

Conseil Scientifique - Agence Adour-Garonne
Etat de la planète en 2020,
Quid des décennies futures?

Christophe CASSOU

Directeur de Recherche au CNRS,
Auteur du 6^{ème} rapport du GIEC 2021-2022,
CERFACS, Université de Toulouse

cassou@cerfacs.fr



[@cassouman40](https://twitter.com/cassouman40)

0. Avant-Propos

Des faits et non des croyances [enjeux démocratiques]

- « Le changement climatique » n'est **pas** une croyance ou une opinion : c'est une réalité basée sur des **faits** établis via les **méthodes scientifiques traditionnelles**:
 - **Observations** de variations climatiques à partir de sources multiples (indicateurs directs – mesure-, indirects –paléoclimat-, processus, etc.)
 - **Compréhension** des changements et des mécanismes physiques (théories, modèles, etc.)
 - **Anticipation** des futurs climatiques sur la base de la compilation des connaissances

avec une évaluation claire des **incertitudes** (sources, niveaux...) dans les cadres déontologiques du « faire science » (revue par les pairs, rapports GIEC, etc.)

- « Le changement climatique » va aujourd'hui **au delà des faits scientifiques**: il est intimement lié à des choix sociétaux (politiques+économiques+technologiques mais aussi éthiques+justice, etc.) et des transitions vers des développements durables/résilients mais surtout des « futurs désirables »
- « Le changement climatique » est un défi **urgent** qu'il faut relever **ici** et **maintenant** avec des actions et des stratégies claires à adopter sans délai, face à la menace maintenant évidente de **déstabilisation mondiale** des sociétés futures: les enjeux sont de nature **démocratique**.

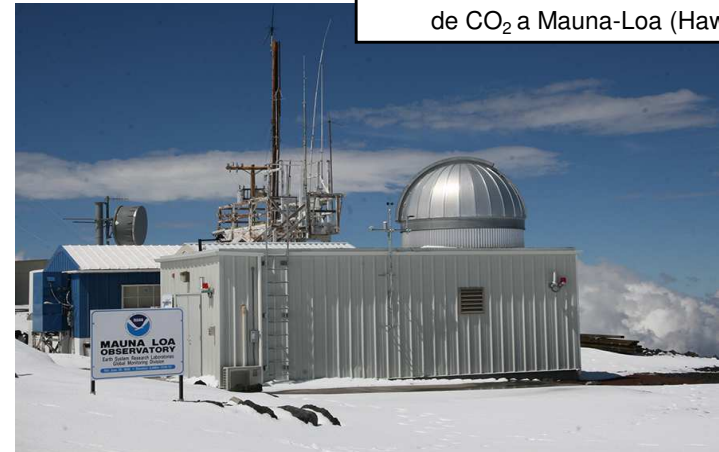
1. Etat du climat en 2020

Concentration de CO₂ observée il y a 10 jours (7 Sept)

Latest CO₂ reading: **411.43 ppm**

September 07, 2020

Carbon dioxide concentration at Mauna Loa Observatory



Mesure directe de la concentration de CO₂ a Mauna-Loa (Hawaii -US)

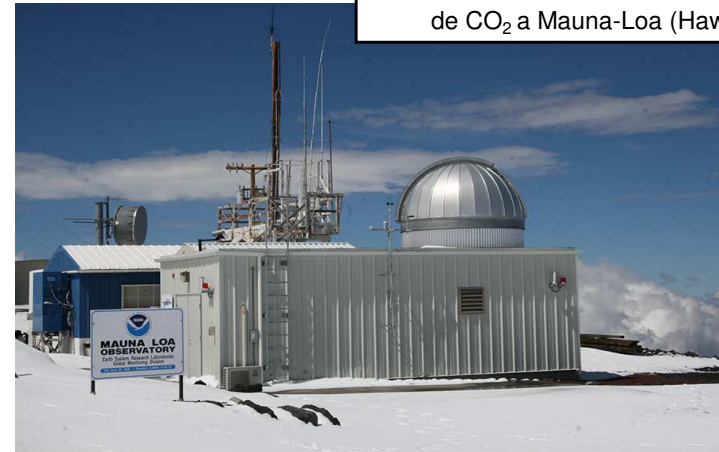
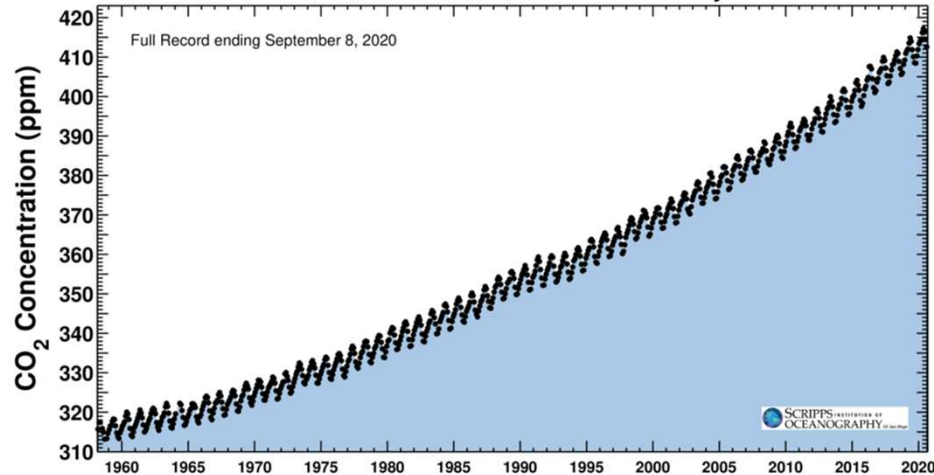
1. Etat du climat en 2020

Concentration de CO₂ depuis 1958

Latest CO₂ reading: **411.43 ppm**

September 07, 2020

Carbon dioxide concentration at Mauna Loa Observatory



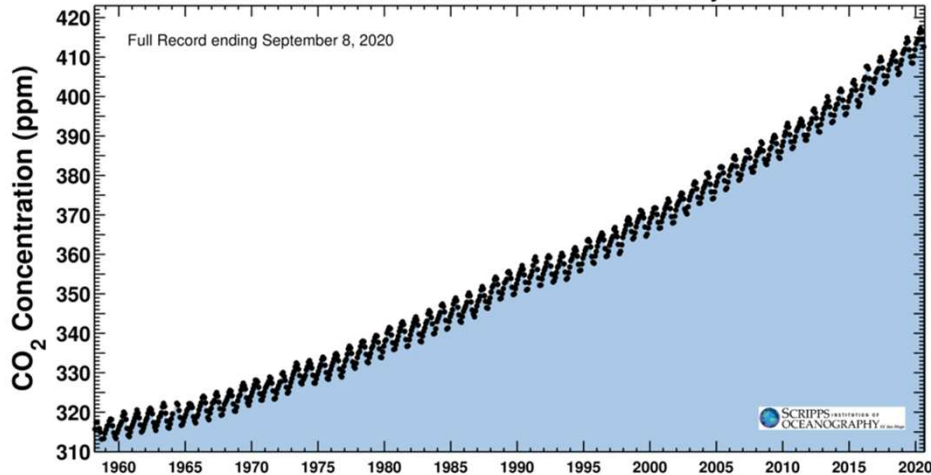
1. Etat du climat en 2020

Concentration de CO₂ depuis ...

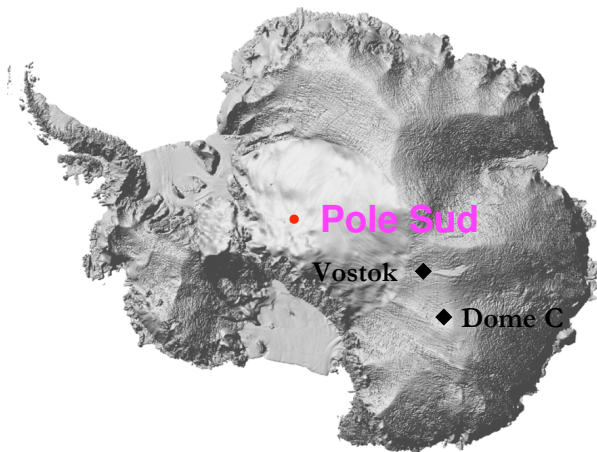
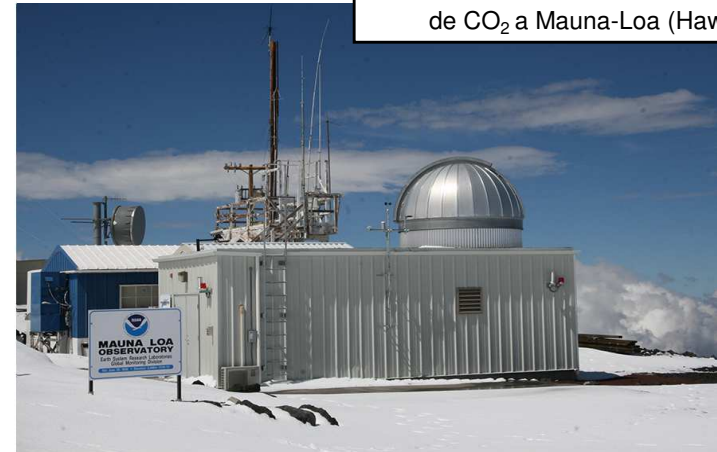
Latest CO₂ reading: **411.43 ppm**

September 07, 2020

Carbon dioxide concentration at Mauna Loa Observatory



Mesure directe de la concentration de CO₂ a Mauna-Loa (Hawaii -US)



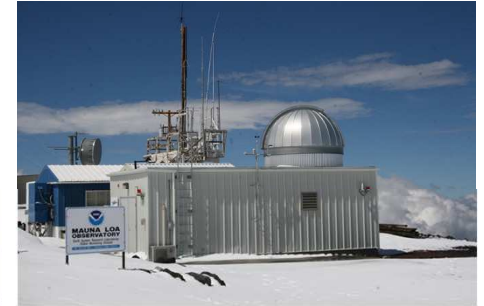
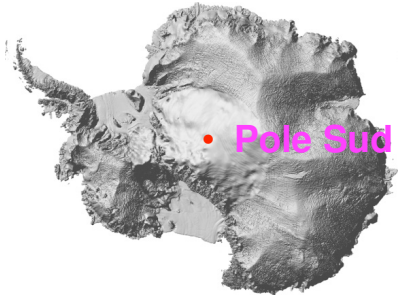
Carottage a DOME C (Antarctique)



Source des photos: CEA

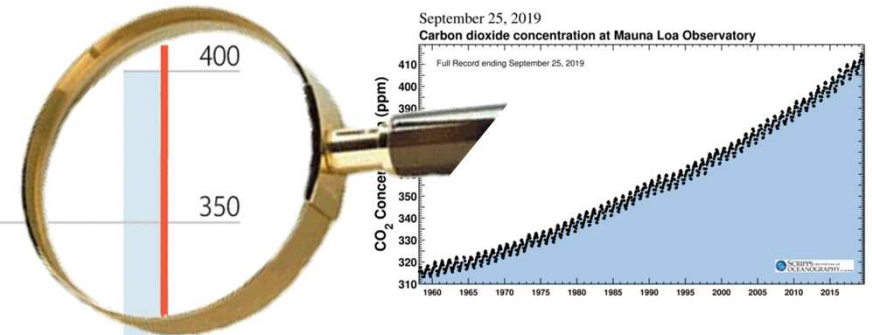
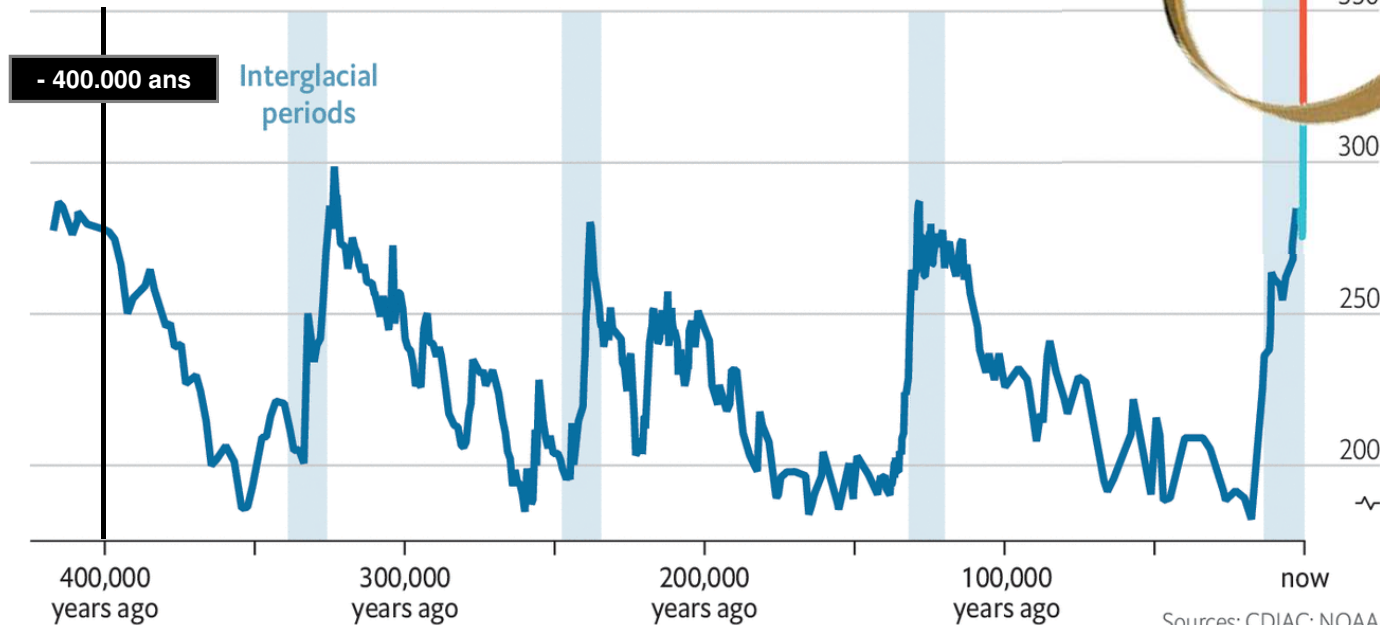
1. Etat du climat en 2020

Concentration de CO₂ depuis 400,000 ans



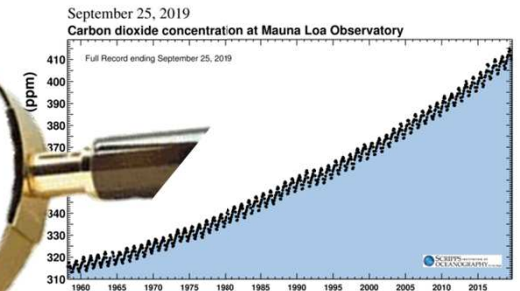
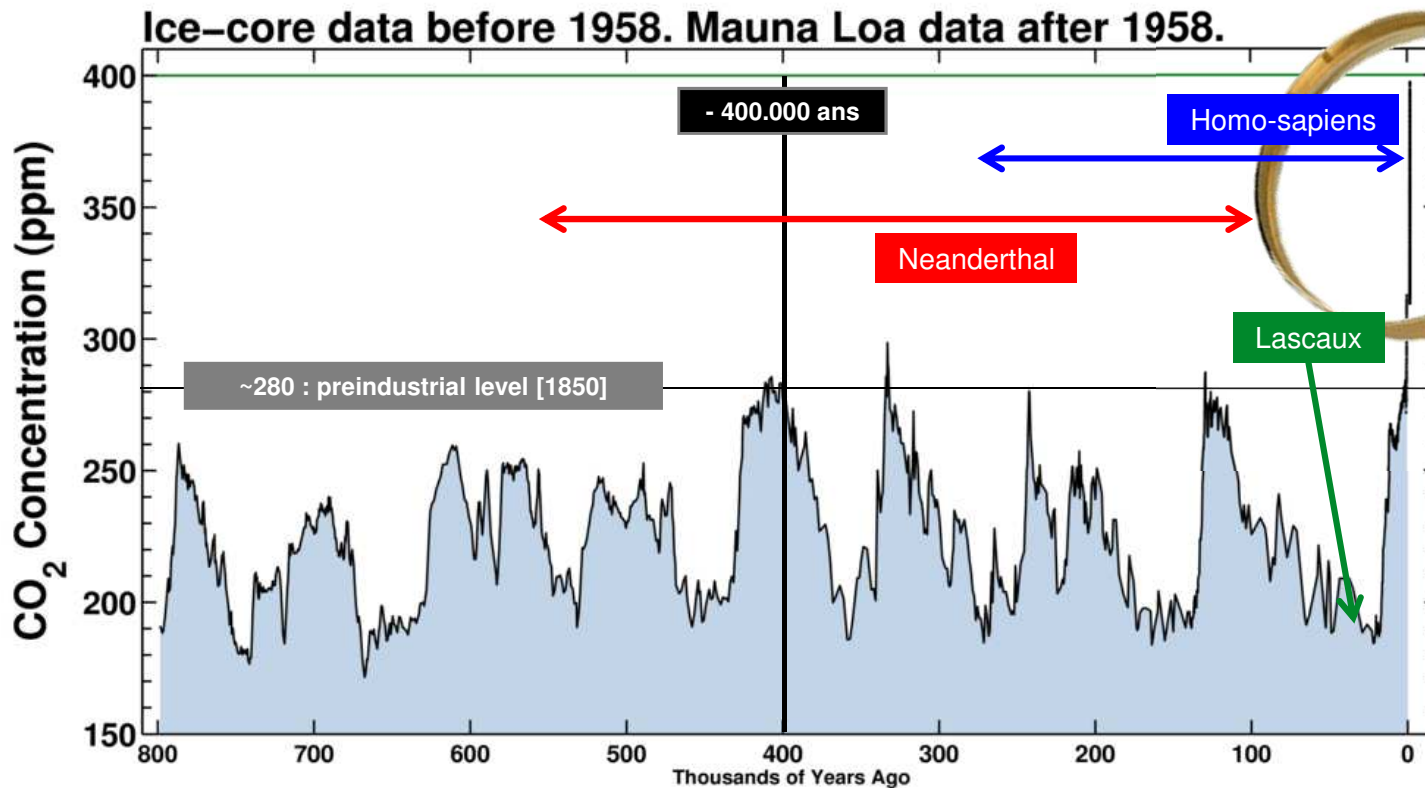
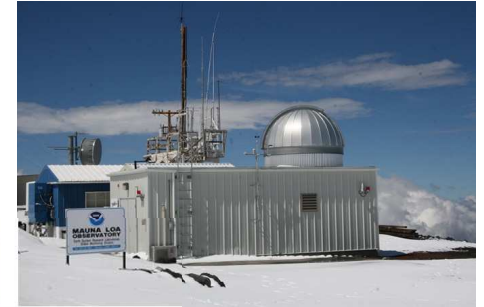
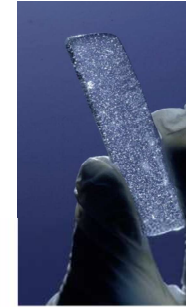
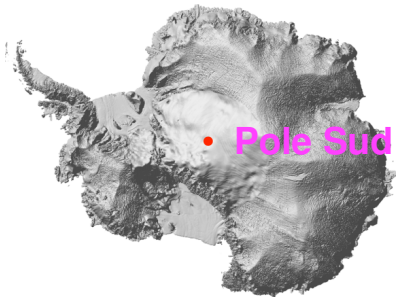
Atmospheric CO₂ levels, parts per million

Source — Vostok ice core — Law Dome ice core — Mauna Loa Observatory



1. Etat du climat en 2020

Concentration de CO₂ depuis ~1-million d'années

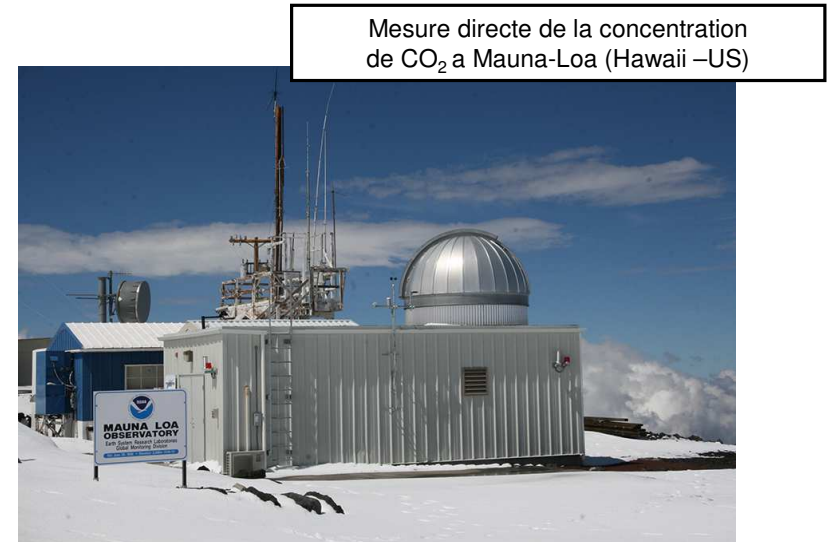
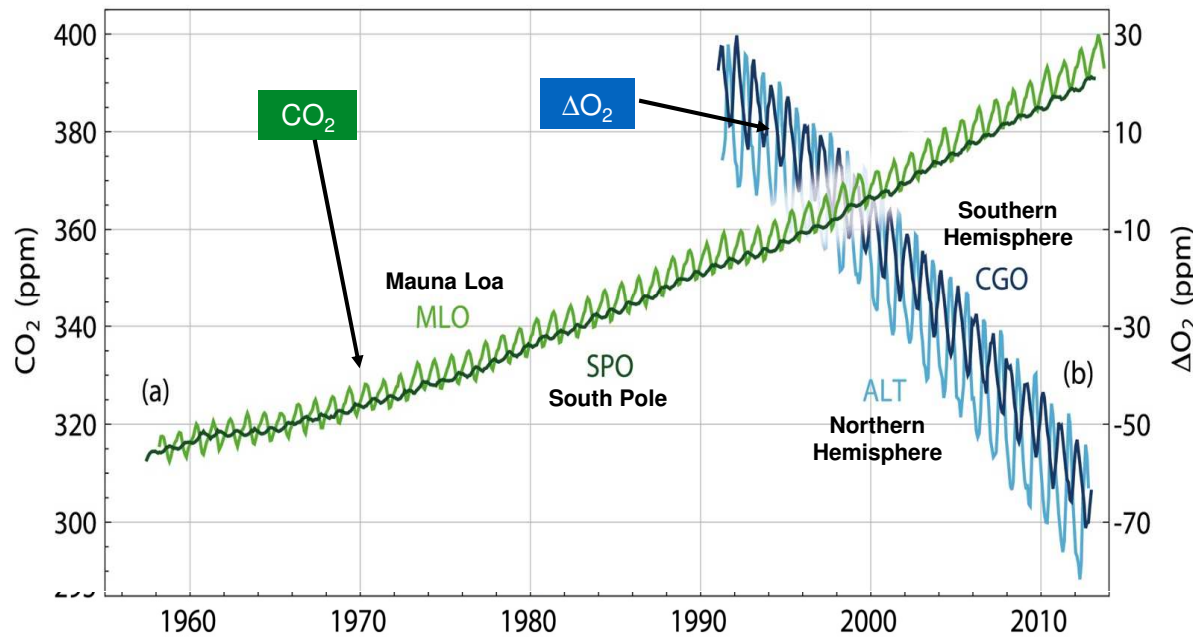


**L'expérience LIVE de
géo-ingéniering la plus
grande, rapide
et jusqu'alors
incontrôlée à l'échelle
de l'Homme**

Source: Scripps institution of oceanography

1. Etat du climat en 2020

Preuve de l'origine anthropique de l'augmentation de CO₂ atmos.



