events

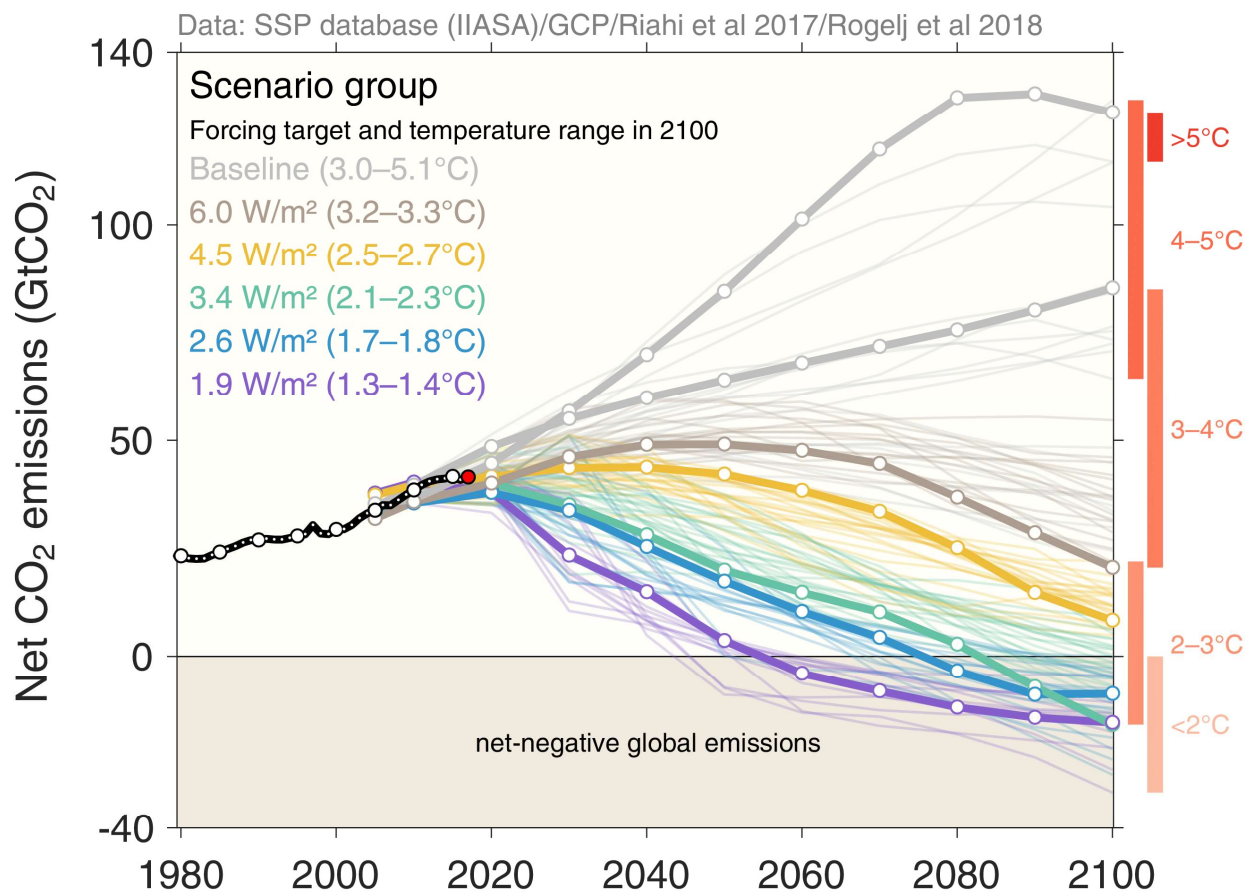
## Increased extreme events of coastal flooding (IPCC Ocean & Cryosphere Report, 2019)



... events that occurred once a century  
will occur annually by 2050 in many  
regions

# Et alors... Pour limiter le réchauffement, que faire ?

## Trajectoires d'émissions futures :



Pour garder le réchauffement global en dessous de +2°C :

Reduction des émissions de 40% à 70% en 2050 (vs. 2010)