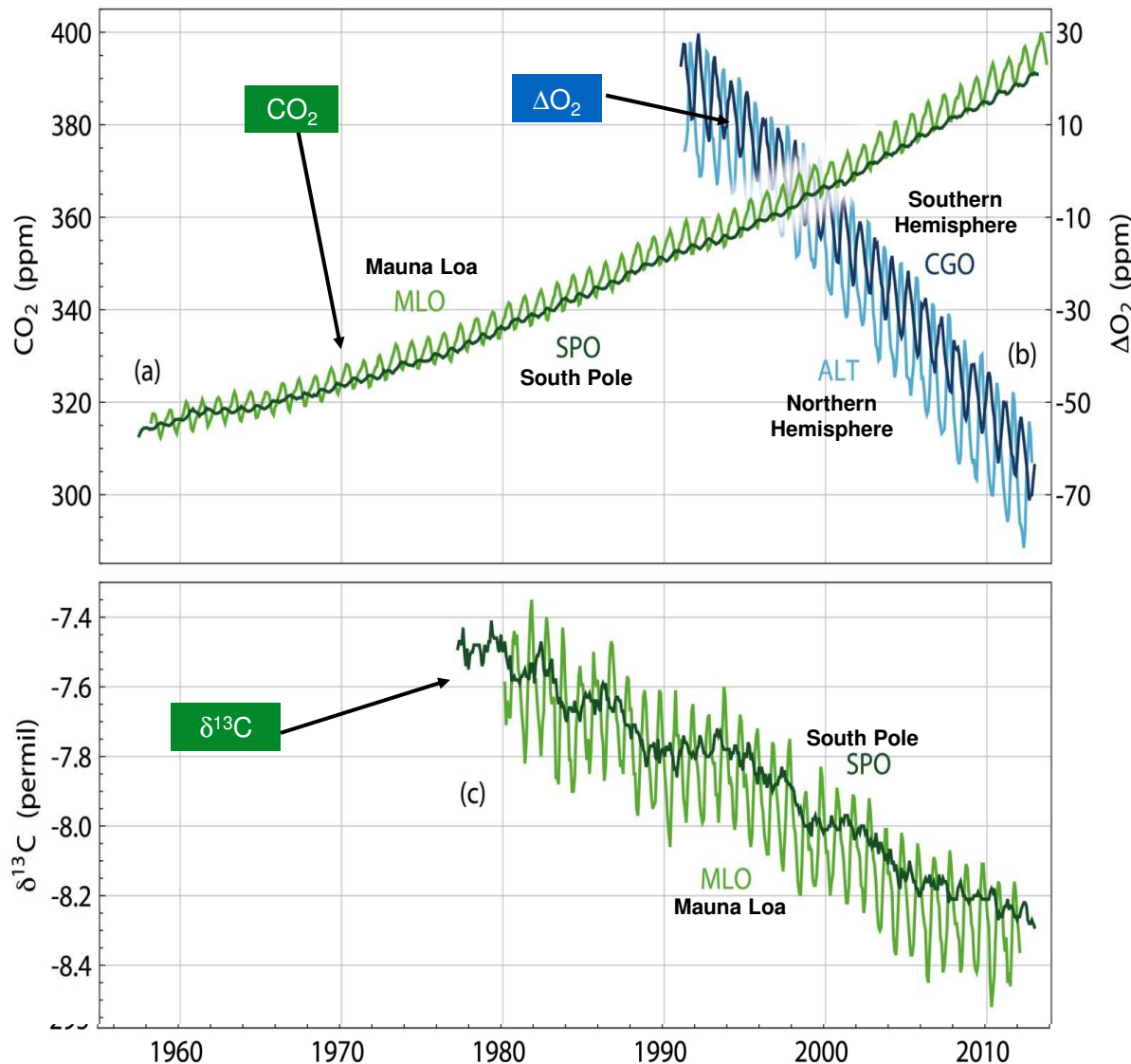
Mesure directe de la concentration de CO₂ a Mauna-Loa (Hawaii -US)

- La concentration d'O₂ diminue à un taux compatible avec la combustion des énergies fossiles

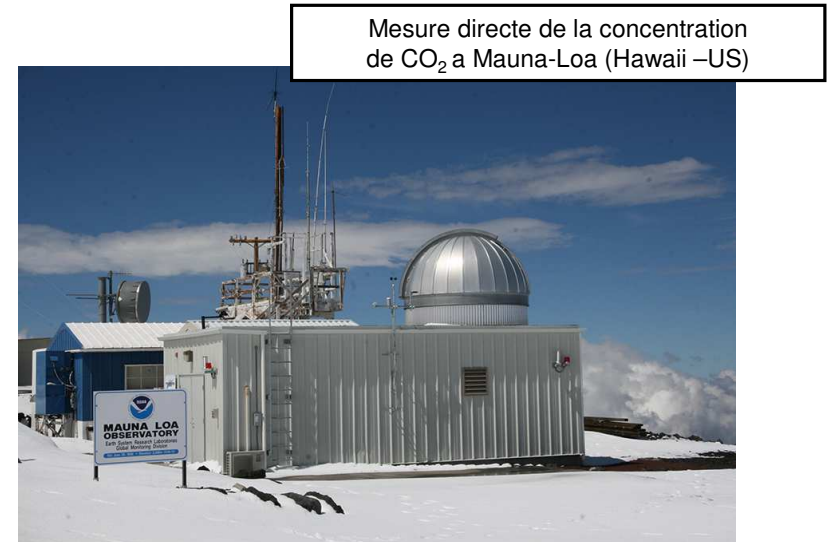
Source : IPCC-report AR5

1. Etat du climat en 2020

Preuve de l'origine anthropique de l'augmentation de CO₂ atmos.



Source : IPCC-report AR5

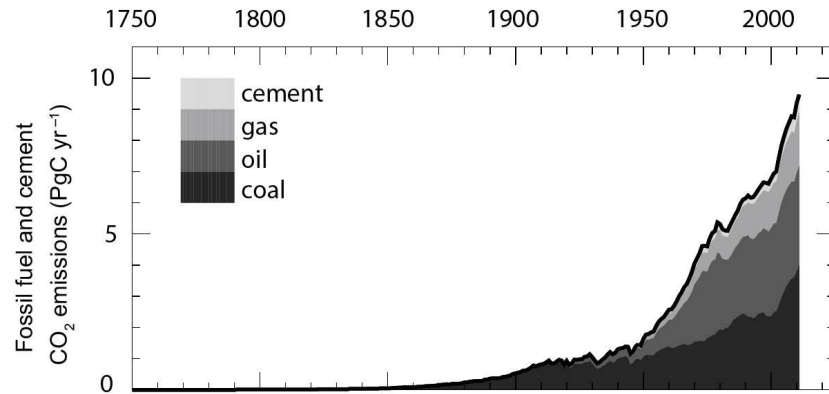


- La concentration d'O₂ diminue à un taux compatible avec la combustion des énergies fossiles

- Le rapport isotopique observé entre ¹³C et ¹²C décroît et est cohérent avec les propriétés chimiques des énergies fossiles et de leur combustion

1. Etat du climat en 2020

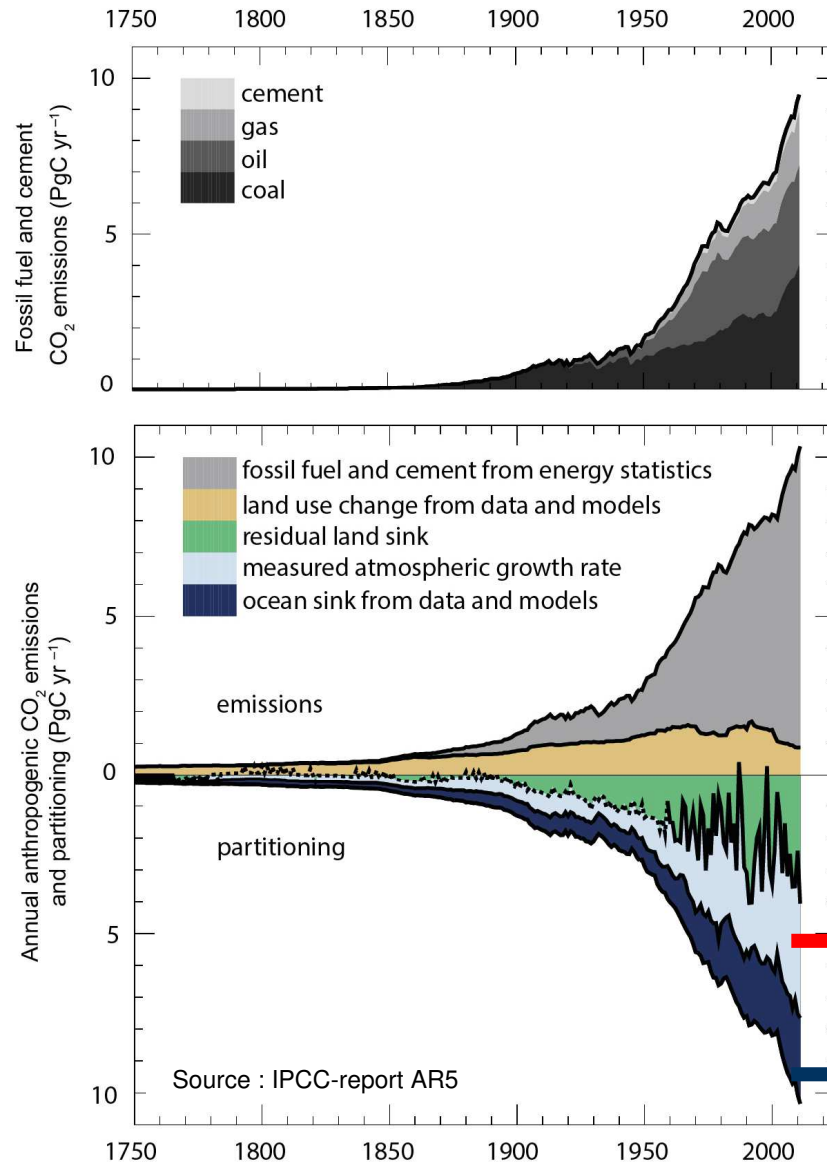
Quelles sont les sources d'émissions de CO₂?



Source : IPCC-report AR5

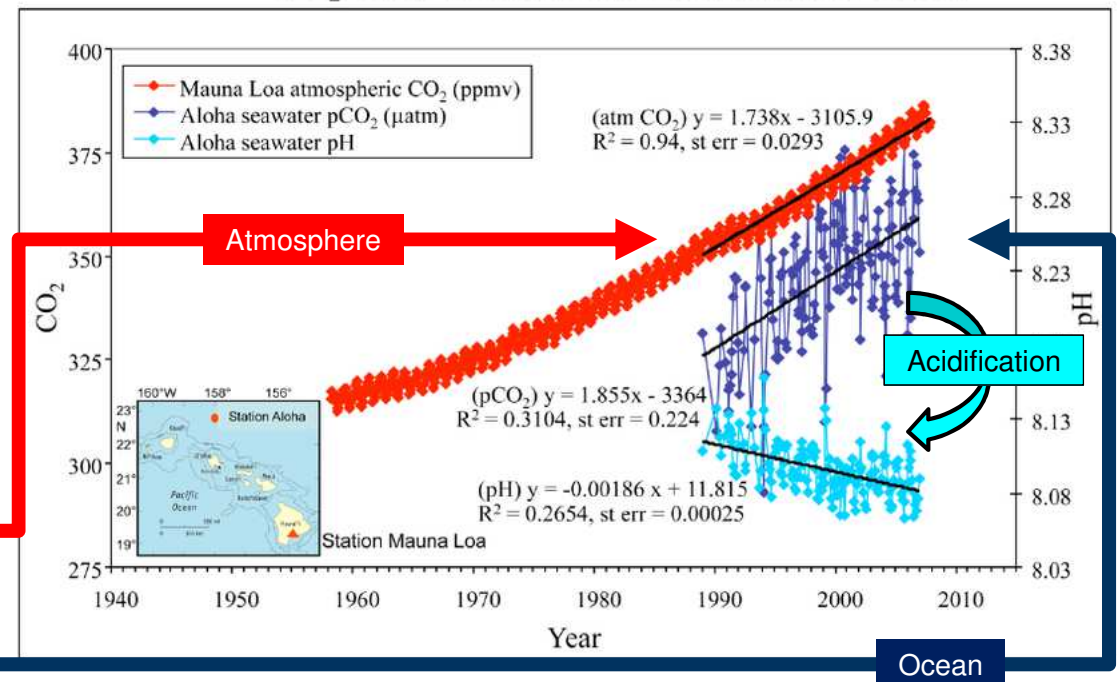
1. Etat du climat 2020

Répartition de l'excès de CO₂ dans le système climatique



Une perturbation énorme du cycle du carbone avec déjà des effets observés irréversibles (océan, etc.)

CO₂ Time Series in the North Pacific Ocean



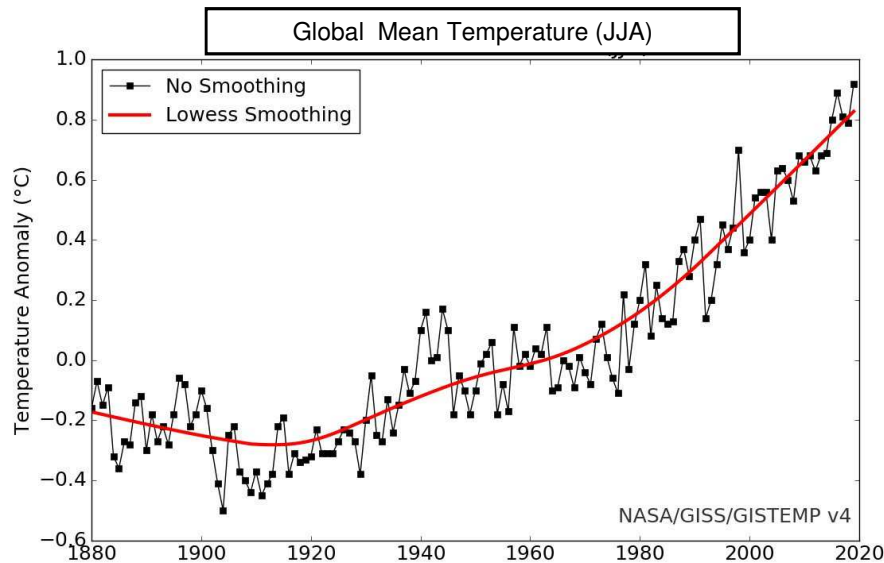
Source : data: Pieter Tans, NOAA/ESRL and David Karl, University of Hawaii (after Feely, 2008).

Conclusions

- Les émissions de CO₂ d'origine anthropique sont responsables de changements **sans précédents** et **irréversibles** dans le cycle du carbone aux échelles de temps géologiques et dans **toutes** les composantes du système climatique

1. Etat du climat en 2020

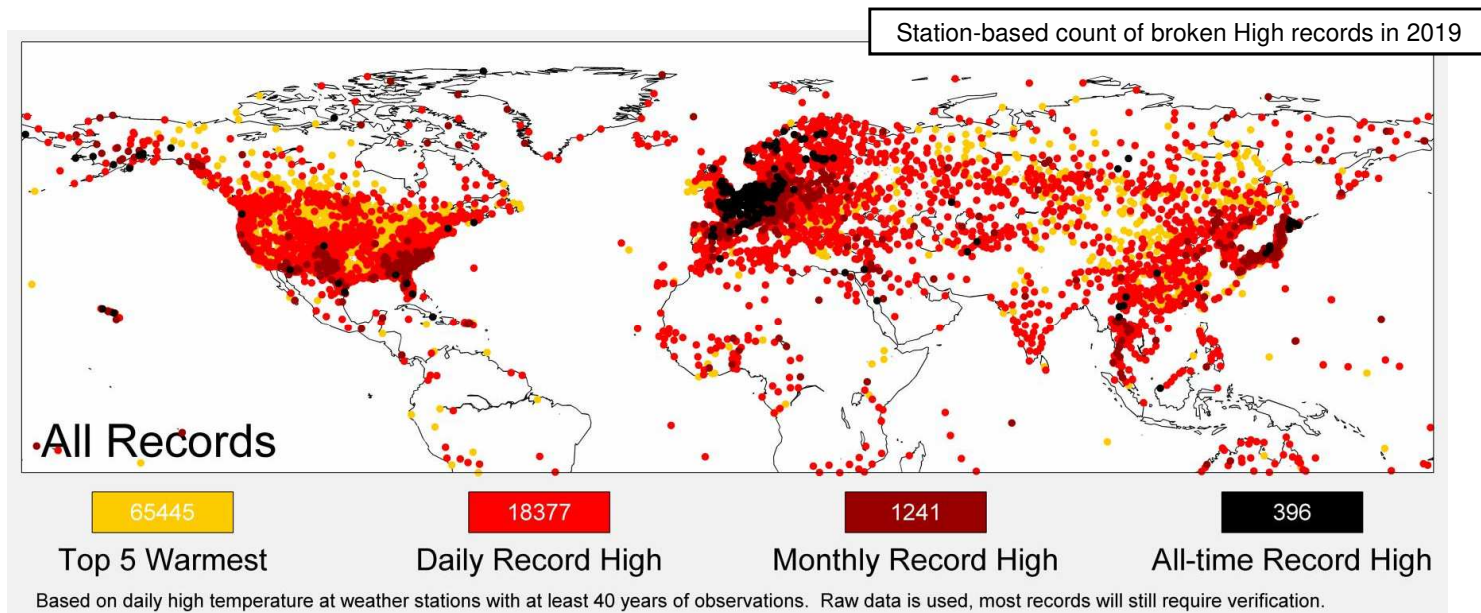
Températures estivales en 2019 à l'échelle globale



Observation la plus récente de la température globale sur Juin-Aout = + 0.93°C p/r référence [1850-1900]

Top 1

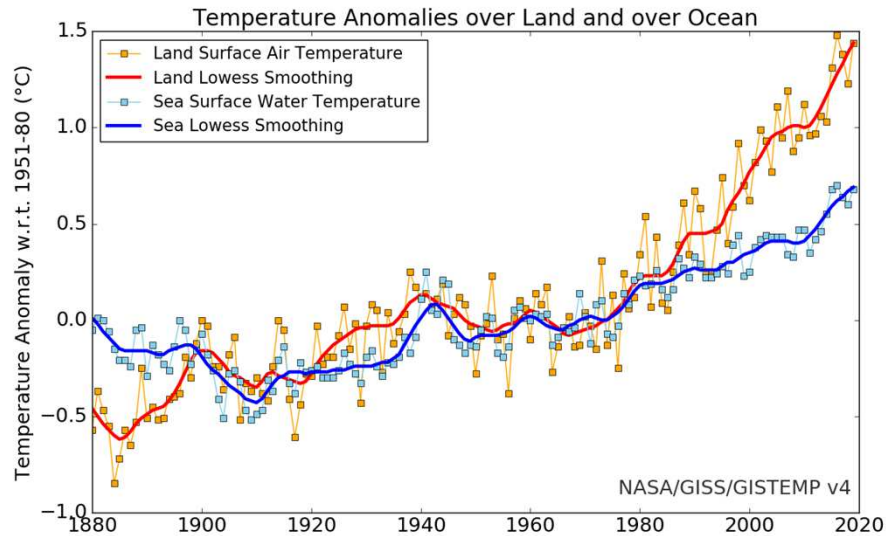
Probablement détrôné par 2020



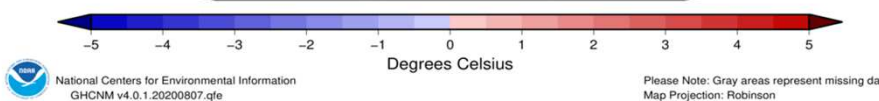
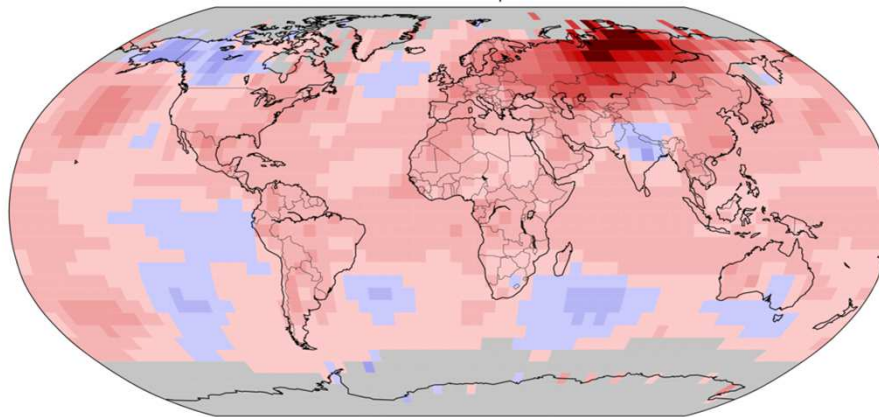
Source: @RaRodhe

1. Etat du climat en 2020

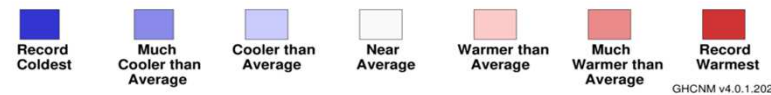
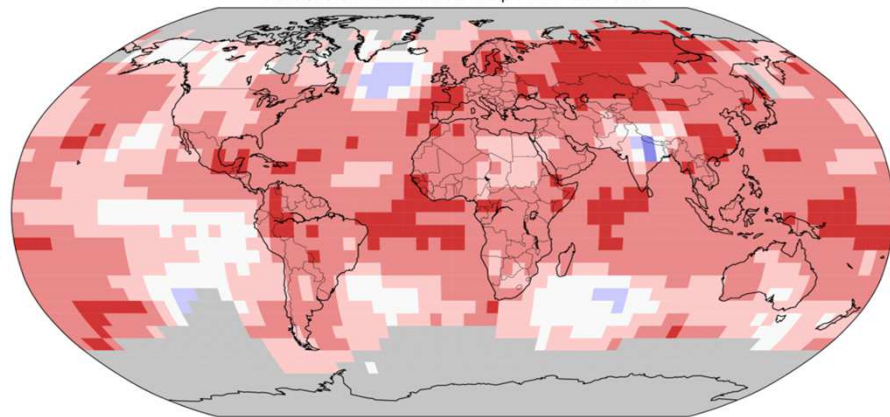
Evolution de la température globale depuis 1850



Land & Ocean Temperature Departure from Average Jan–Jul 2020
(with respect to a 1981–2010 base period)
Data Source: NOAA GlobalTemp v5.0.0–20200808

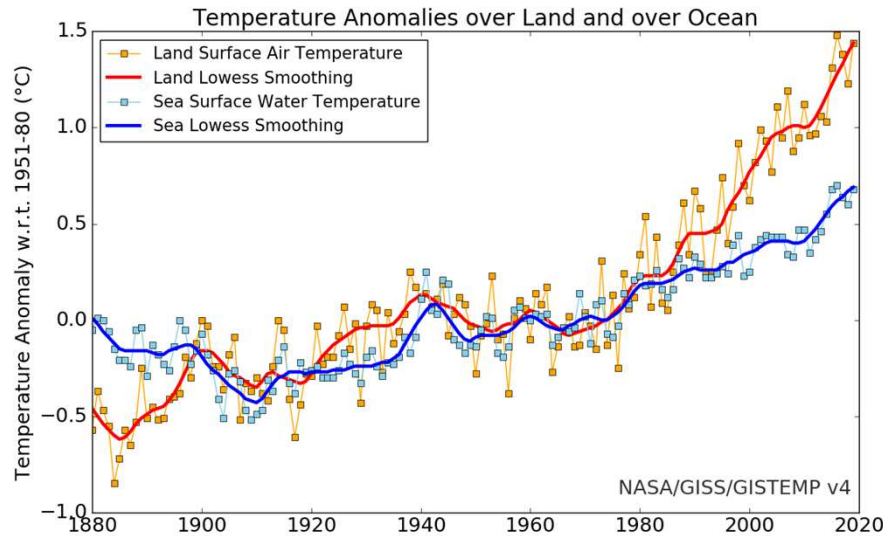


Land & Ocean Temperature Percentiles Jan–Jul 2020
NOAA's National Centers for Environmental Information
Data Source: NOAA GlobalTemp v5.0.0–20200808



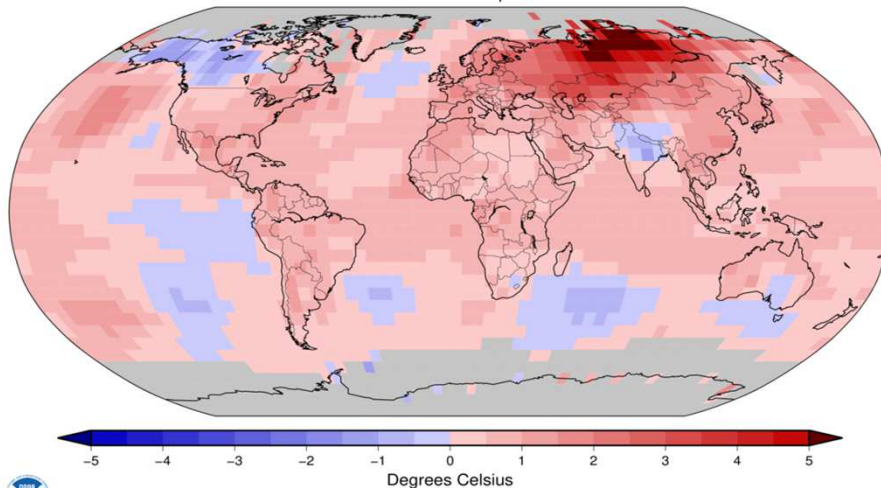
1. Etat du climat en 2020

Evolution de la température globale depuis 1850



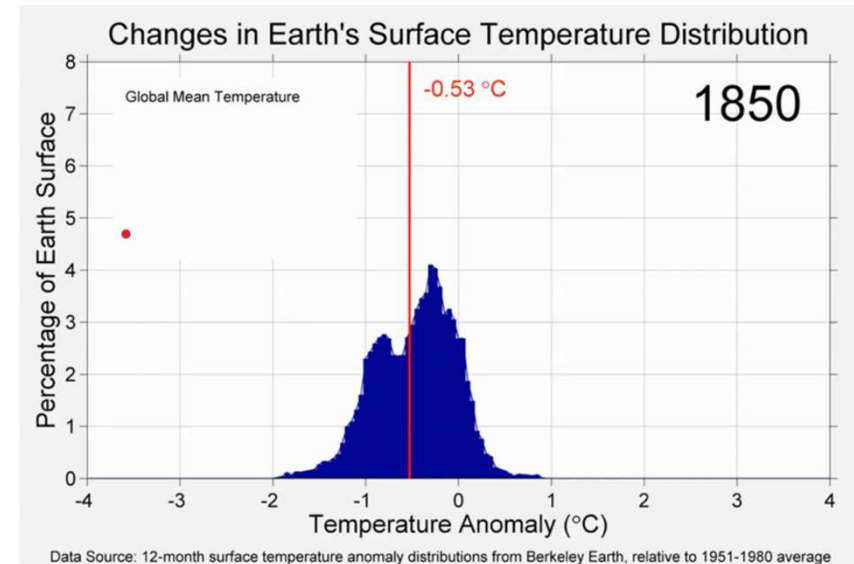
Land & Ocean Temperature Departure from Average Jan–Jul 2020
(with respect to a 1981–2010 base period)

Data Source: NOAA GlobalTemp v5.0.0–20200808



National Centers for Environmental Information
GHCM v4.0.1.20200807.qte

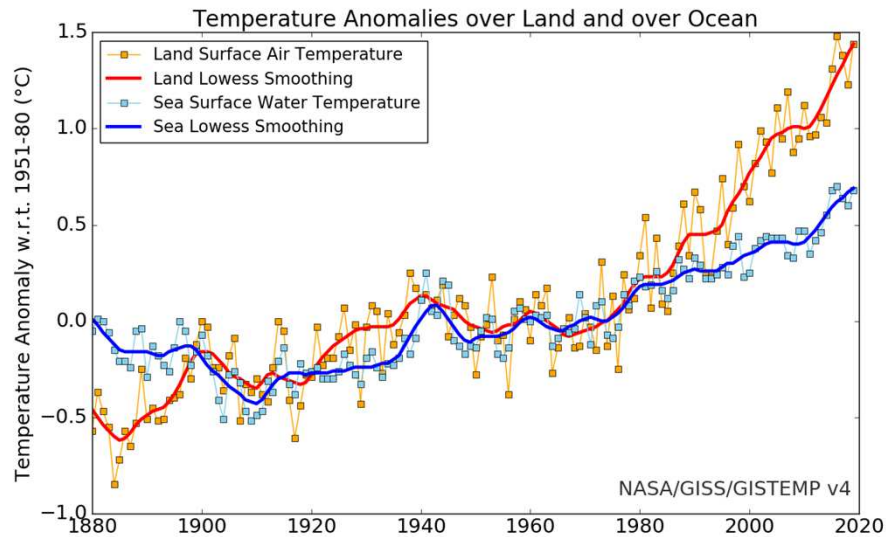
Please Note: Gray areas represent missing data
Map Projection: Robinson



Source: @RaRodhe

1. Etat du climat en 2020

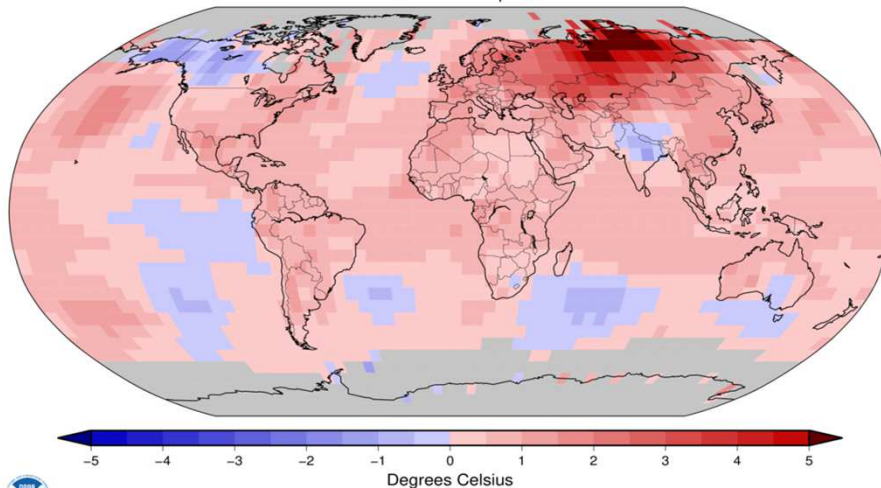
Distribution des anomalies de temp. depuis 1850



- Décalage de la distribution des anomalies de température conduisant à un changement non seulement de la moyenne mais aussi de la variance et donc des extrêmes

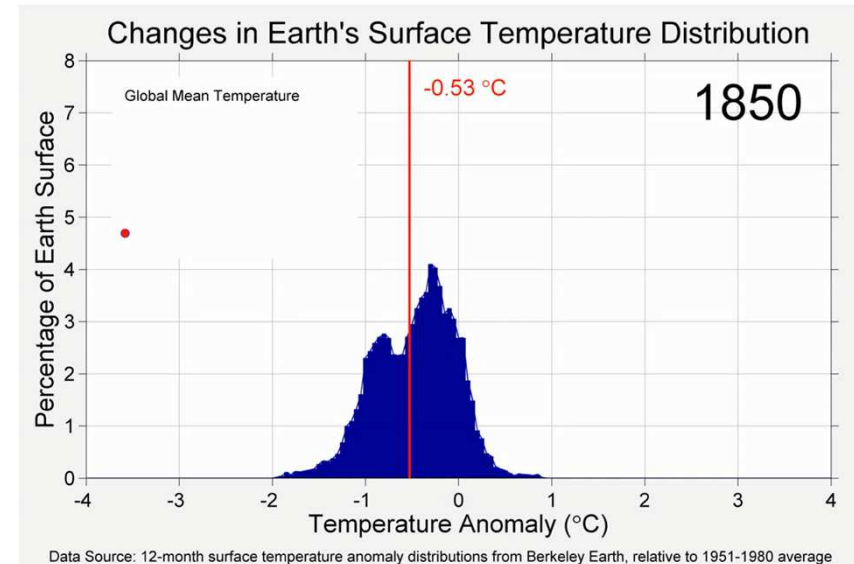
Land & Ocean Temperature Departure from Average Jan–Jul 2020
(with respect to a 1981–2010 base period)

Data Source: NOAA GlobalTemp v5.0.0-20200808



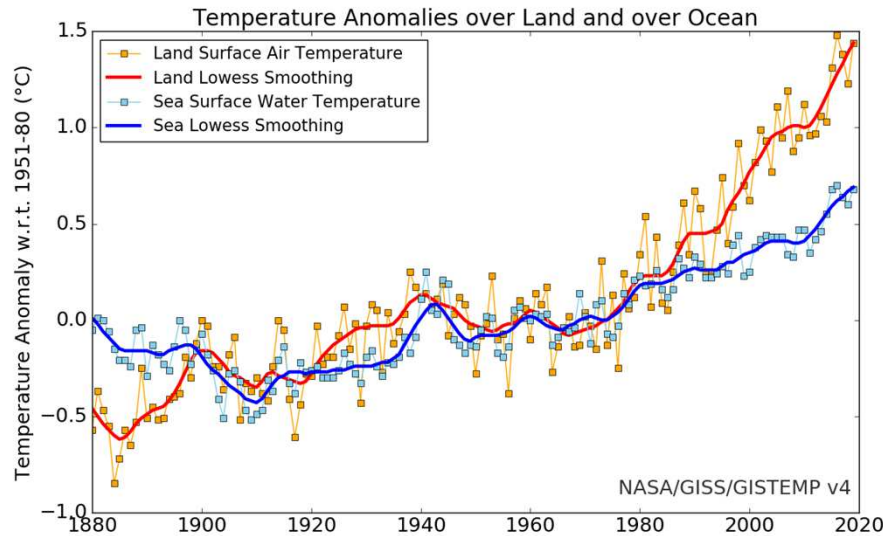
National Centers for Environmental Information
GHCNM v4.0.1.20200807.qte

Please Note: Gray areas represent missing data
Map Projection: Robinson



1. Etat du climat en 2020

Changement des extremes de temperatures chauds

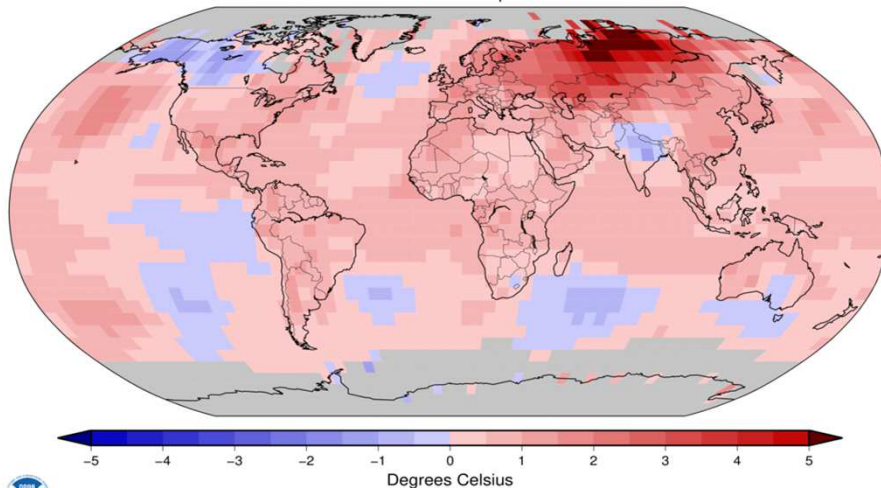


- **Décalage de la distribution des anomalies de température conduisant à un changement non seulement de la moyenne mais aussi de la variance et donc des extrêmes**

- **Le rapport entre le nombre de record chaud versus froid est égal a 2, en cohérence avec le réchauffement global et les lois théoriques d'évolution des extrêmes.**

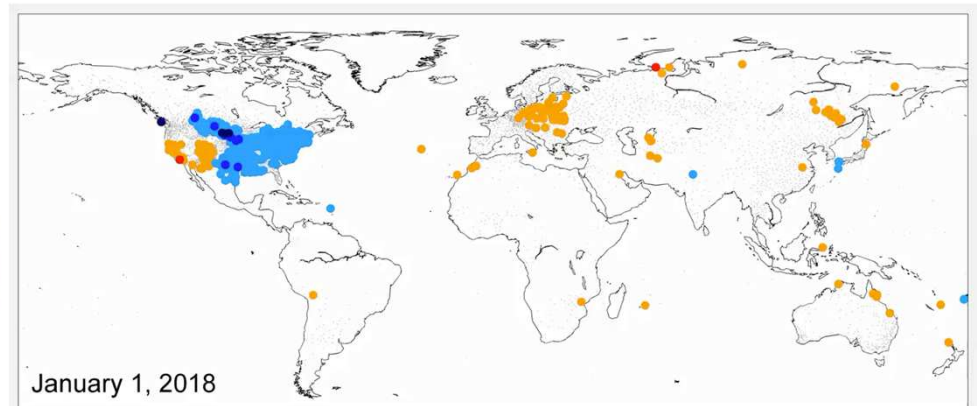
Land & Ocean Temperature Departure from Average Jan–Jul 2020 (with respect to a 1981–2010 base period)

Data Source: NOAA GlobalTemp v5.0.0-20200808



National Centers for Environmental Information
GHCNM v4.0.1.20200807.qtf

Please Note: Gray areas represent missing data
Map Projection: Robinson



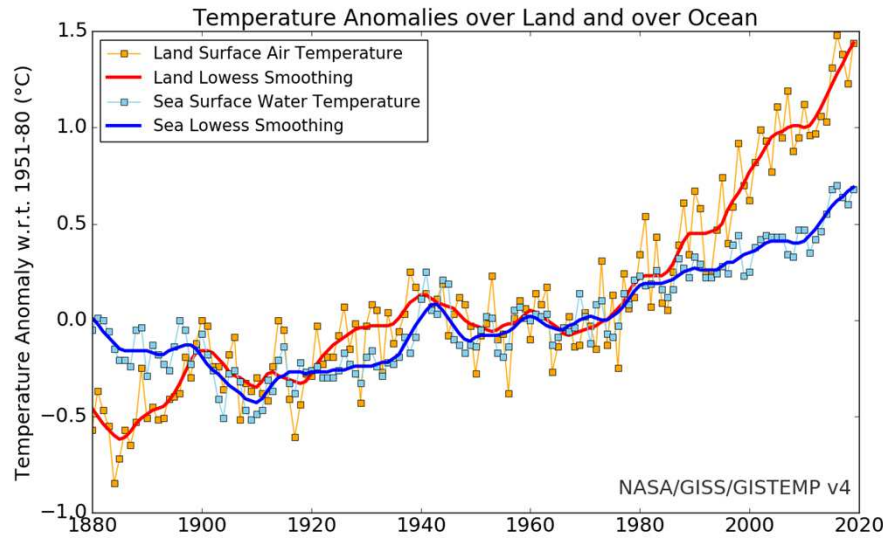
New Record High			New Record Low		
Daily	Monthly	All-time	Daily	Monthly	All-time
140	3	0	705	9	4

Based on daily high and low temperature at 8209 weather stations with at least 40 years of observations. Raw data is used, most records will still require verification.

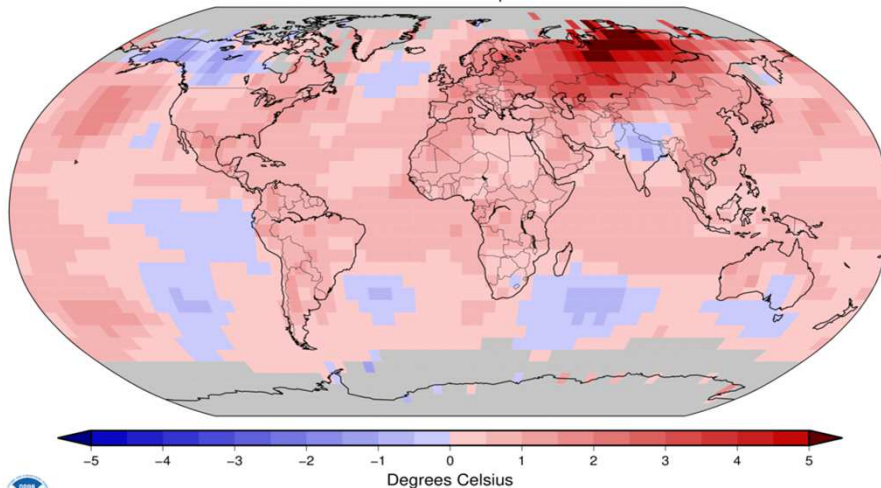
Source: @RaRodhe

1. Etat du climat en 2020

Invariance d'échelle du réchauffement global



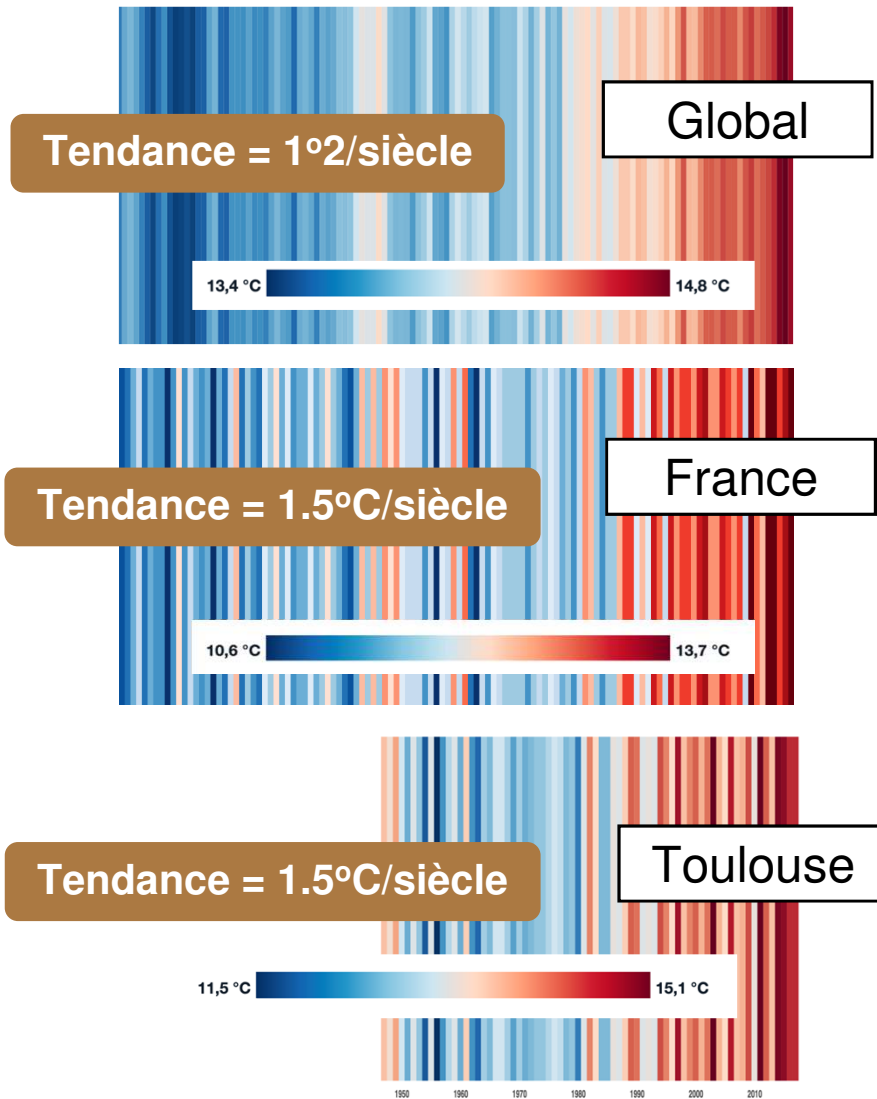
Land & Ocean Temperature Departure from Average Jan–Jul 2020
(with respect to a 1981–2010 base period)
Data Source: NOAA GlobalTemp v5.0.0–20200808



National Centers for Environmental Information
GHCNM v4.0.1.20200807.qtf

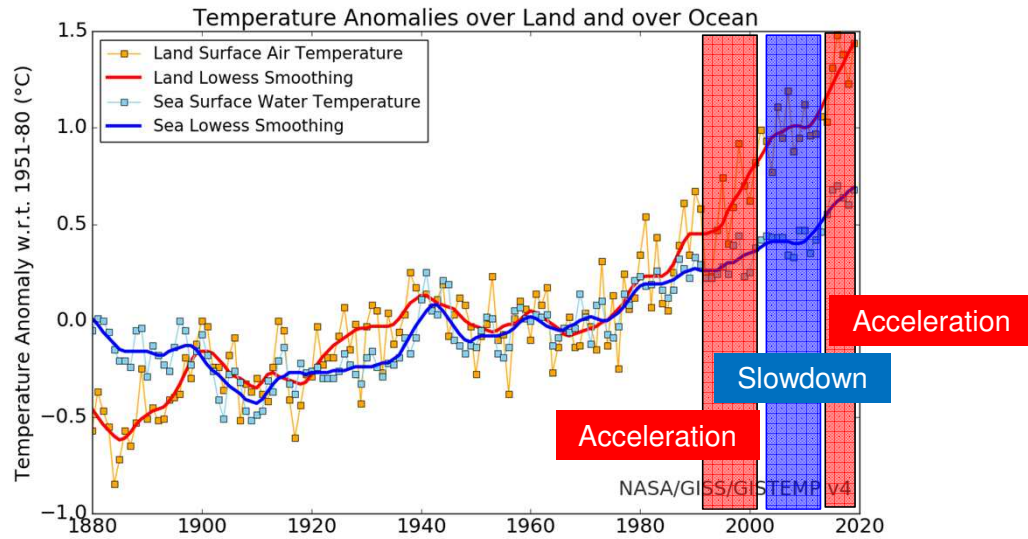
Please Note: Gray areas represent missing data
Map Projection: Robinson

Climate stripes (@EdHawkins)