Emissions nulles d'ici la fin du siècle



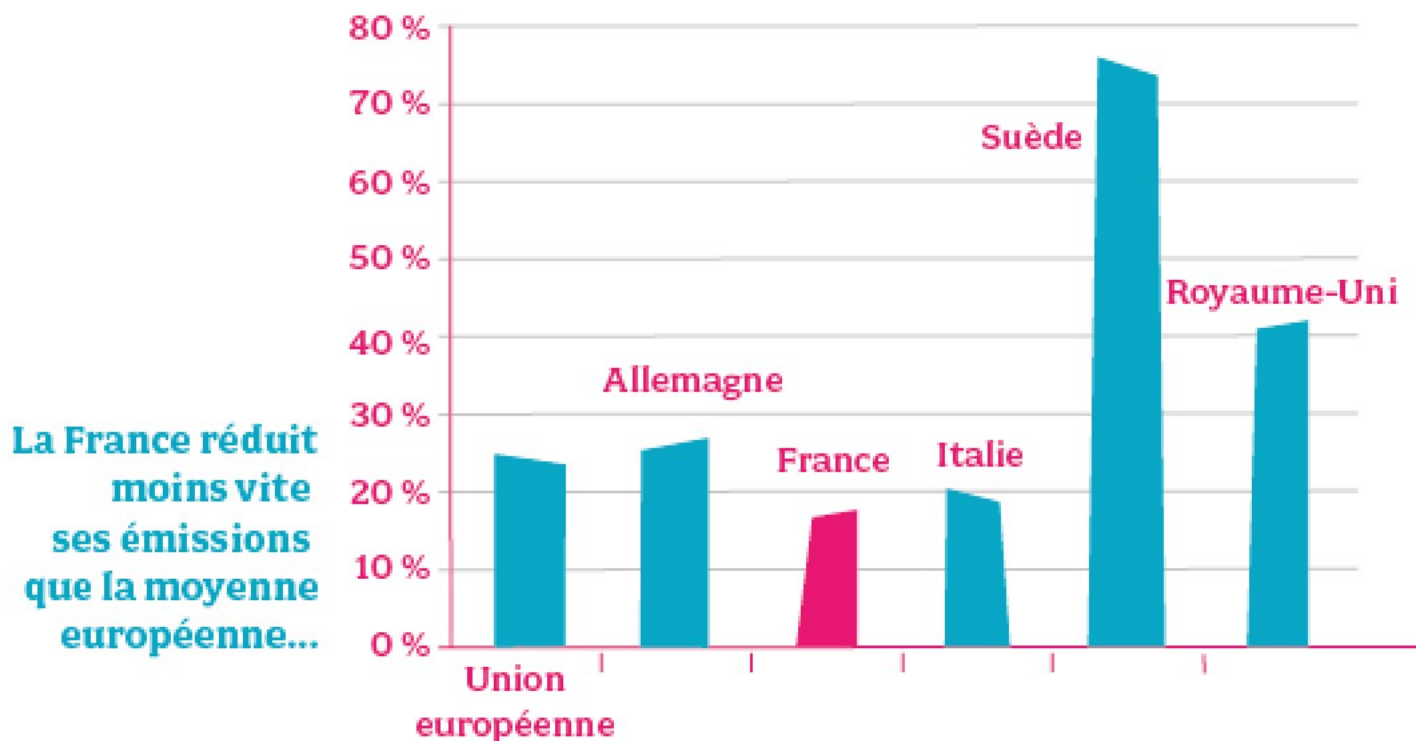
## Les émissions en France : Quel objectif ?

### **LA FRANCE VISE LA NEUTRALITÉ CARBONE EN 2050**

- Depuis 2015 et la loi de transition énergétique pour la croissance verte, le gouvernement développe une stratégie nationale « bas-carbone » (SNBC) qui fixe des objectifs précis de réduction des émissions à court et moyen terme. Elle répartit ces objectifs entre les secteurs économiques et fixe les priorités
- Les efforts français s'inscrivent dans le cadre plus large de l'Union européenne. L'U.E. s'est jusqu'à présent fixé pour objectif de réduire d'ici à 2030 de 40 % ses émissions de gaz à effet de serre par rapport à 1990.