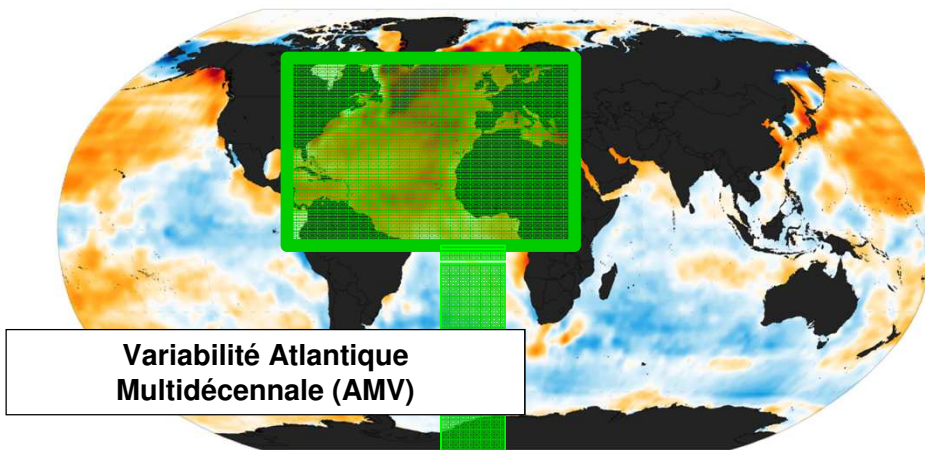
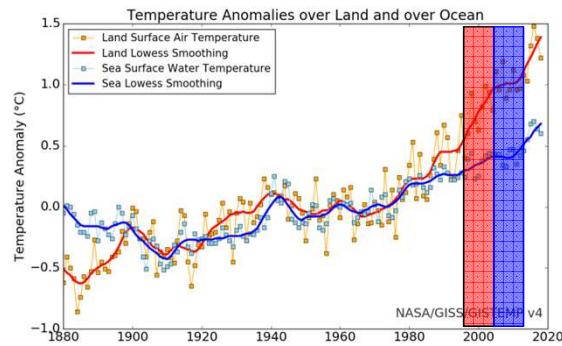
1. Etat du climat

Modulation décennale du réchauffement global

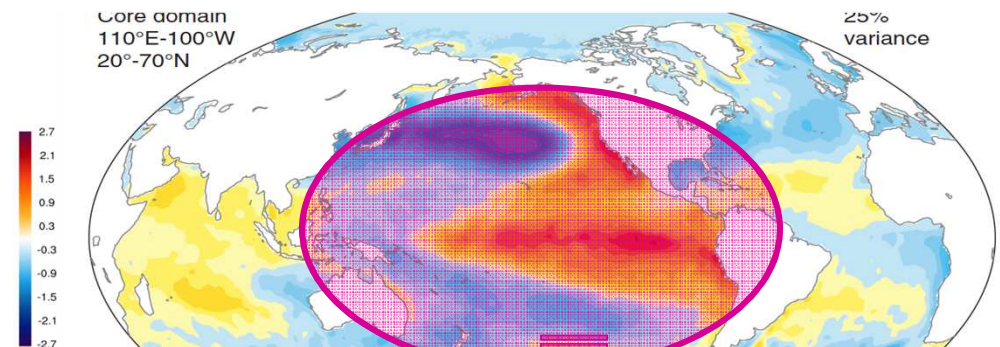
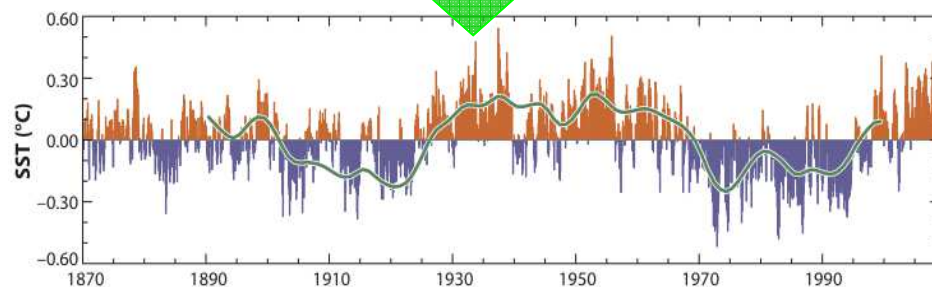


1. Etat du climat

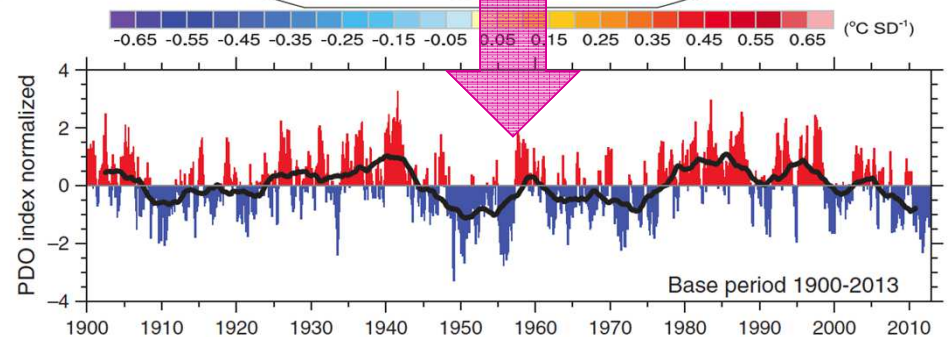
Modes de variabilité décennale d'origine interne



Variabilité Atlantique Multidécennale (AMV)



Variabilité Pacifique décennale (PDV)



Source: Deser et al. (2012)

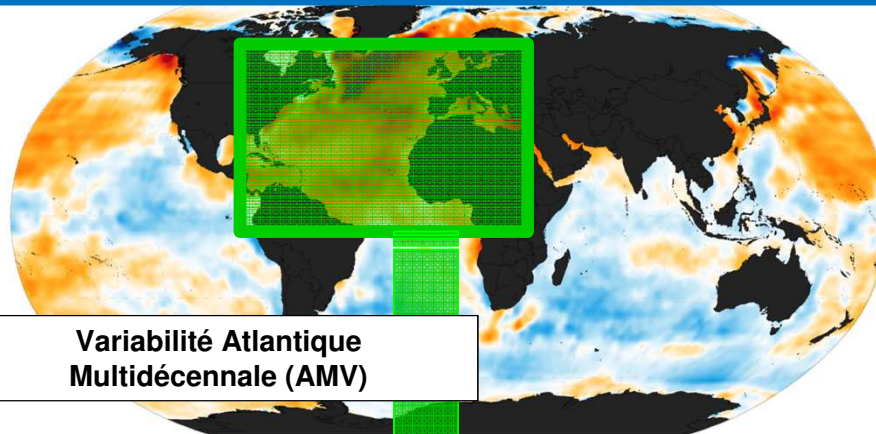
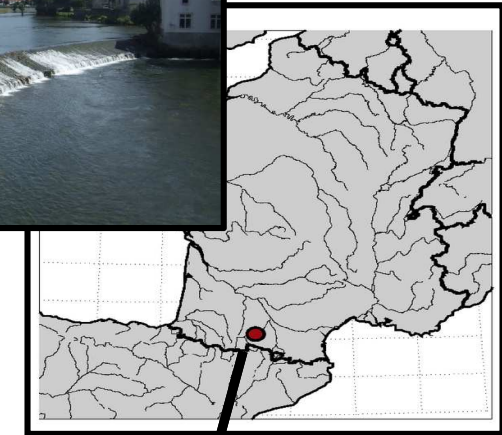
1. Etat du climat

Influences régionales de la variabilité interne décennale

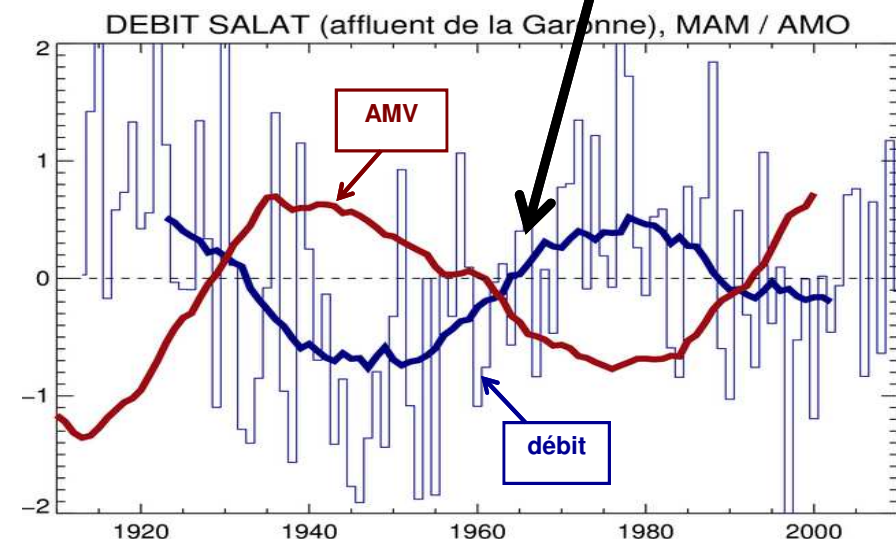
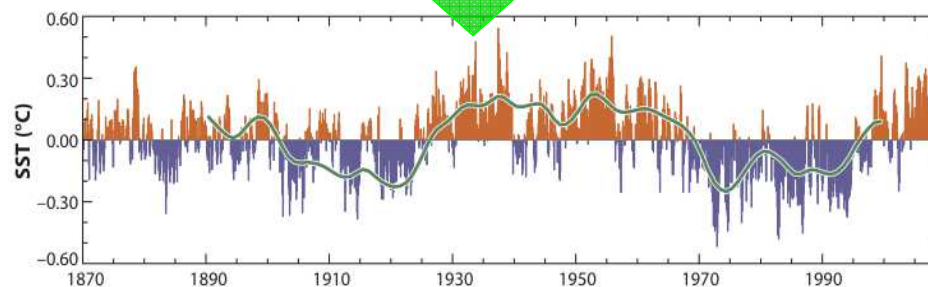
- Les influences des modes de variabilité peuvent dominer certaines tendances aux échelles régionales, en particulier pour les précipitations/débit de rivières, etc.
- Les influences de l'AMV dominent la variabilité multidécennale de l'activité cyclonique Atlantique



Source: Boe and Habets (2014)

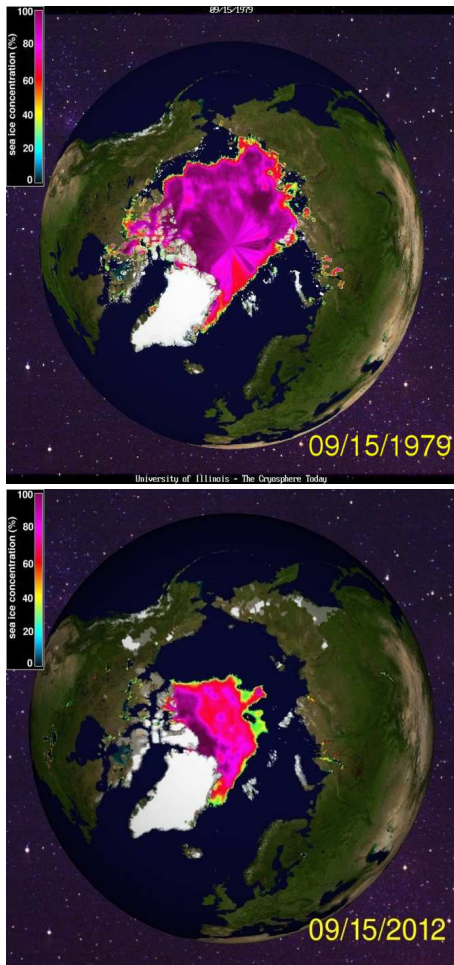


Variabilité Atlantique Multidécennale (AMV)



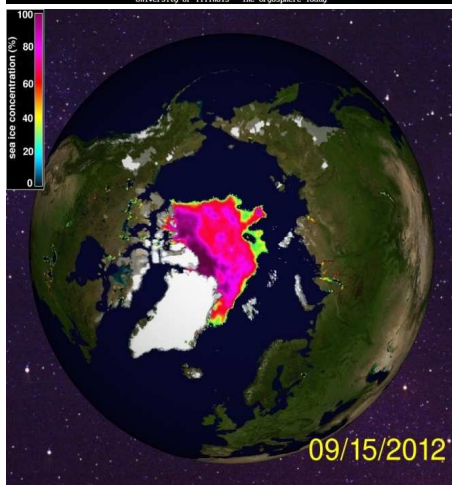
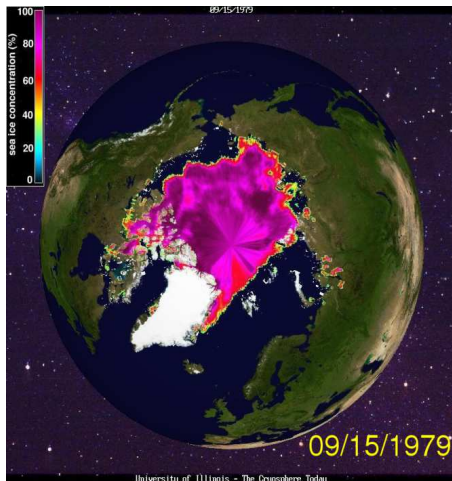
1. Etat du climat en 2020

Amplification des changements dans l'Arctique

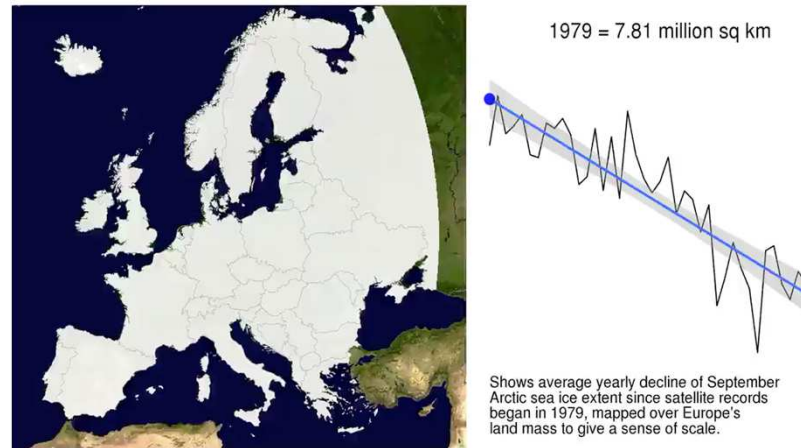


1. Etat du climat en 2020

Amplification des changements dans l'Arctique



How much has September Arctic sea ice extent reduced since 1979?

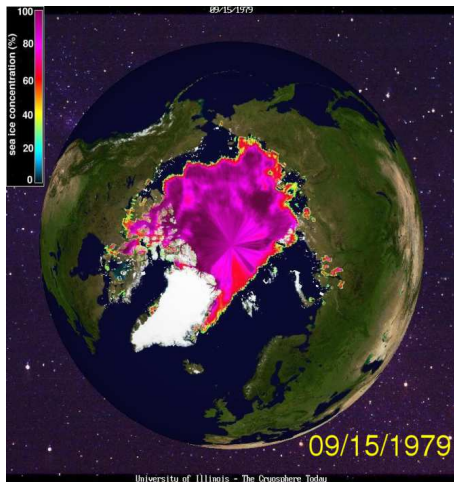


Source: HadISST.2.2.0.0 dataset of monthly Arctic sea ice extent. Created by: @neilrkaye

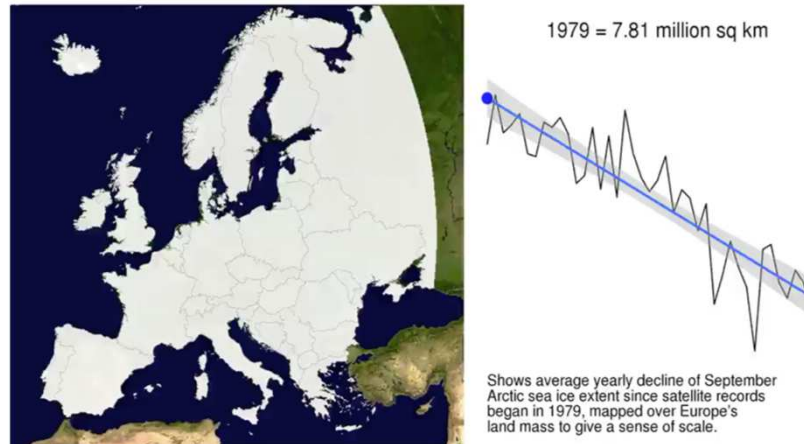
- **Changement d'albedo de surface conduisant a un feedback positif**

1. Etat du climat en 2020

Amplification des changements dans l'Arctique

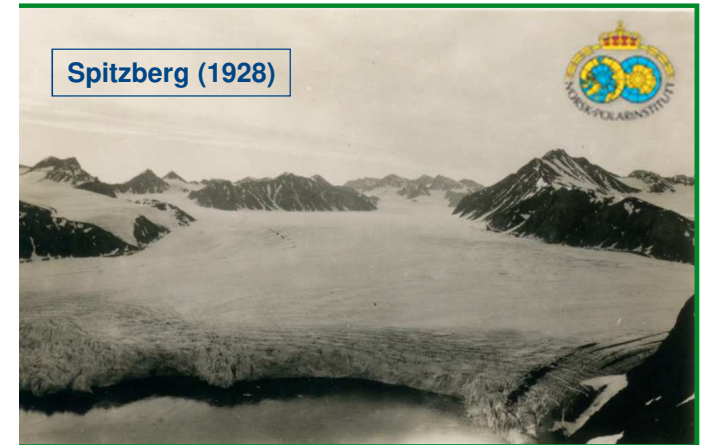


How much has September Arctic sea ice extent reduced since 1979?



Source: HadISST.2.2.0.0 dataset of monthly Arctic sea ice extent. Created by: @neilrkaye

Source: Norsk Polarinstittutt



Spitzberg (1928)



Spitzberg (2009)

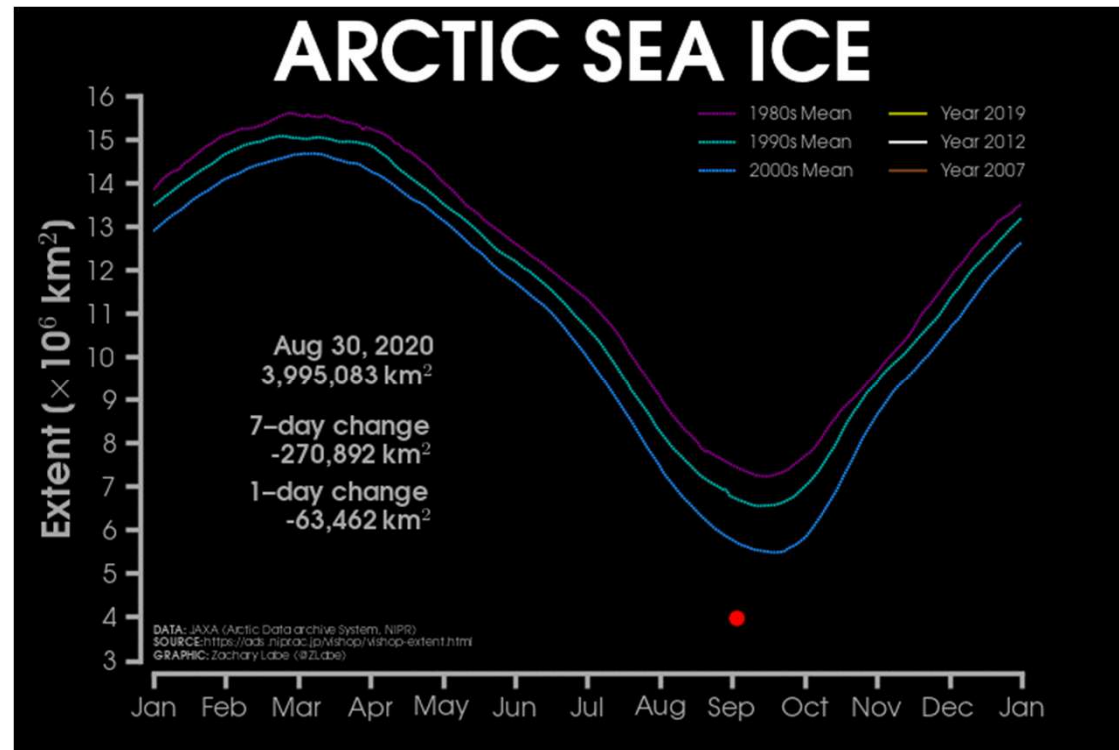
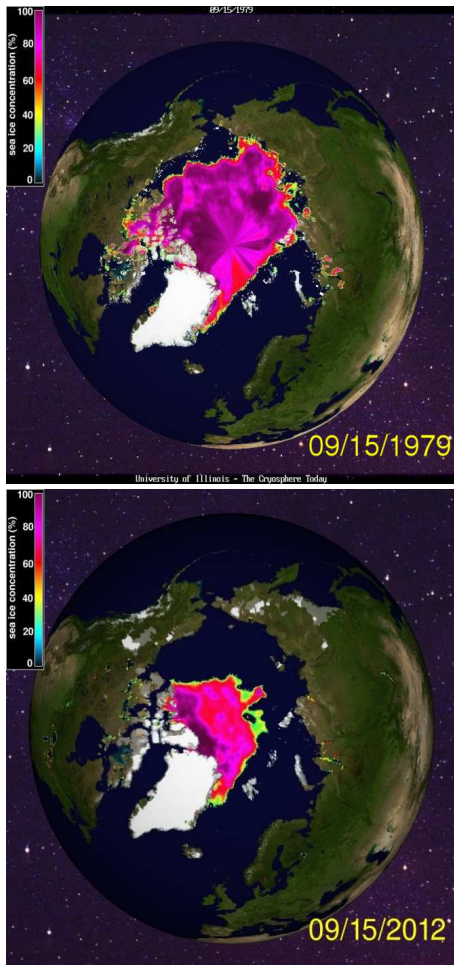
Source: Les derniers messagers des glaces

- Changement d'albedo de surface conduisant a un feedback positif

- La fonte des glaciers continentaux/calotte contribue à une hausse du niveau des mers > 50% sur la période récente [2000-2019].

1. Etat du climat en 2020

2020, en route vers un nouveau record?



Source: @ZacharyLabe

1. Etat du climat en 2020

Conclusions

- Les émissions de CO₂ d'origine anthropique sont responsables de changements **sans précédents** et **irréversibles** dans le cycle du carbone aux échelles de temps géologiques et dans **toutes** les composantes du système climatique
- La température moyenne a augmenté de **1°C/siècle** à l'échelle globale, **plus vite sur les continents** (1.5°C/siècle) que sur les océans et plus vite aux **latitudes polaires**.
- Les records de températures extrêmes chaudes sont battus **2 fois plus souvent** que les records de froid et les valeurs extrêmes chaudes augmentent 2 fois plus que les changements moyens
- La banquise Arctique a perdu **~40%** de son étendue en 30 ans.
- Le niveau global des mers a monté de **~15-20cm** depuis le début du 20^e siècle. Le rythme de cette hausse est 2.5 fois plus rapide au 21^e siècle [2000-2019] comparé au 20^e siècle.

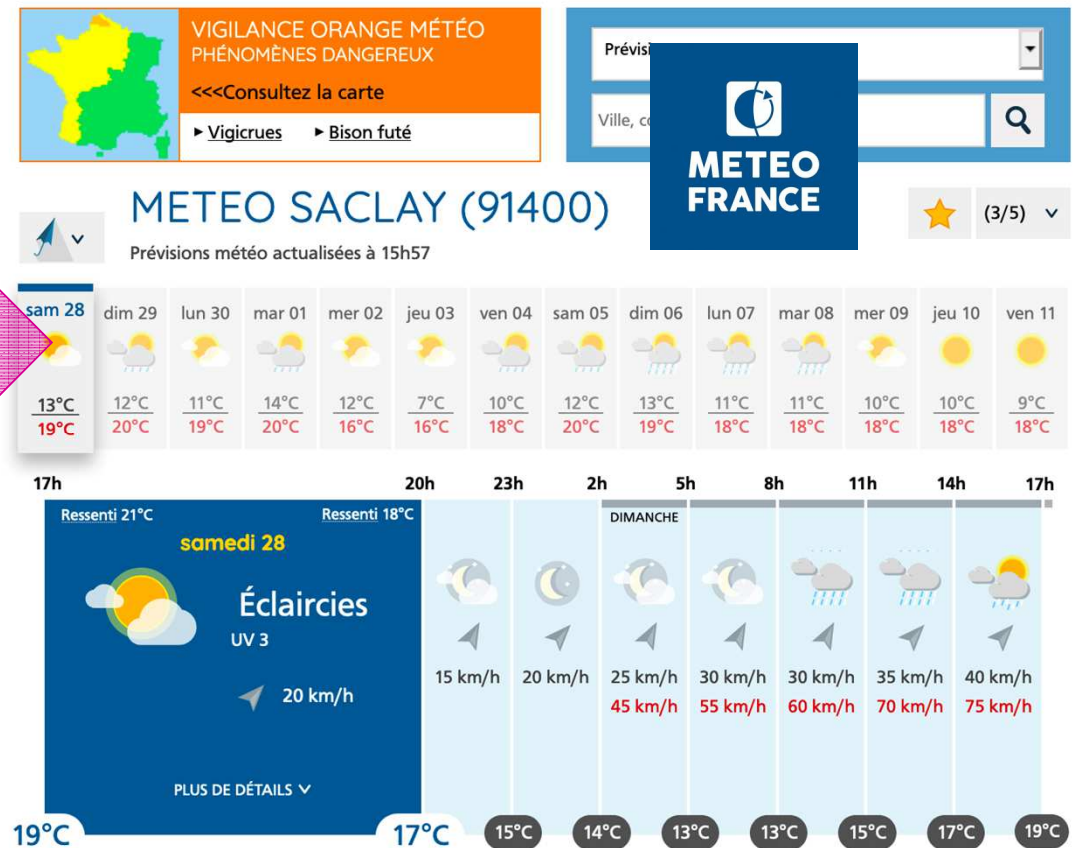
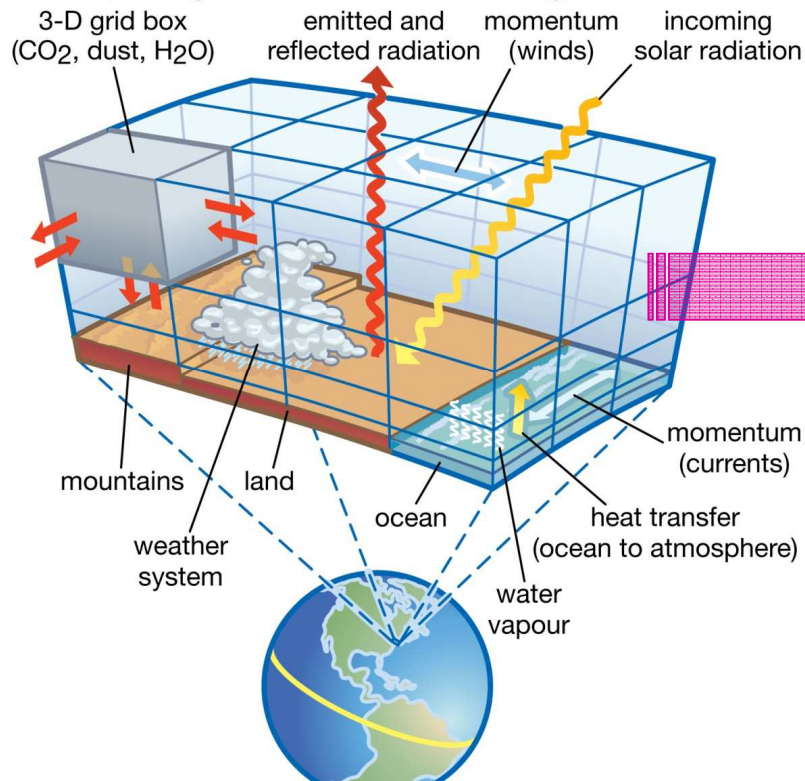
Le changement climatique n'est pas un "paysage/chemin" vers lequel nous nous dirigeons vers le futur. Il est ici et maintenant. Il devient notre quotidien (réurrence et intensité des canicules, sécheresse, pluie diluviennes dans le Sud Est de la France – événements cévenols-, décalage des saisons, etc.)

2. Compréhension/attribution des changements climatiques observés

Les modèles de circulation générale

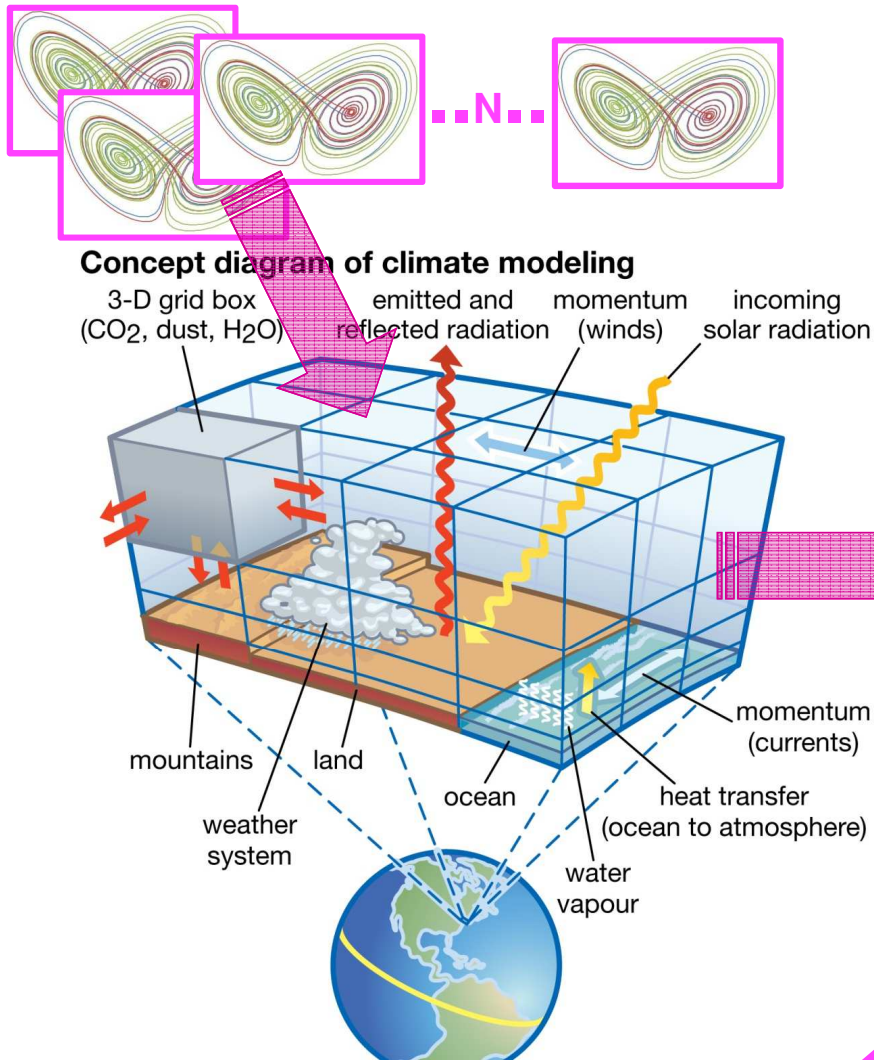
Modèles numériques = planète virtuelle utilisée pour la compréhension des processus et de la variabilité observée + la prévision à toutes les échelles de temps (paléo à la prévision météo en temps réel)

Concept diagram of climate modeling



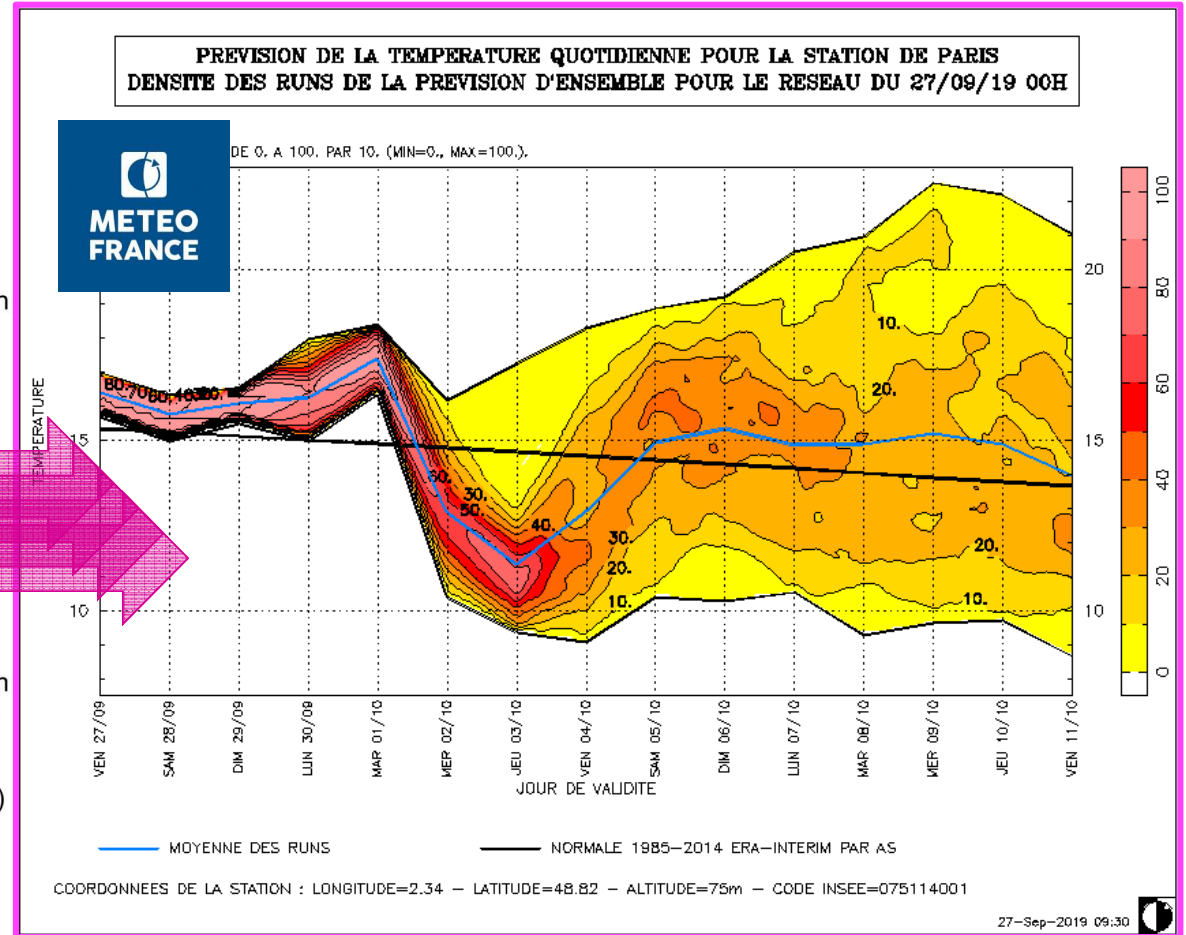
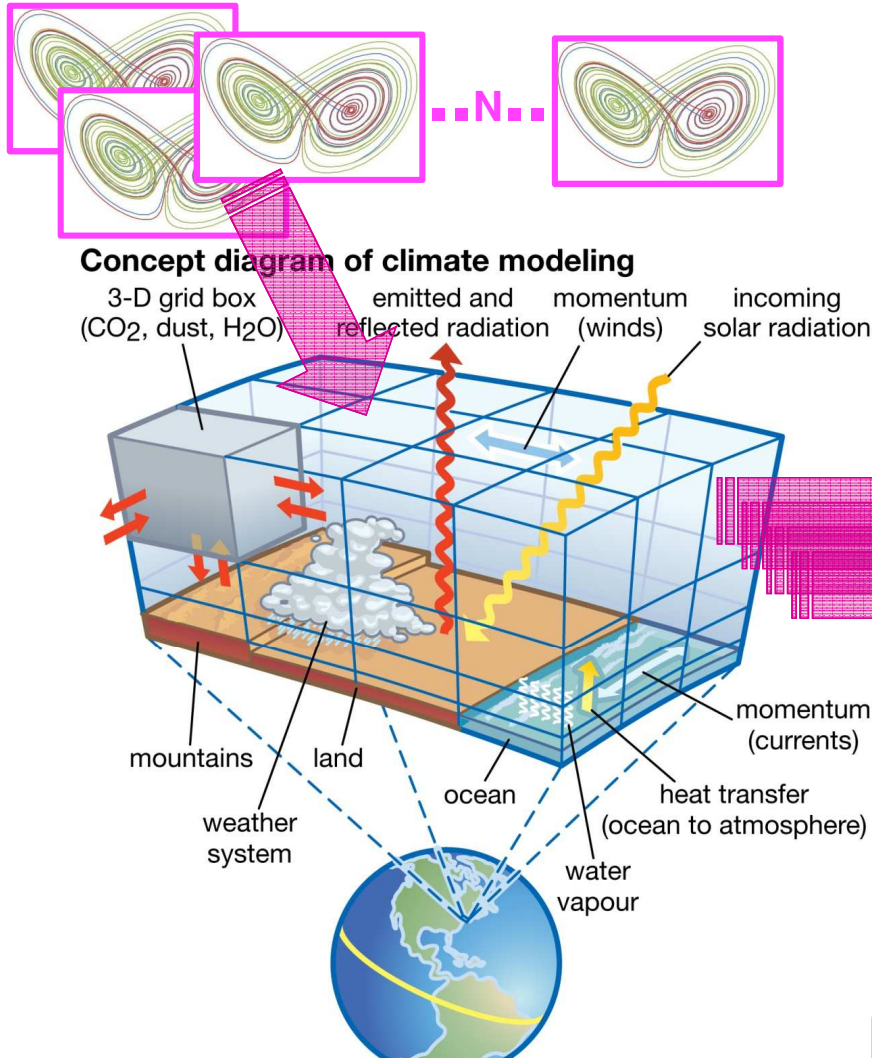
2. Compréhension/attribution des changements climatiques observés

Prévision météo: probabiliste/approche ensembliste



2. Compréhension/attribution des changements climatiques observés

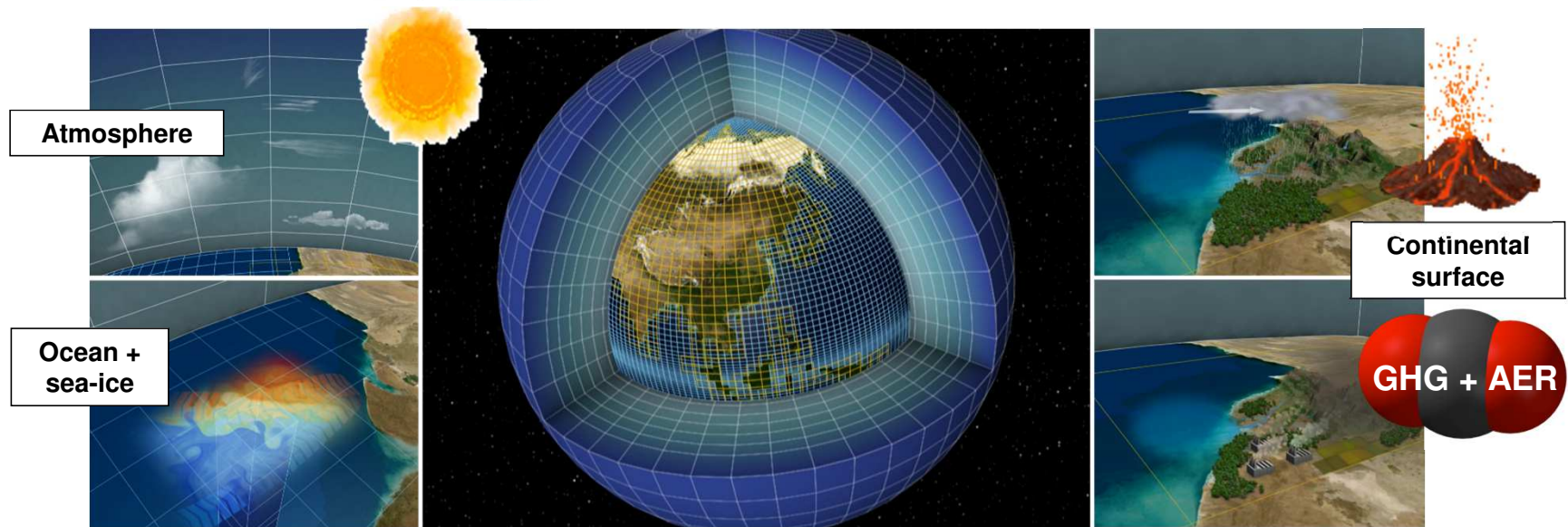
Prévision météo: probabiliste/approche ensembliste



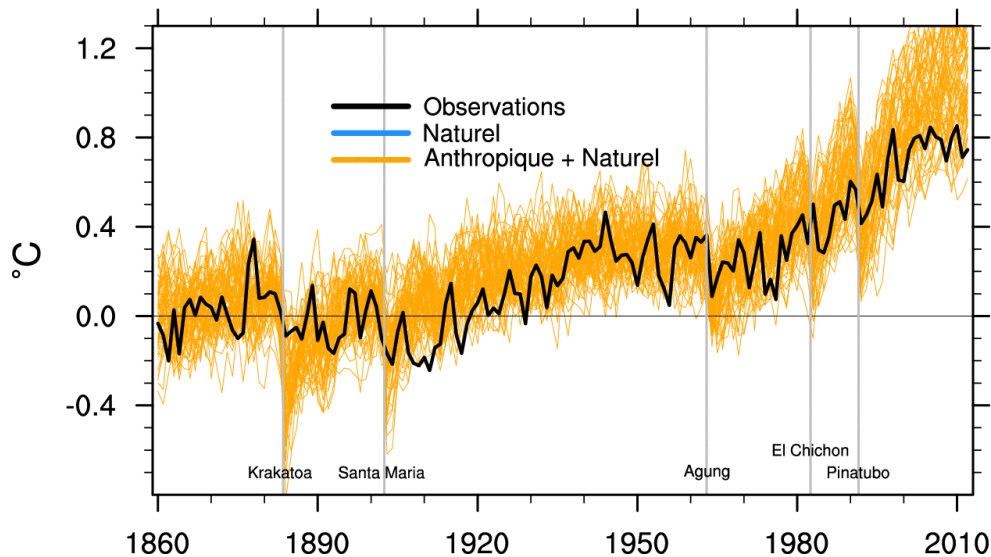
• Par nature, tout type de prévision (quelque soit l'échelle de temps) est probabiliste pour prendre en compte la variabilité intrinsèque chaotique du climat.

2. Compréhension/attribution des changements climatiques observés

Rôle des forçages naturels versus anthropiques



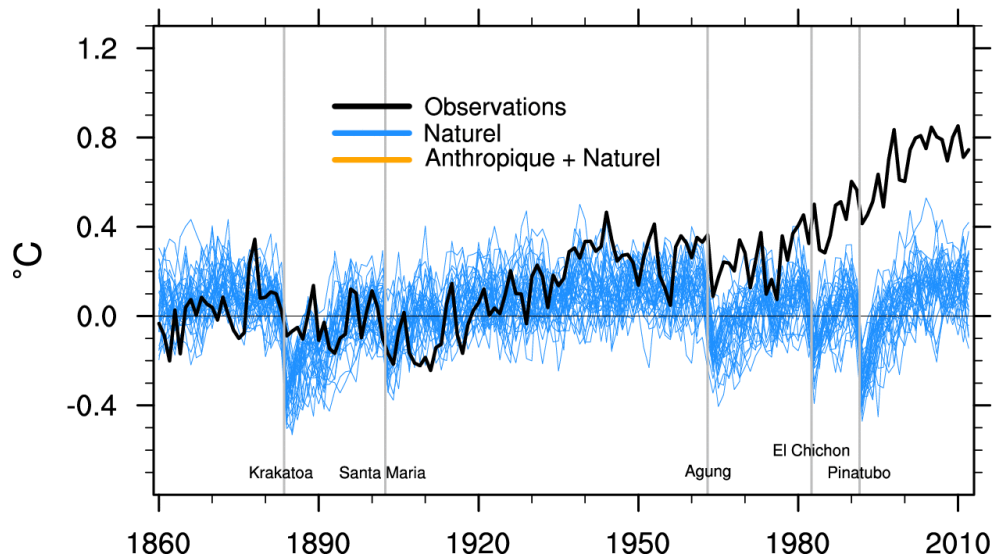
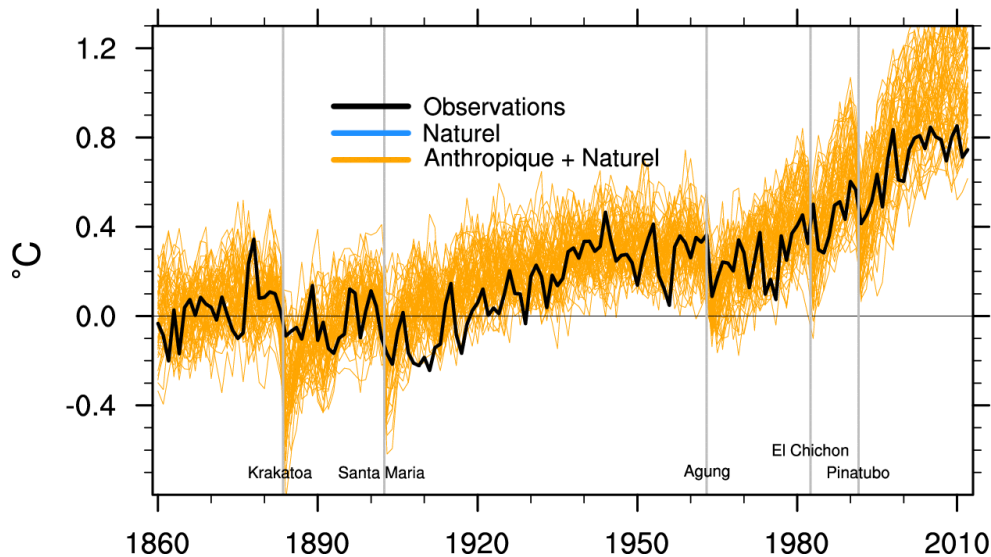
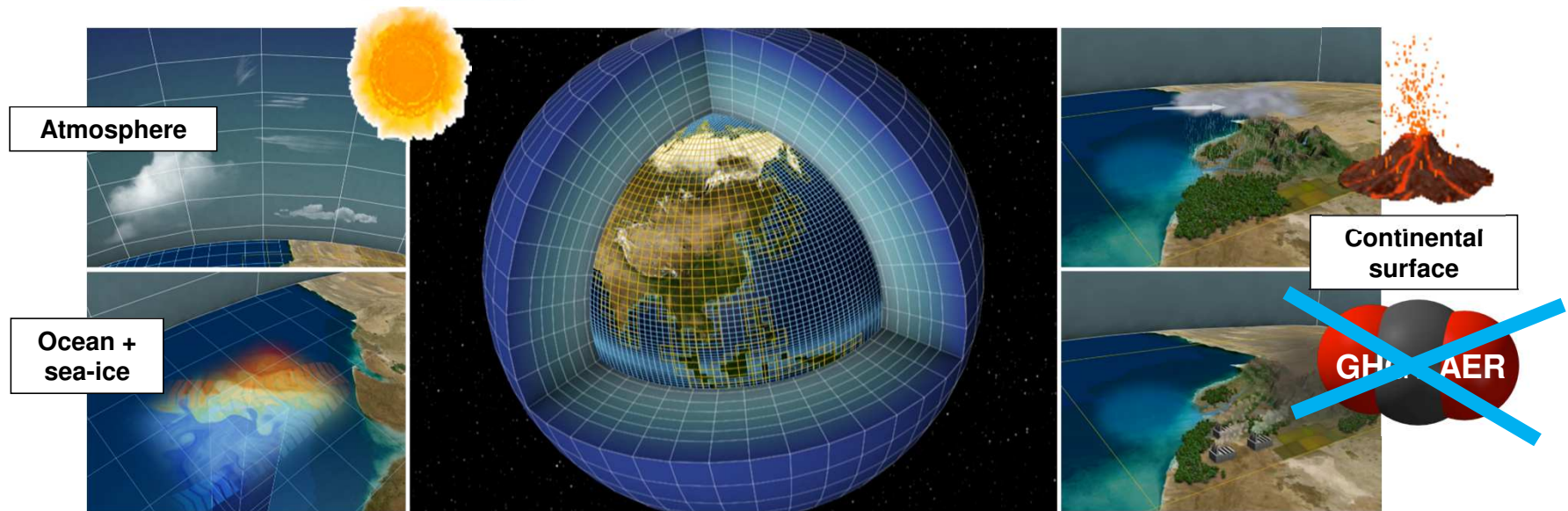
Source: IPSL