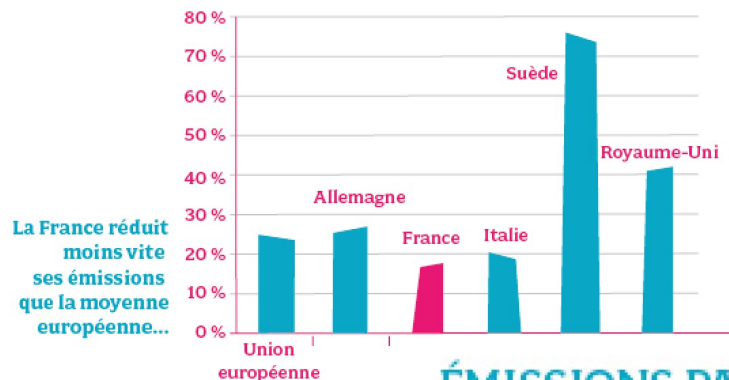
# Les émissions en France : quelle évolution ? quels secteurs ?

## POURCENTAGE DE RÉDUCTION DES ÉMISSIONS DE GAZ À EFFET DE SERRE ENTRE 1990 ET 2017



# Les émissions en France : quelle évolution ? quels secteurs ?

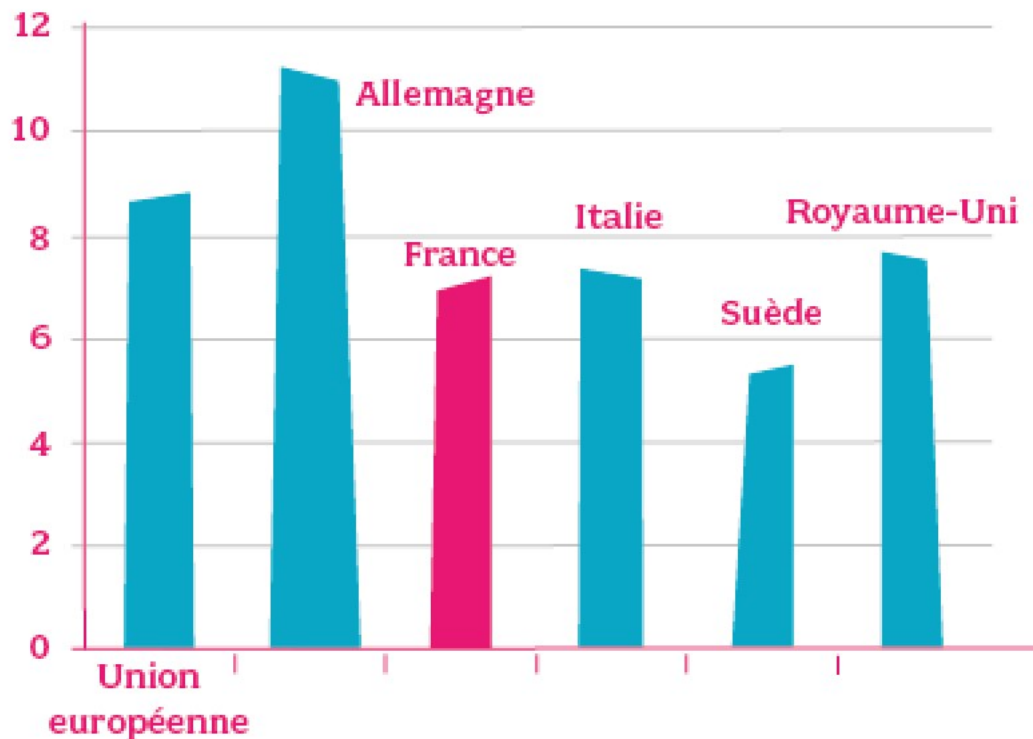
POURCENTAGE DE RÉDUCTION DES ÉMISSIONS DE GAZ À EFFET DE SERRE ENTRE 1990 ET 2017