Source: données CMIP5/graphe Ch. Cassou

2. Compréhension/attribution des changements climatiques observés

Rôle des forçages naturels versus anthropiques



Source: données CMIP5/graphe Ch. Cassou

2. Compréhension/attribution des changements climatiques observés

Conclusions

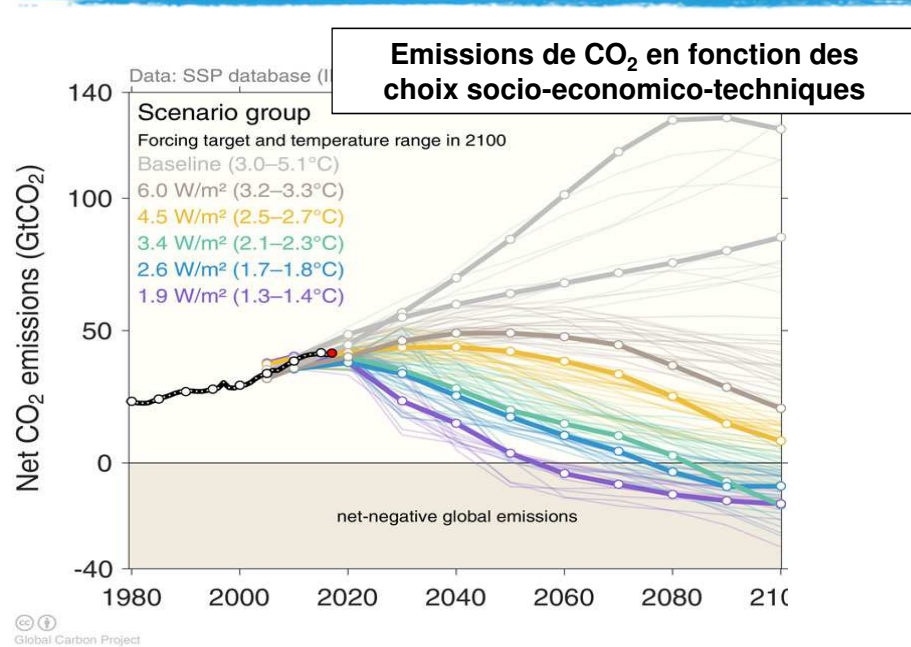
Les activités humaines sont responsables de **90% à 100%** du réchauffement global observé depuis le début de l'ère industrielle, principalement via l'émission de gaz à effet de serre. Les forçages solaires jouent un rôle très marginal de même l'activité volcanique associée à des refroidissements brefs et temporaires. Depuis 2015, le signal anthropique **émerge** de la variabilité naturelle dans bcp de régions

- **Les incertitudes** sont prises en compte et quantifiées via des approches ensemblistes en multi-modèles.
 - Incertitude **stochastique** (nature chaotique du système) : irréductible
 - Incertitude **épistémique** (connaissance scientifique et maturité des modèles) : réductible
- Exemples concrets d'attribution aux activités humaines: la probabilité d'avoir une canicule de type 2019 est **100 fois plus grande** aujourd'hui que pendant le climat préindustriel. Pour la température 2020 en Arctique, c'est 600 fois. (Vautard et al. 2019, 2020)

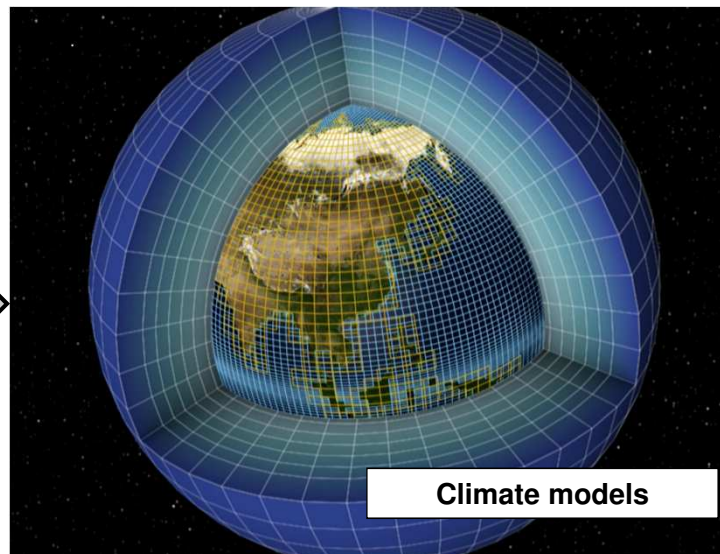
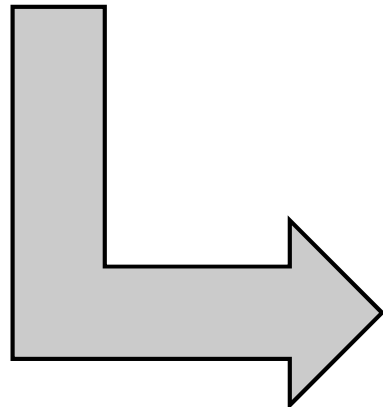
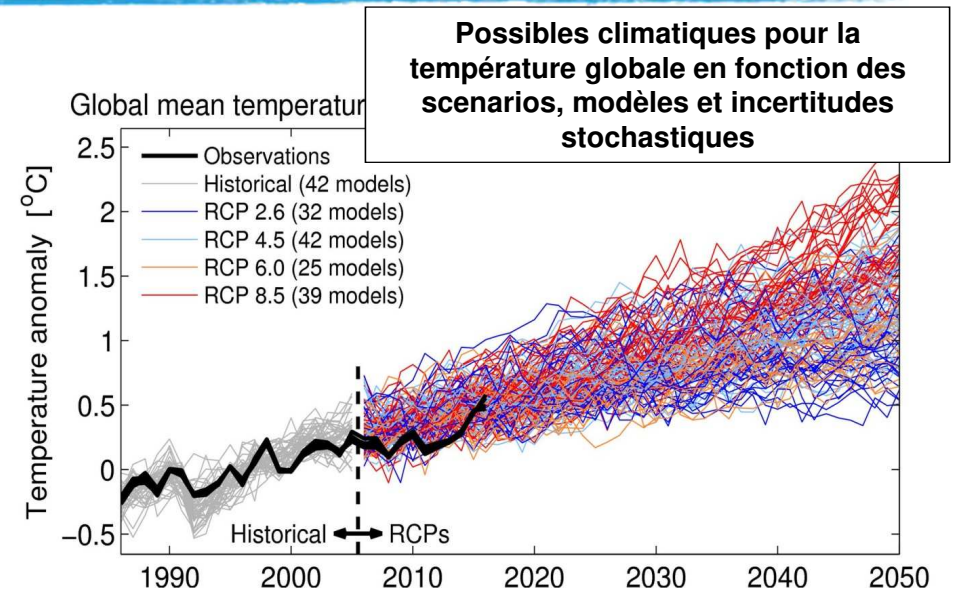
- 3eme source d'incertitude pour le futur: l'incertitude **réflexive** due aux futures activités humaines et choix associés.
 - > **Les projections climatiques sont fonction des scénarios d'émission des GES et des aérosols**

3. Les futurs climatiques

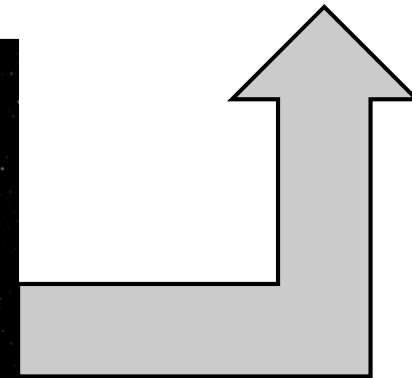
Scénarios climatiques d'émission de GES



Source: Global Carbon Project



Source: IPSL



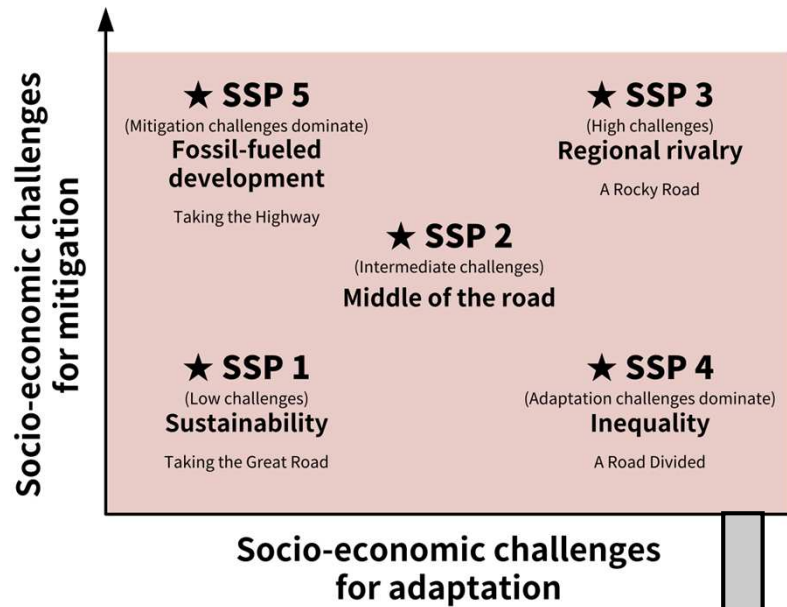
Evolution de la température de surface

Scenario sobre

Scenario du laisser faire

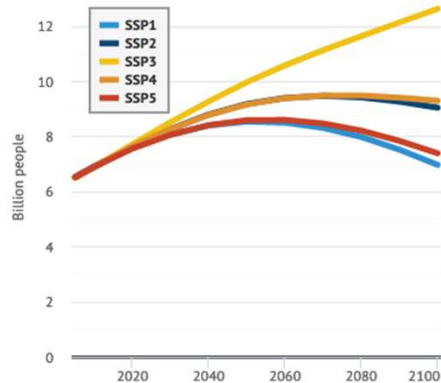
3. Les futurs climatiques

Les nouveaux scénarios au coeur du prochain rapport du GIEC

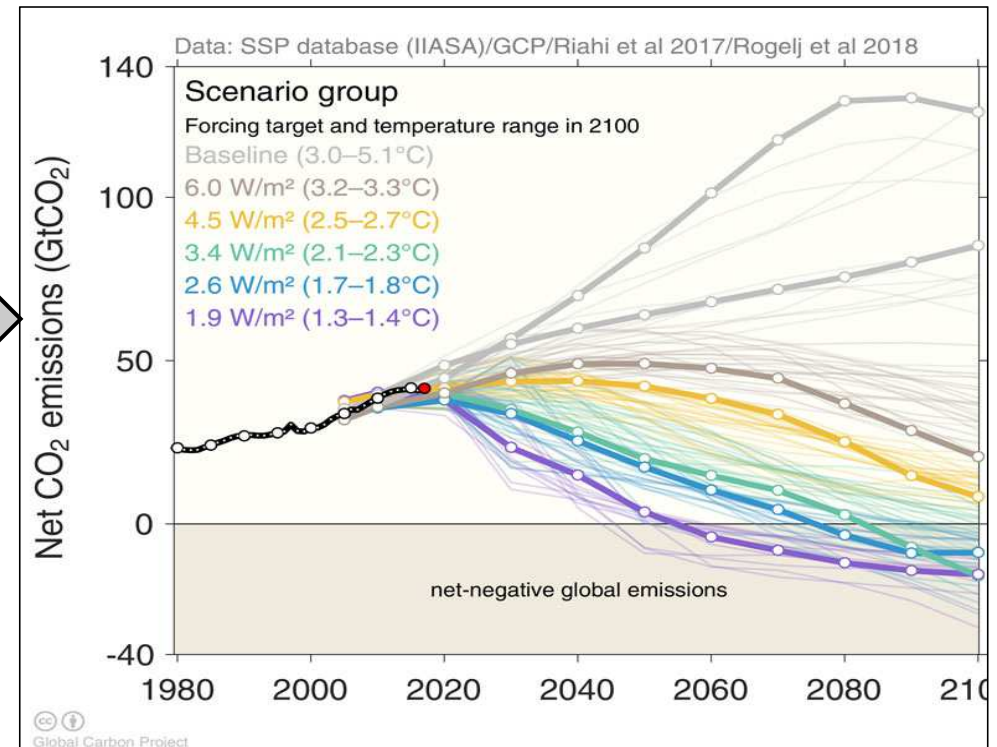
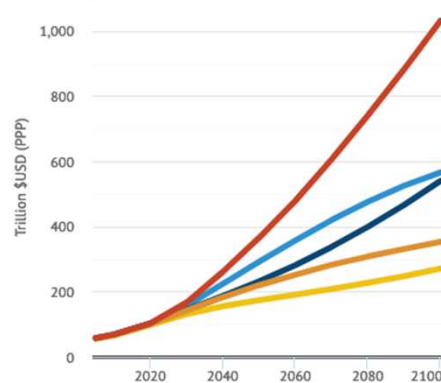


Narration/histoire (shared socio-economical pathways -SSP) combinant une multitude de facteurs pour chacune d'entre elles

Global population



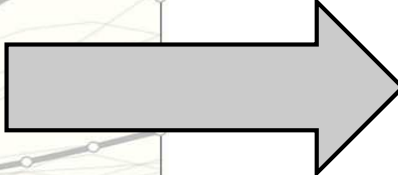
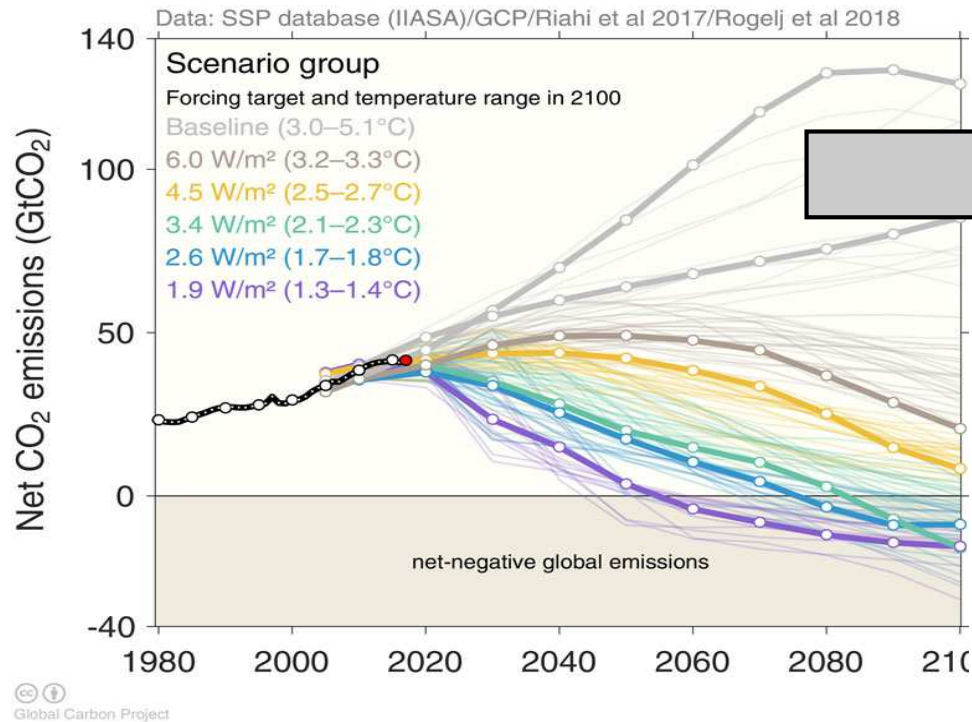
Global GDP



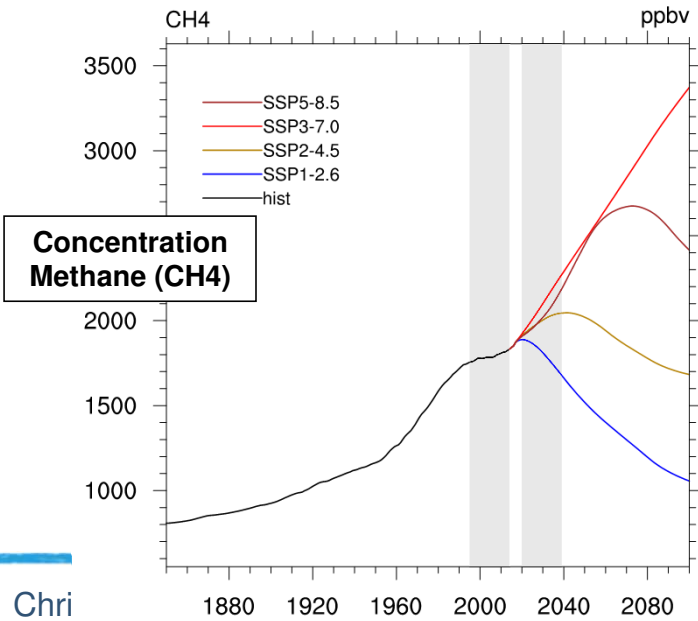
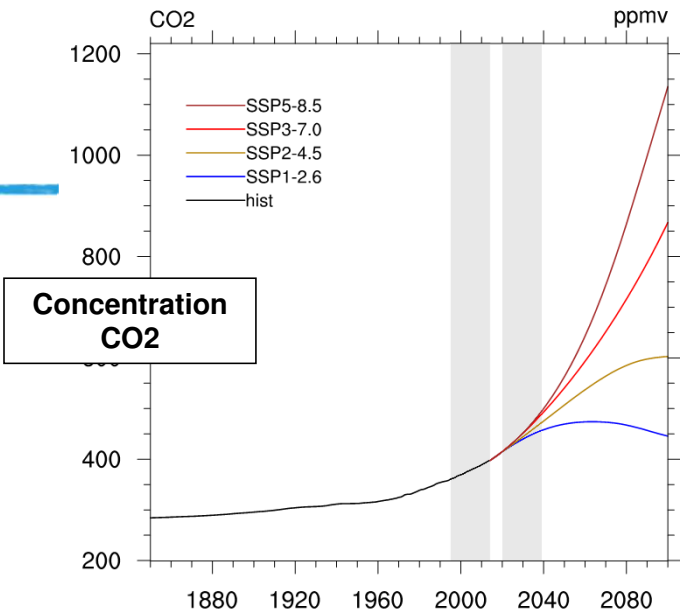
3. Les futurs climatiques

Des ssp aux forcages (1)

Narration/histoire (shared socio-economical pathways -SSP) combinant une multitude de facteurs pour chacune d'entre elles

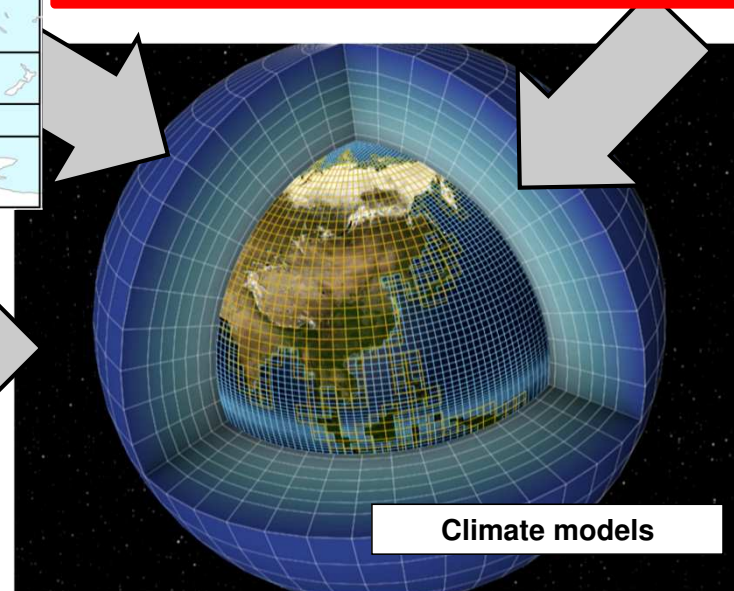
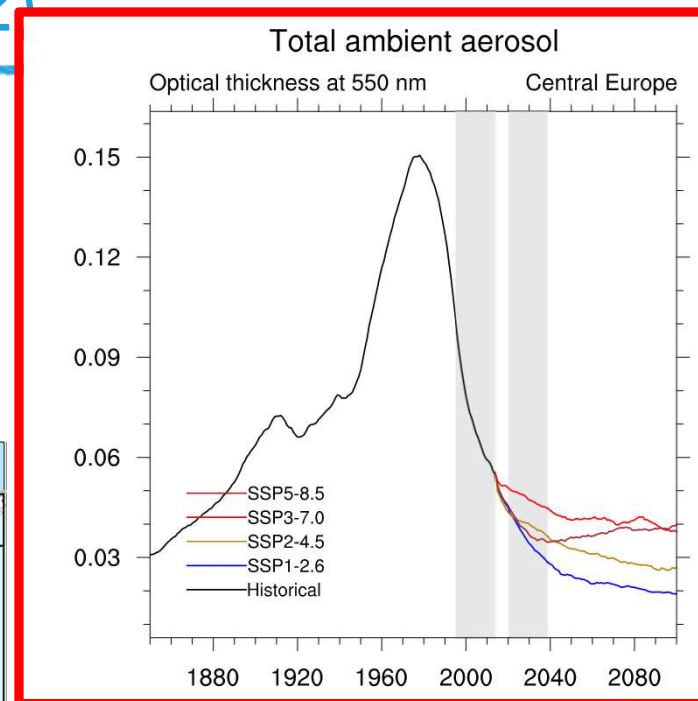
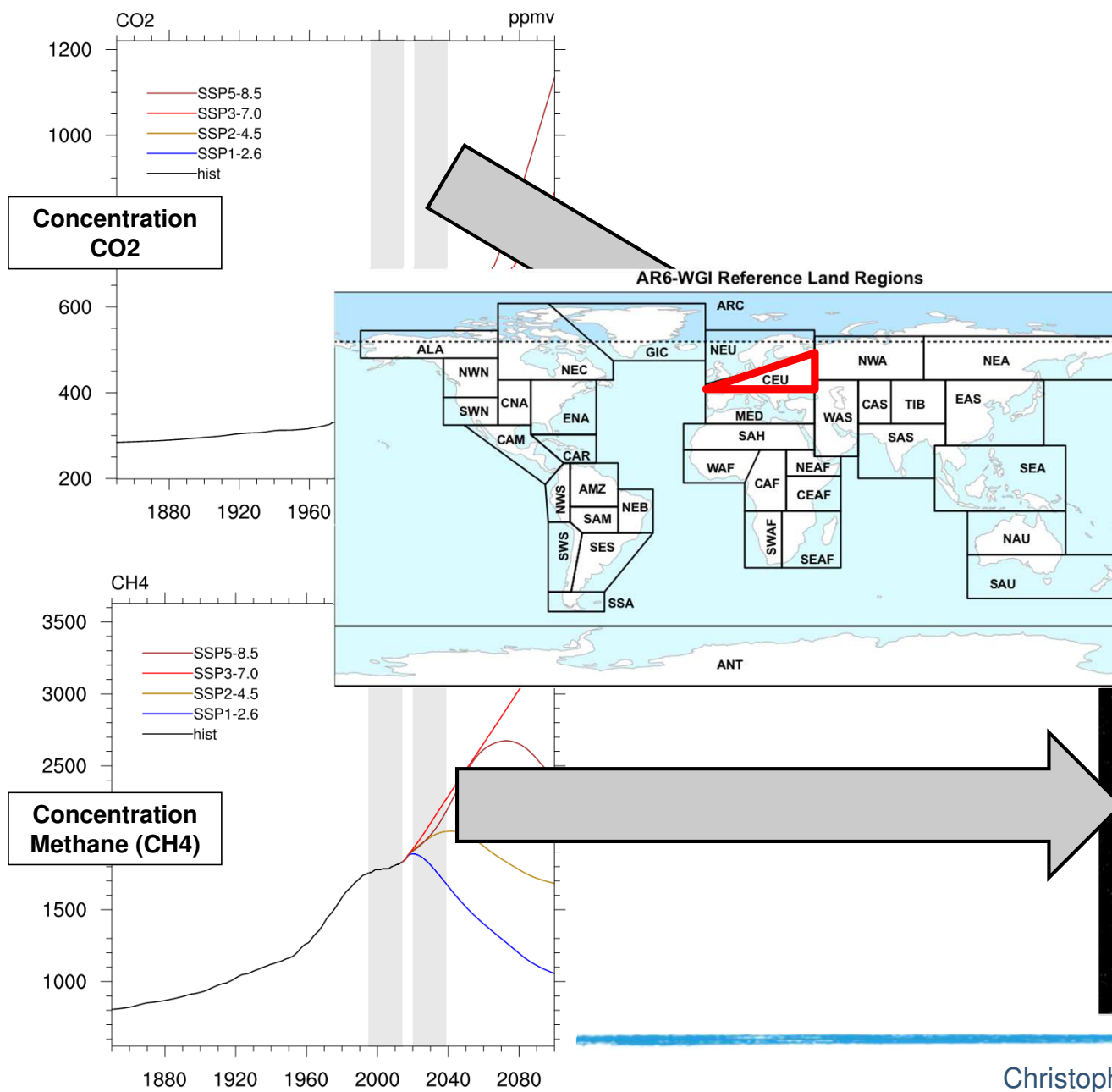


Concentration en gaz à effet de serre +aérosols



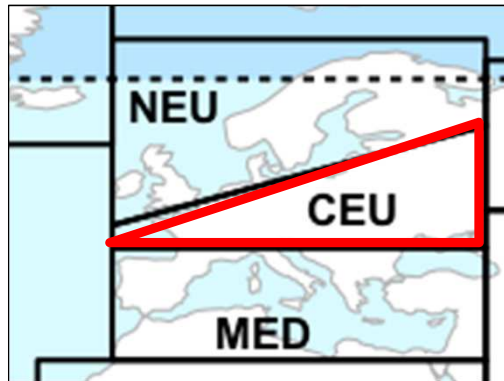
3. Les futurs climatiques

Des ssp aux forçages climatiques (2)

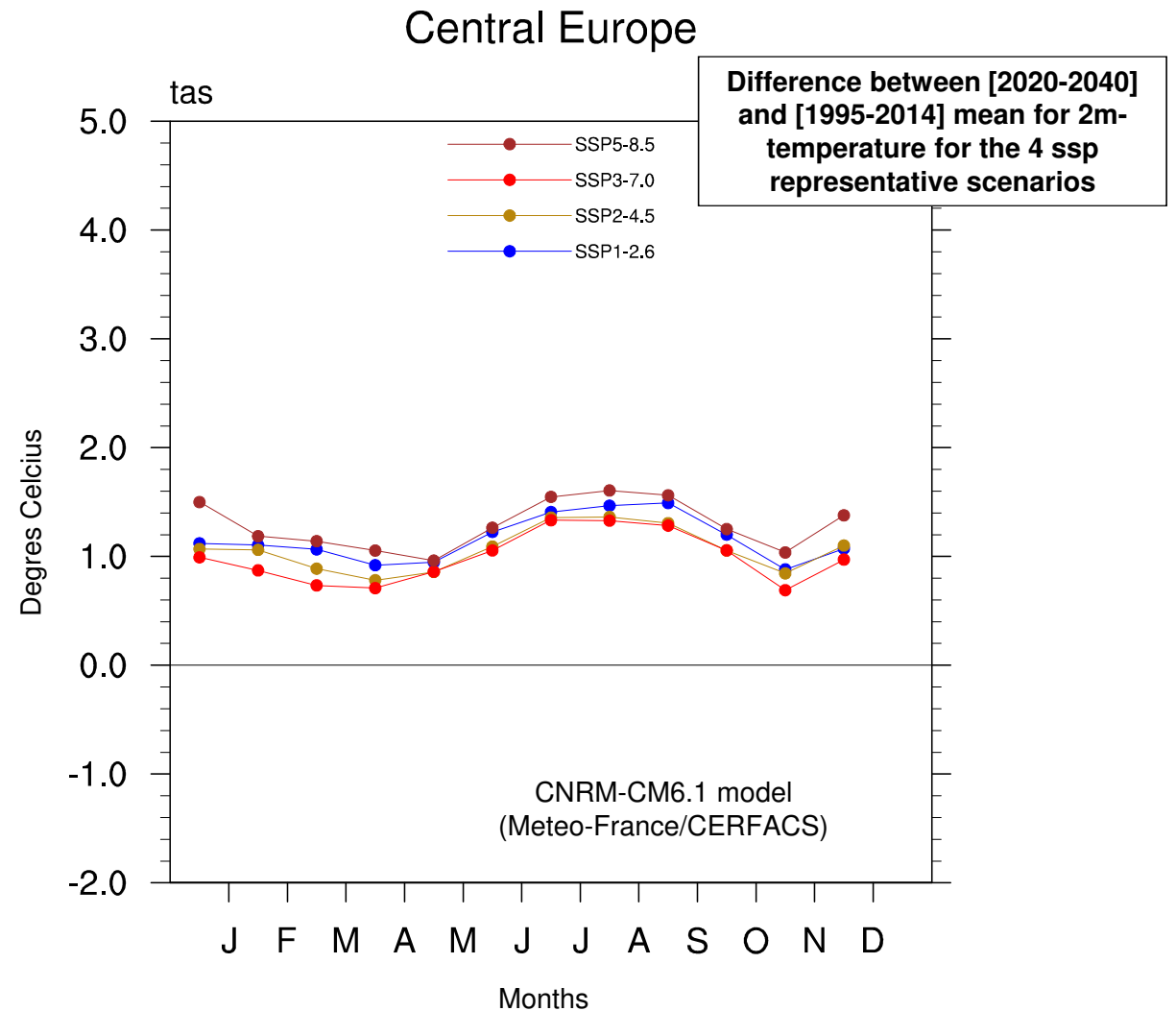


3. Les futurs climatiques

Changements des Temp. moyennes sur 2020-2040



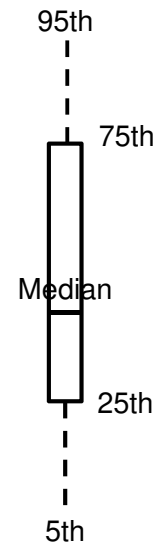
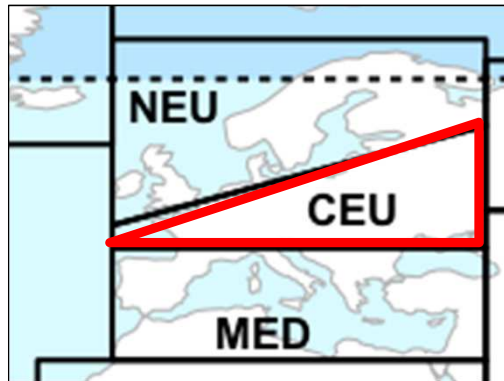
- **Saisonnalité du réchauffement**
- **Différences faibles mais significatives entre les différents scénarios p/r aux changements historiques observés au 20^e siècle.**



Source: Line et al. (2020), in preparation

3. Les futurs climatiques

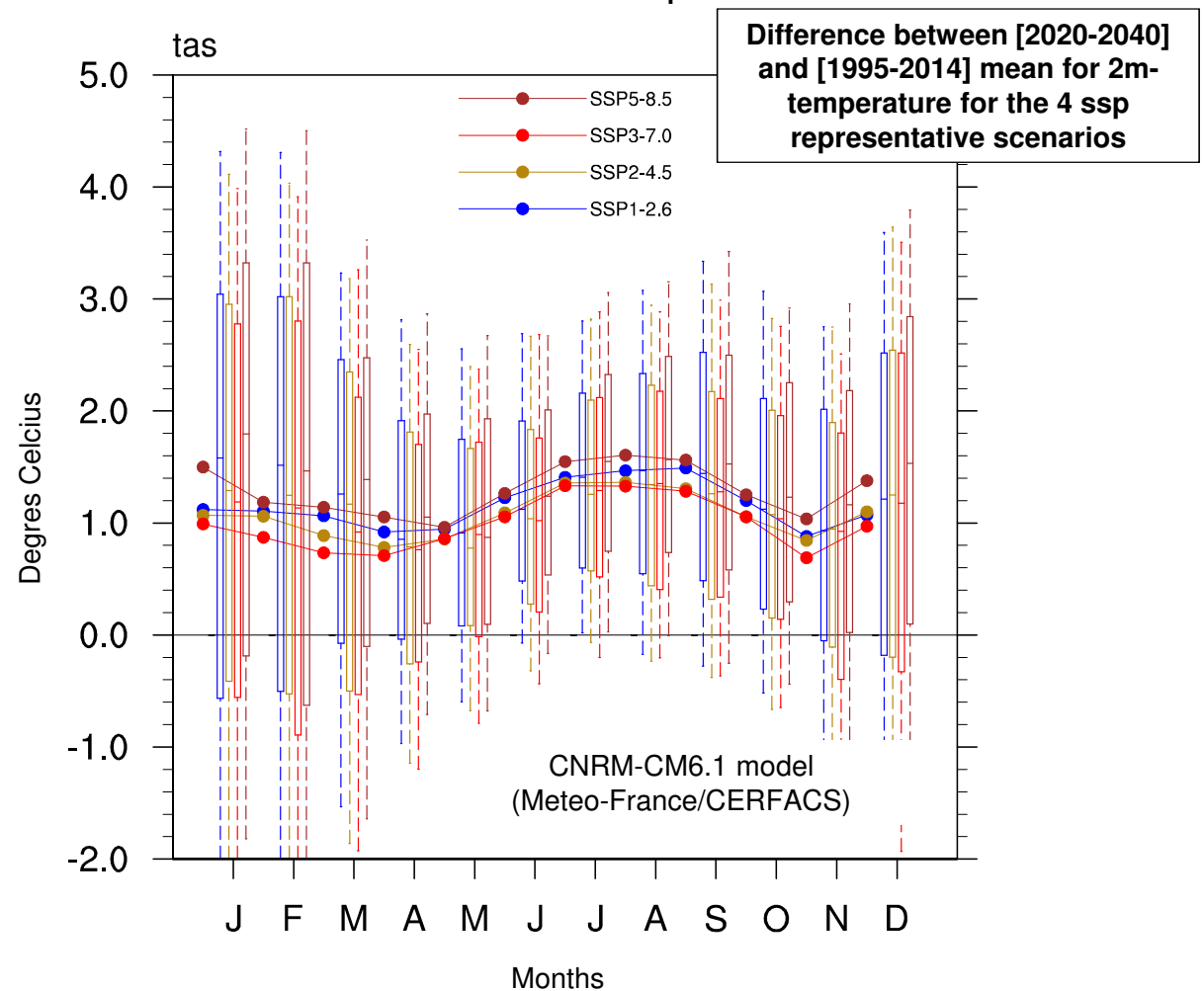
Incertitude irréducible due à la variabilité interne



Approche ensembliste: réalisation de 30 simulations d'un même scénario, chaque simulation différant par leurs conditions initiales.

Forte variabilité interne sur l'Europe Centrale, en particulier en hiver

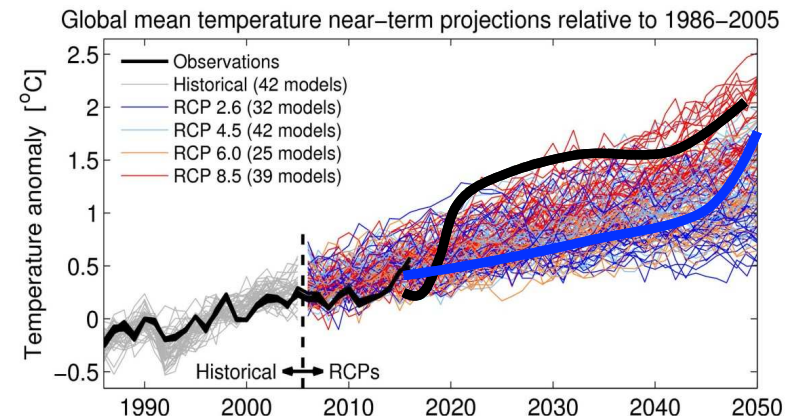
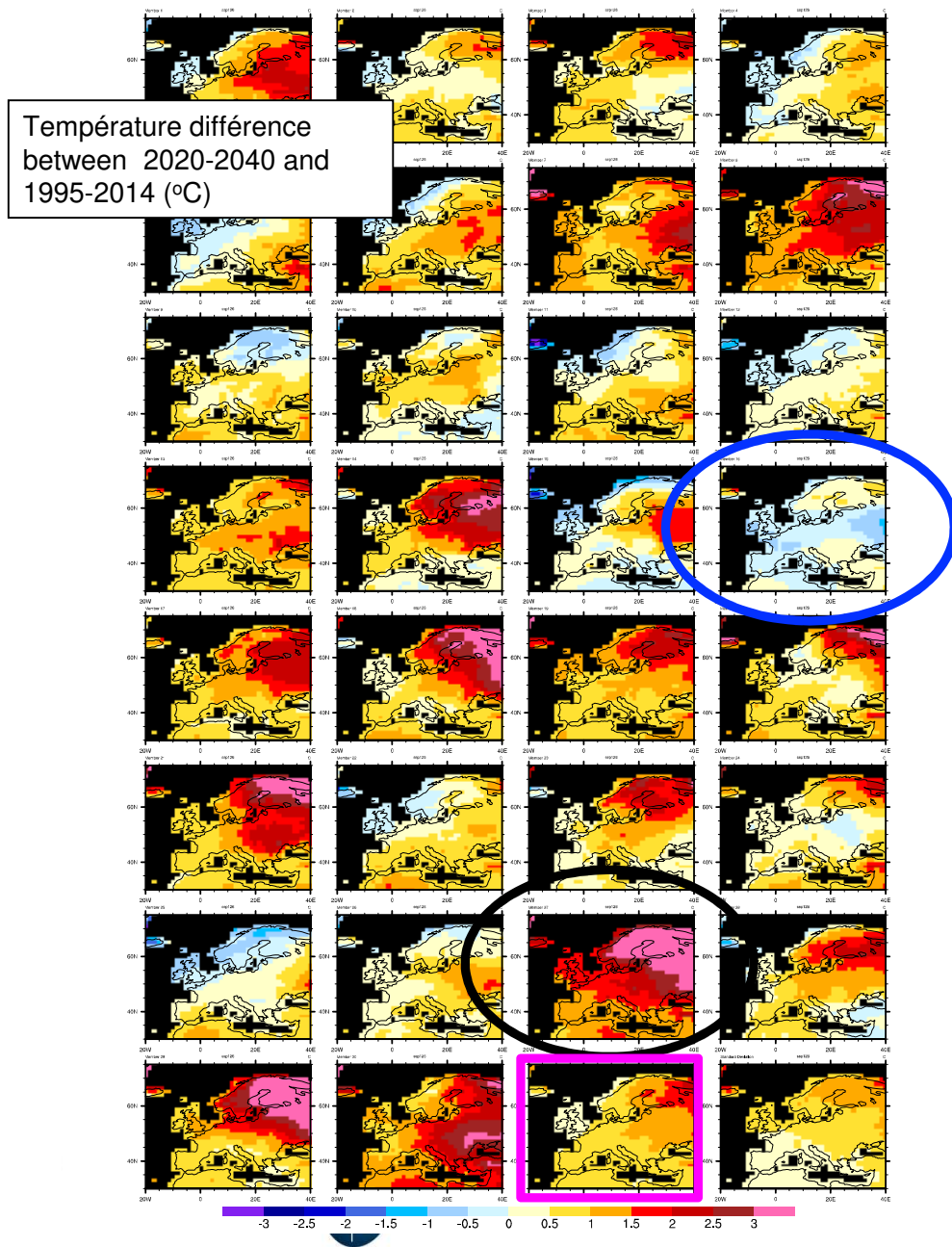
Central Europe



Source: Line et al. (2020), in preparation

3. Les futurs climatiques

Empreinte de la variabilité interne en Europe en hiver

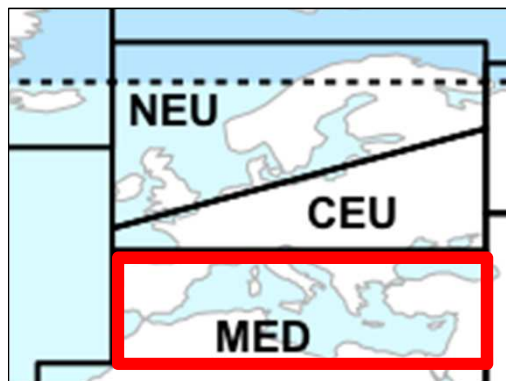


- Moyenne = $+0.94^{\circ}\text{C}$
==> Réponse du système climatique aux forçages externes (estimée à partir d'un grand ensemble du modèle CNRM-CM6.1)
- Min = -0.09°C // Max = $+2.22^{\circ}\text{C}$
==> Intervalle associé aux modes internes de variabilité décennale qui peuvent ou moduler ou accélérer le réchauffement d'origine anthropique.

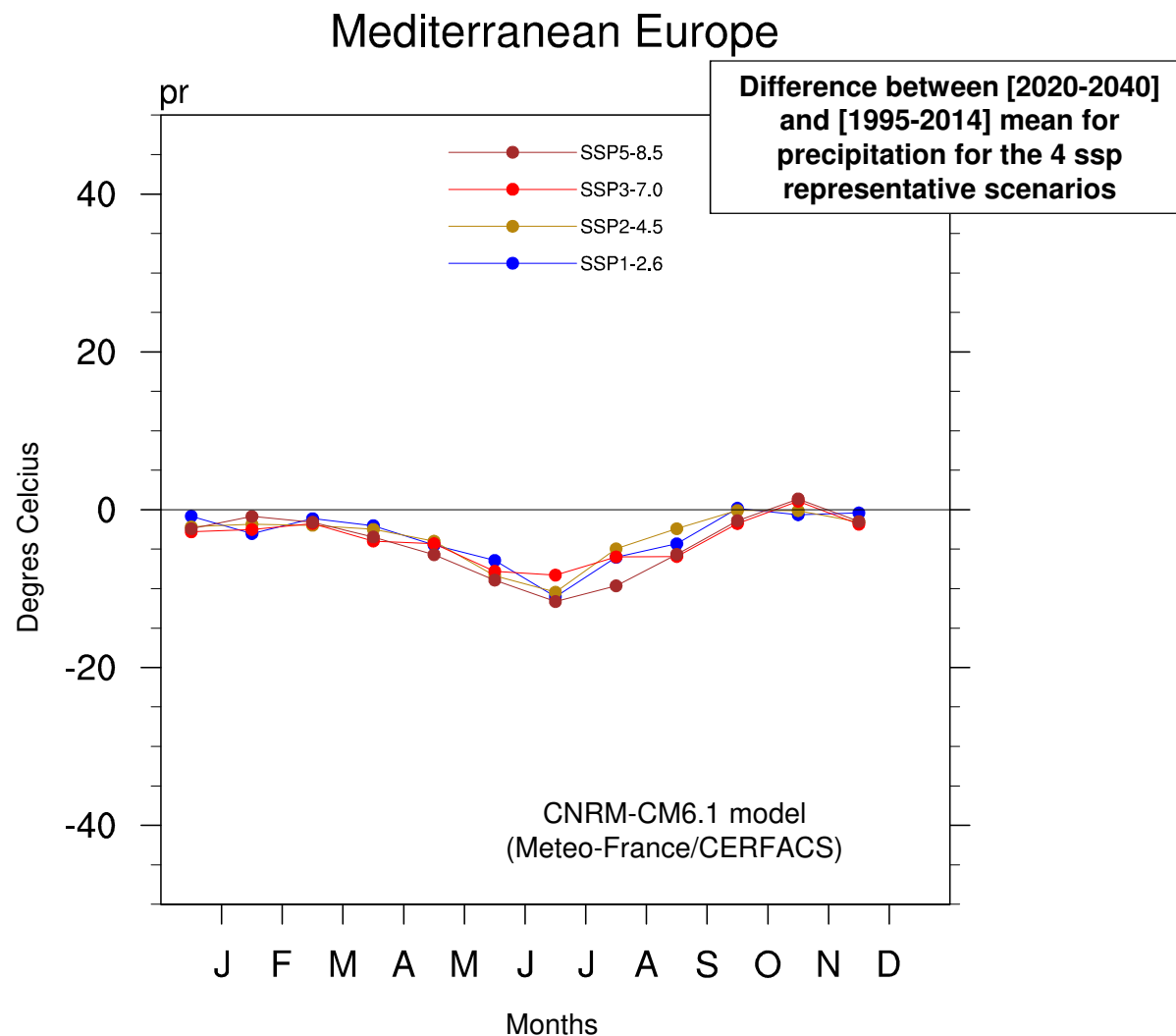
Source: Line et al. (2020), in preparation

3. Les futurs climatiques

Changements des Précip. moyennes sur 2020-2040



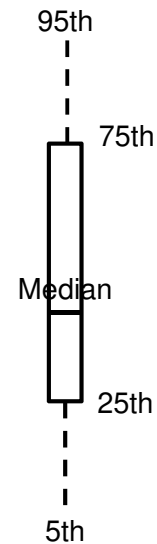
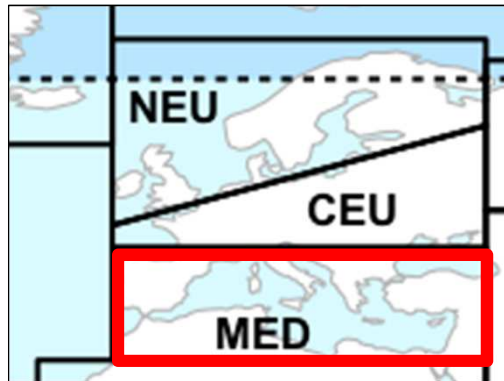
- Pas de changement significatif en hiver mais une réduction significative en été.
- Pas de dépendance aux scénarios (besoin d'adaptation)