HAUT CONSEIL  
pour le CLIMAT

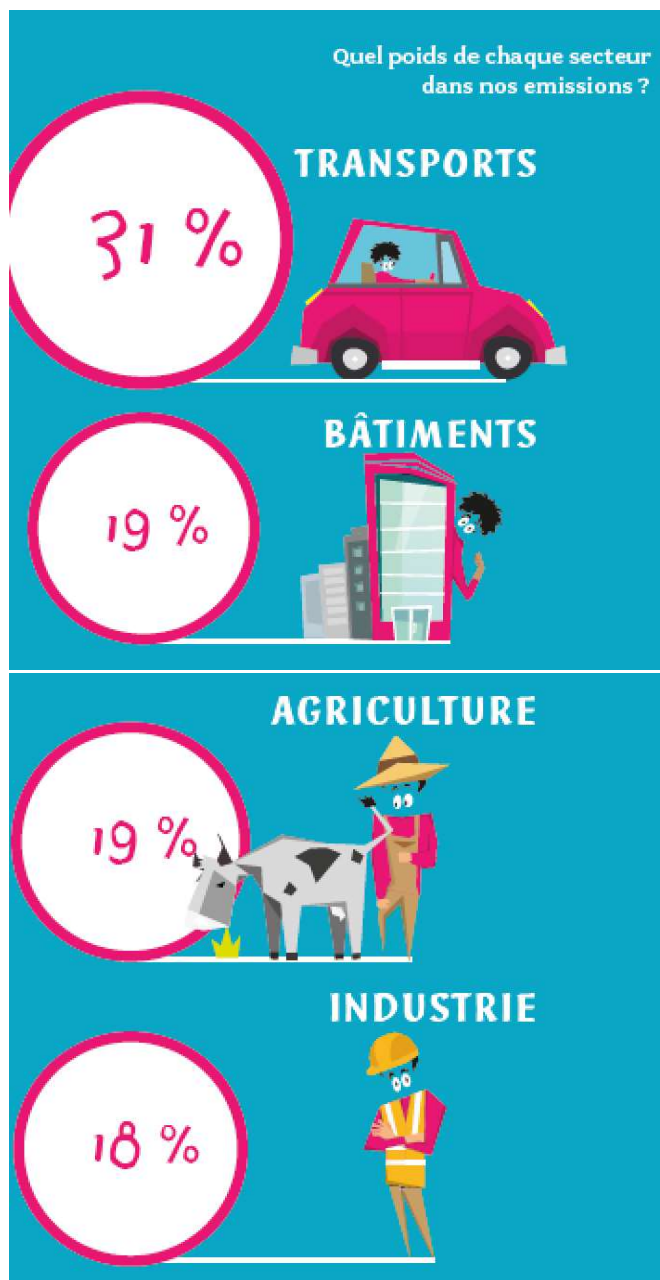
ÉMISSIONS PAR HABITANT (HORS IMPORTATIONS) EN TONNES DE CO<sub>2</sub> ÉQUIVALENT POUR L'ANNÉE 2017

... mais elle conserve des émissions par habitant inférieures à la moyenne européenne

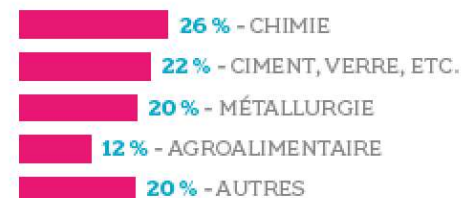
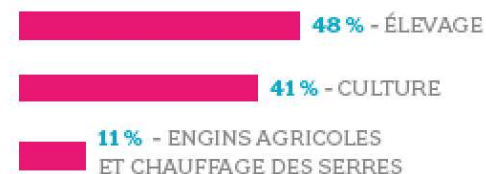
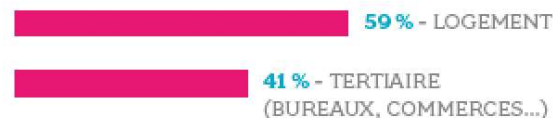
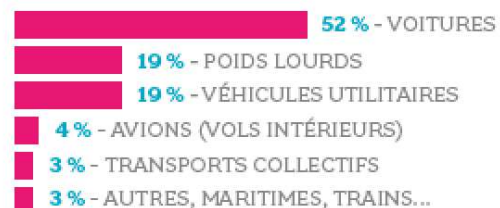