Source: Line et al. (2020), in preparation

3. Les futurs climatiques

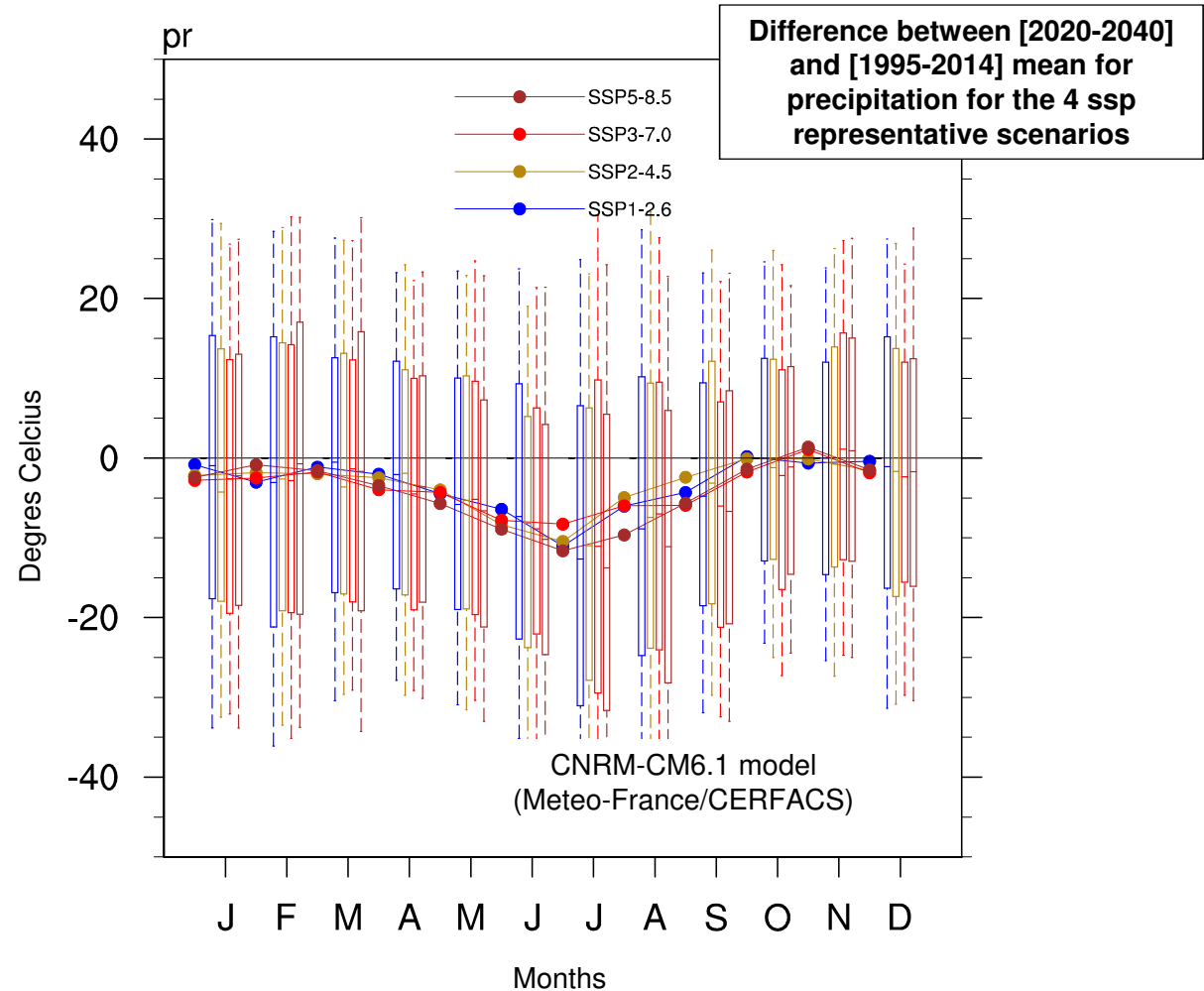
Incertitude irréductible due à la variabilité interne



Approche ensembliste: réalisation de 30 simulations d'un même scénario, chaque simulation différant par leurs conditions initiales.

Forte variabilité interne sur l'Europe méditerranéenne se superposant à un assèchement moyen en été

Mediterranean Europe

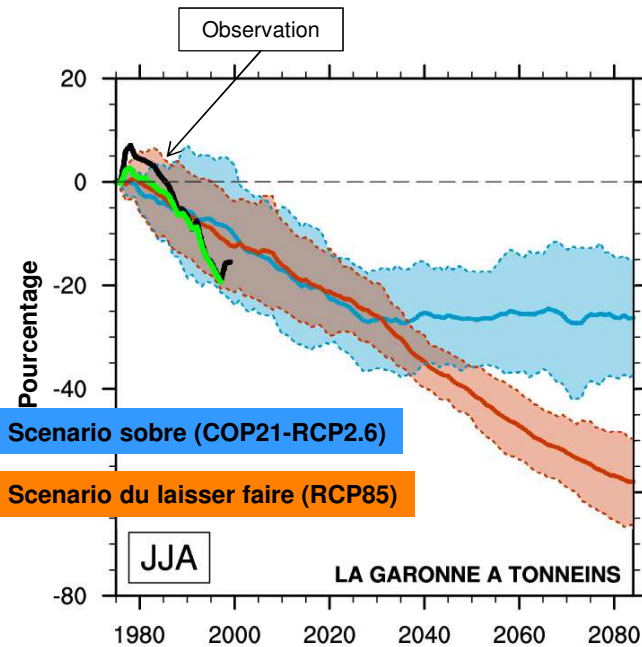


Source: Line et al. (2020), in preparation

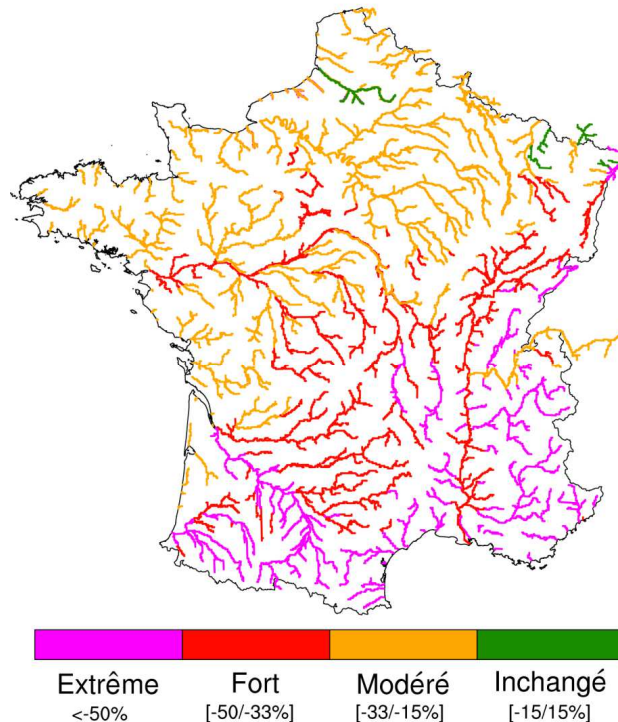
3. Les futurs climatiques

Impacts sur les rivières/neige en France a long terme

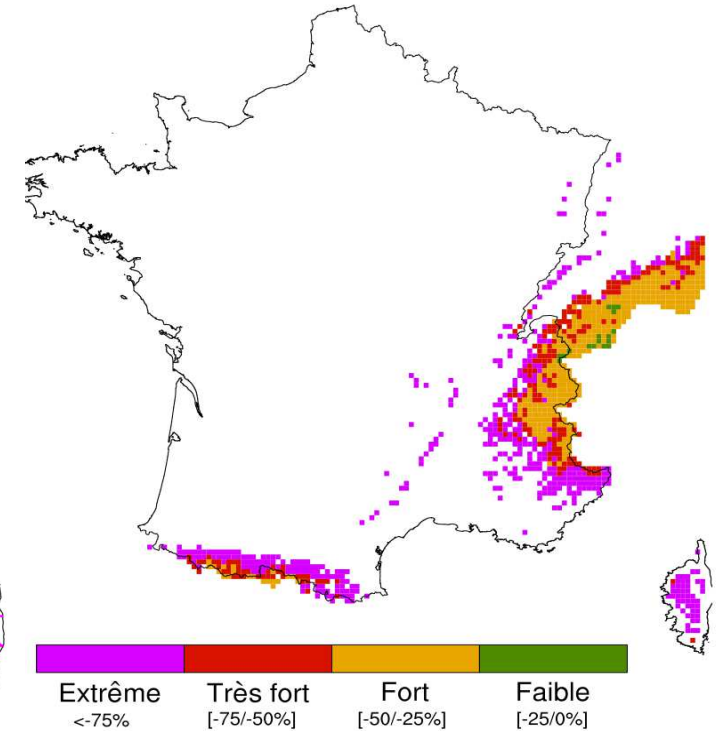
Change in Garonne river flow estimated from 2 scenarios in summer



Change in summer river flow in 2070



Change in snow cover in 2070



Débits d'étiage de la Garonne » diminution de ~30% à partir de 2030 quel que soit le scénario et de + de 50% à partir de 2050 dans le scénario du laisser-faire

Diminution extrême de l'enneigement en moyenne montagne (~1500m) : -75% de jours enneigés

Impacts considérables sur les ressources en eau (pour l'agriculture, la sécurité alimentaire, le management de l'énergie, etc)

Source: These de G. Dayon (2016)

Conclusions

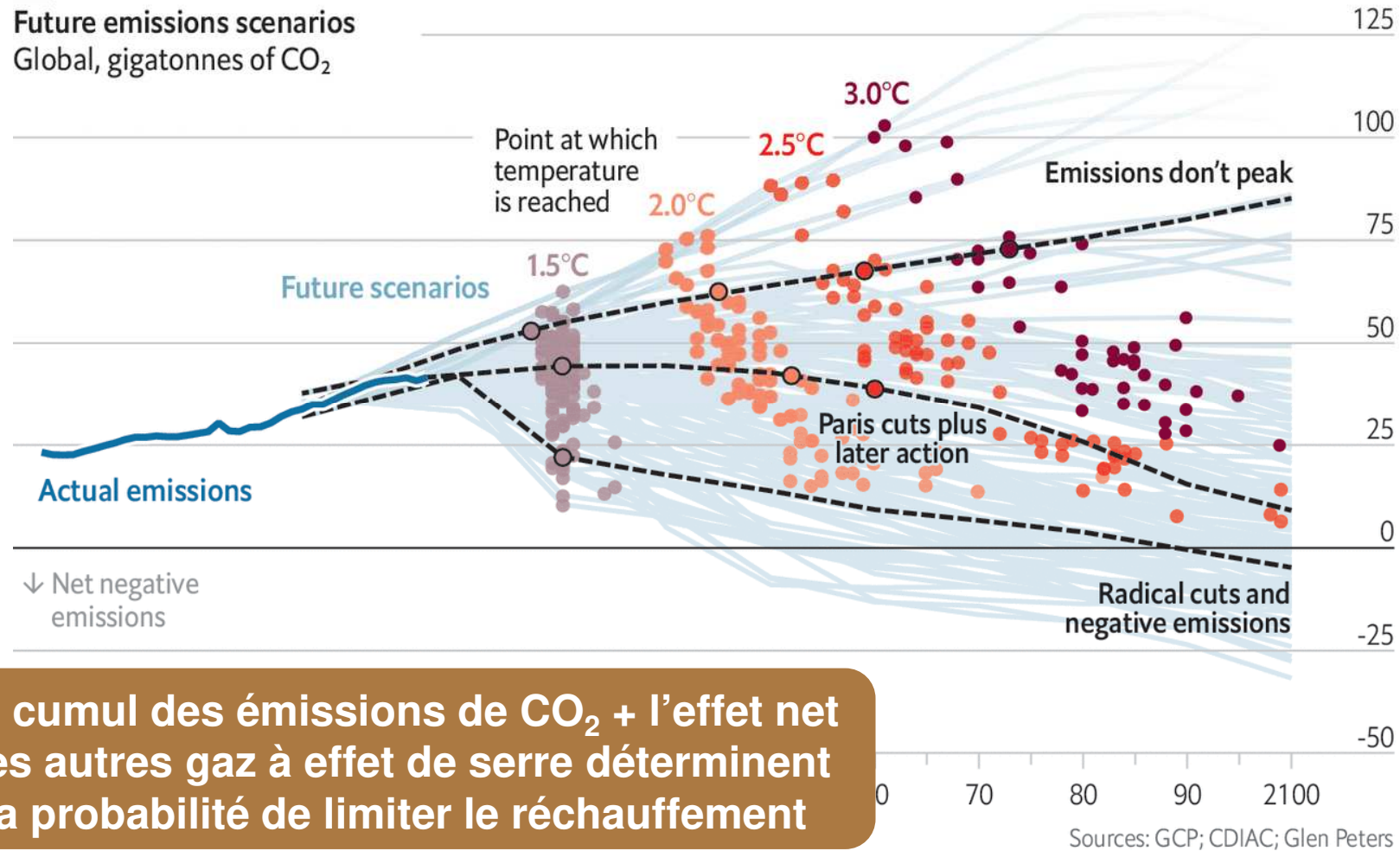
Pour limiter le réchauffement global, les derniers rapports spéciaux du GIEC (1.5°C, Land, Ocean-cryosphere) affirment le besoin urgent d'agir.

Les actions doivent être rapides, coordonnées et inédites à tous les niveaux de la société pour éviter les impacts catastrophiques et réduire les risques de dépasser des seuils de non-résilience pour les sociétés, les écosystèmes terrestres et marins.

4. Que visons nous? Ou allons nous vraiment?

Seuils de Température en fonction des émissions

Scenarios for future CO₂ emissions, with three representative pathways picked out



Le cumul des émissions de CO₂ + l'effet net des autres gaz à effet de serre déterminent la probabilité de limiter le réchauffement

The Economist

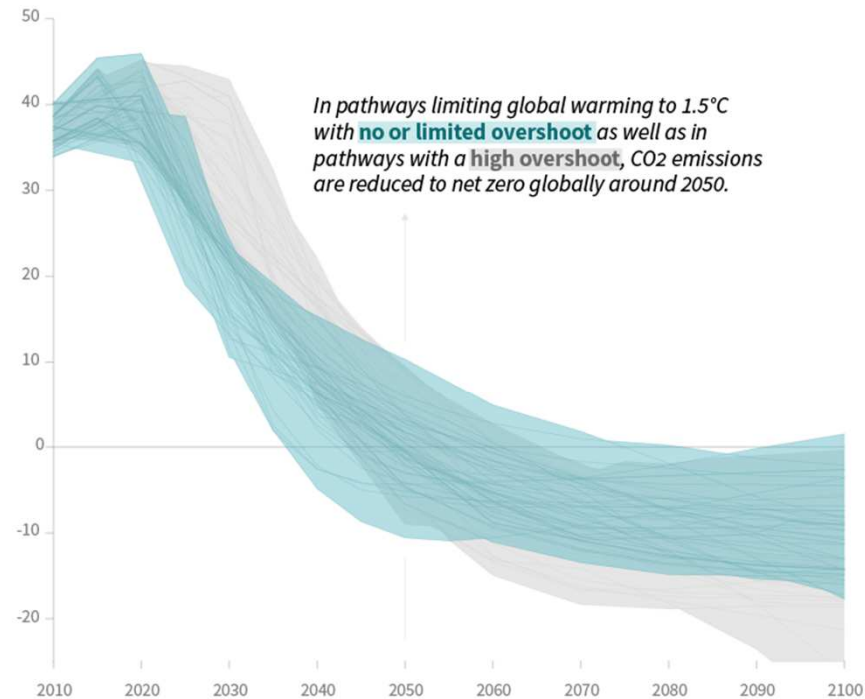
4. Que visons nous? Ou allons nous vraiment?

Trajectoires d'émission compatible avec la cible +1.5°C

Source: IPCC SR15

Global total net CO₂ emissions

Billion tonnes of CO₂/yr

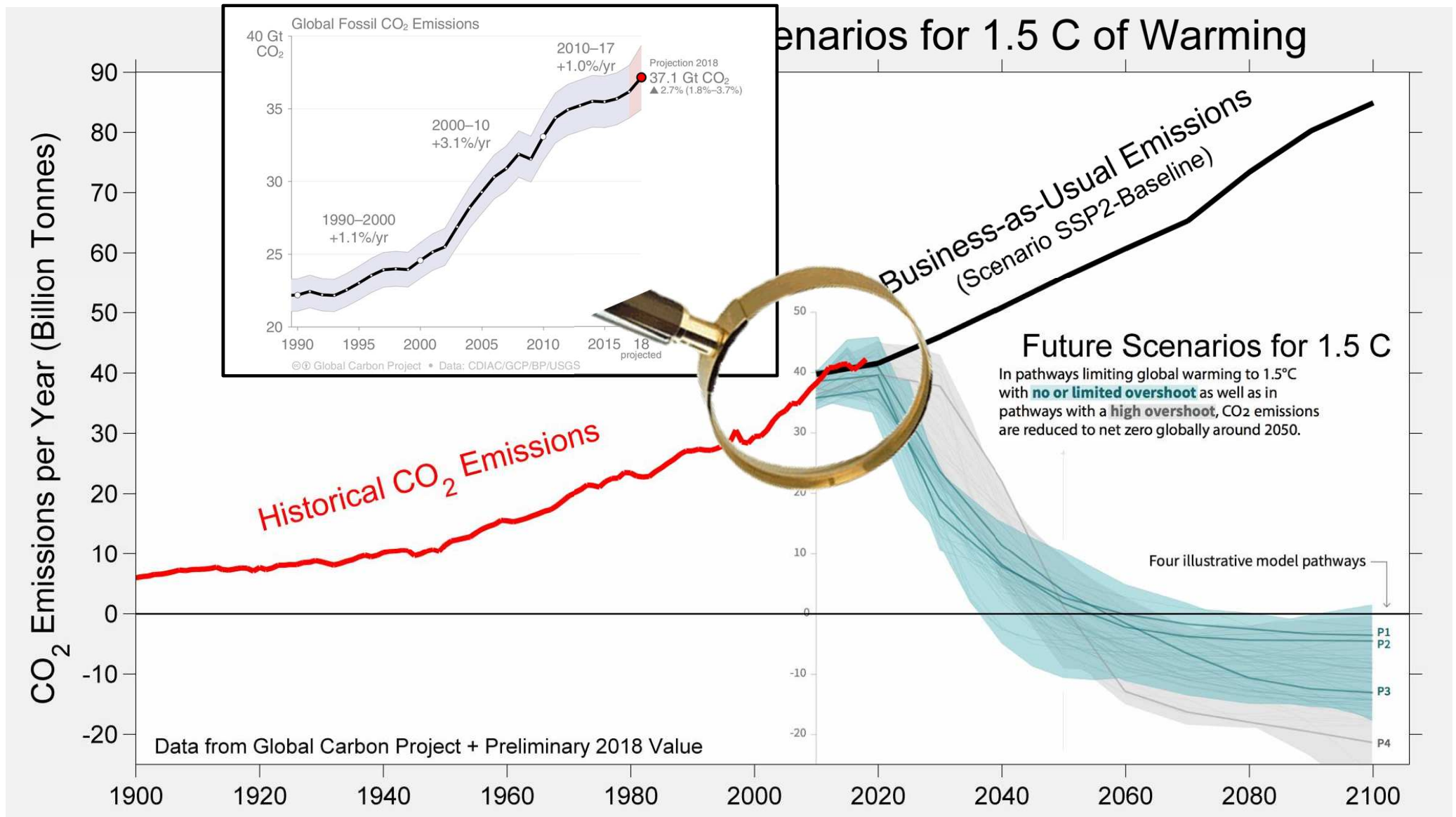


Timing of net zero CO₂
Line widths depict the 5-95th percentile and the 25-75th percentile of scenarios



4. Que visons nous? Ou allons nous vraiment?

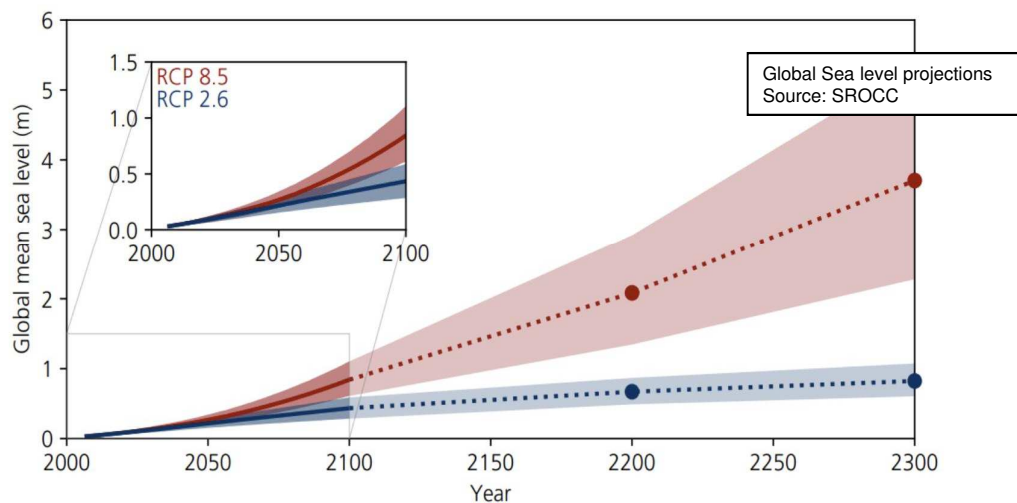
Trajectoires d'émission compatible avec la cible +1.5°C



4. Que visons nous? Ou allons nous vraiment?

Conclusions

- Les rapports GIEC : « chaque fraction de degré compte, chaque année compte, chaque décision et action compte »
- Mais il y a un **hiatus** entre les cibles de température et les émissions effectives de GES. Les contributions nationales de 2015 COP21 et révisées depuis conduisent à un réchauffement entre [2.7- 3.5°C] pour 2070-2100, alors que l'accord de Paris acte le niveau +2°C.
- Les actions de la France ne sont compatibles avec l'accord de Paris (2x trop lent), avec des obstacles à tous les niveaux décisionnels (voir le rapport du Haut Conseil pour le Climat)
- Le changement climatique n'est **pas** seulement un problème technique: il correspond à des enjeux **politiques/sociétaux** qui incluent donc les questions sociales, de justice, d'équité, et de justice au niveau **local et international**.



L'incertitude dans toute spéculation ne nous condamne-t-elle pas à l'action, et l'action ne nous oblige-t-elle pas à l'espoir?

Jean Bédard (essayiste, romancier et philosophe québécois)



Merci pour votre attention

Messages clés

❑ **Agir vite**

- Il est urgent d'agir ... pour se donner du temps
- Les actions de court terme conditionnent les options à plus long-terme
- **Préparer la neutralité carbone**

❑ **Agir au sein de stratégies systémiques et articulées**

- Quelles transformations en fonction des spécificités de chaque contexte
- Combinaison d'instruments et d'actions au service des transformations

❑ **Agir de façon coordonnée entre acteurs**

- Le gouvernement national est essentiel mais besoin d'une action coordonnée pour optimiser tous les leviers

❑ **Agir de façon coopérative à l'échelle globale, inclusive et juste à toutes les échelles**

- Finance, investissements, technologies, capacités...