Source : Eurostat

# Les émissions en France : quelle évolution ? quels secteurs ?

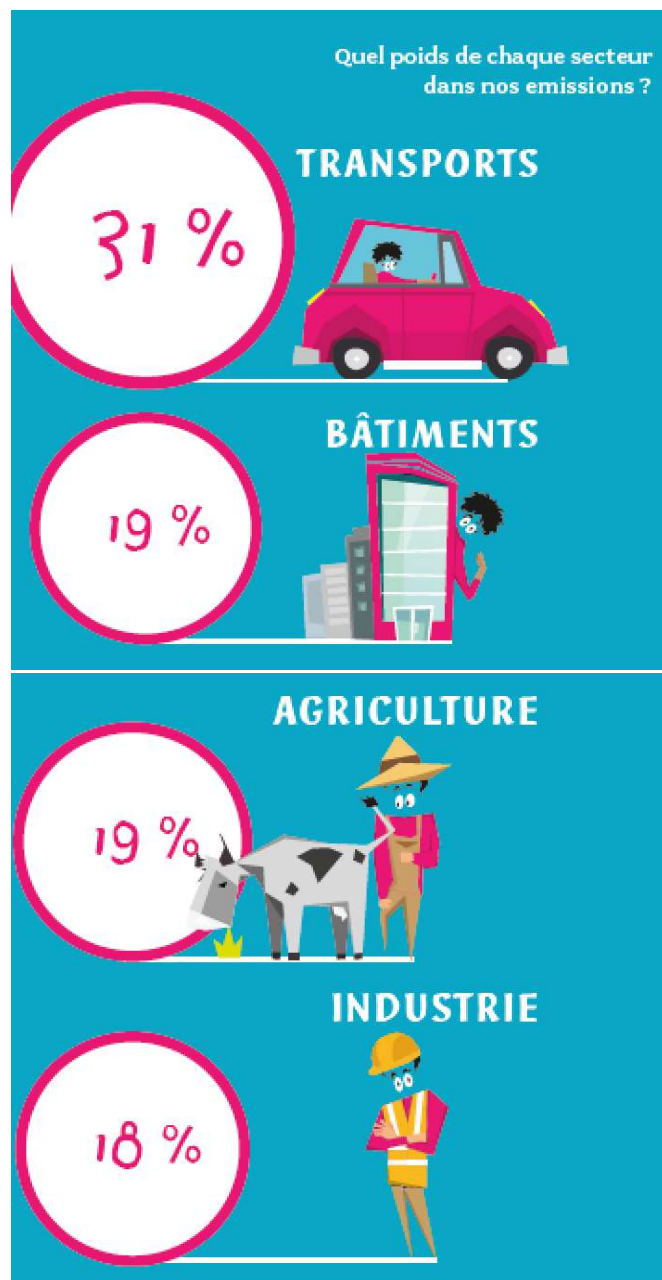


De quelles activités proviennent ces émissions ?



Mais aussi : Transformation de l'énergie, Déchets, ...  
**Et les émissions importées !**

# Les émissions en France : quelle évolution ? quels secteurs ?



## LES SECTEURS DES BÂTIMENTS ET DES TRANSPORTS ONT LES PLUS MAUVAIS RÉSULTATS

- Dans le secteur du transport, la demande en mobilité augmente, l'électrification avance mais trop lentement (seulement 2,1 % des voitures), les améliorations d'efficacité des véhicules ralentissent et la voiture personnelle reste le mode de transport prédominant avec une augmentation du nombre de voitures lourdes et qui consomment davantage.
- Dans le secteur du bâtiment, de nombreuses rénovations énergétiques sont faites mais leurs performances sont insuffisantes. Le chauffage au fioul domestique est encore trop répandu.

## LES INVESTISSEMENTS RÉALISÉS DE 2015 À 2018 NE SONT PAS EN LIGNE AVEC LES OBJECTIFS DE RÉDUCTION DES ÉMISSIONS DE GAZ À EFFET DE SERRE

Pouvoirs publics, entreprises et citoyens n'investissent pas assez dans les équipements et infrastructures nécessaires à la neutralité carbone et dépensent trop dans les équipements qui émettent beaucoup de gaz à effet de serre.