CERFACS

CENTRE EUROPÉEN DE RECHERCHE ET DE FORMATION AVANCÉE EN CALCUL SCIENTIFIQUE

Conseil Scientifique - Agence Adour-Garonne

Etat de la planète en 2020, Quid des décennies futures?

Christophe CASSOU

Directeur de Recherche au CNRS,
Auteur du 6eme rapport du GIEC 2021-2022,
CERFACS, Université de Toulouse

cassou@cerfacs.fr

@cassouman40

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 »

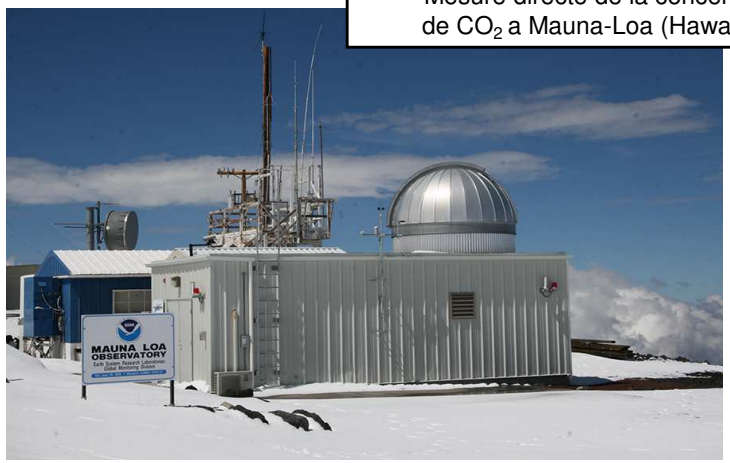
- « Le changement climatique » est un défi urgent qu'il faut relever ici et maintenant avec des actions et des stratégies claires à adopter sans délai, face à la menace maintenant évidente de déstabilisation mondiale des sociétés futures: les enjeux sont de nature démocratique.

Concentration de CO_2 observée il y a 10 jours (7 Sept)

Latest CO_2 reading: 411.43 ppm

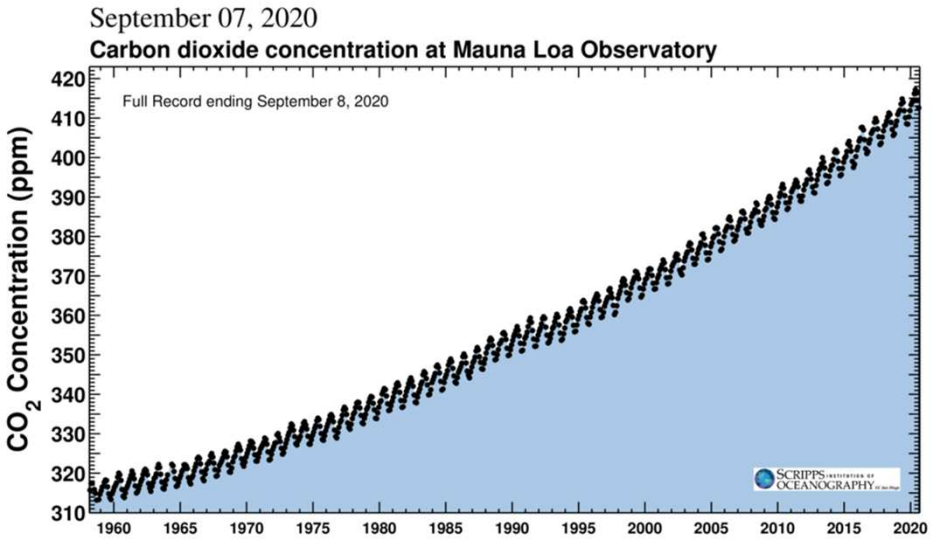
September 07, 2020
Carbon dioxide concentration at Mauna Loa Observatory

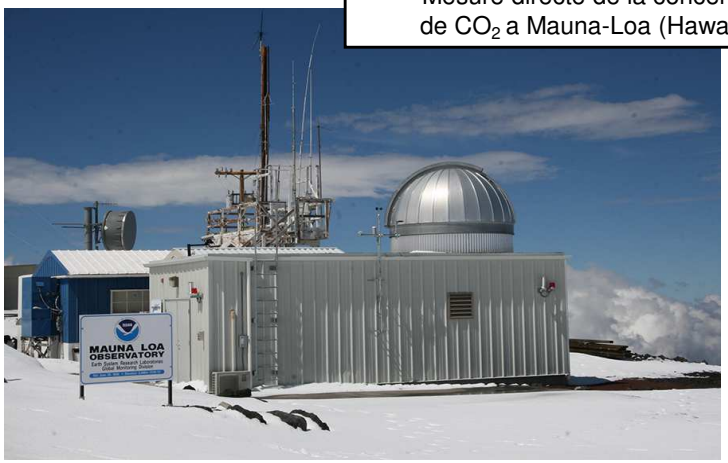
Mesure directe de la concentration de CO_2 a Mauna-Loa (Hawaii –US)



Concentration de CO_2 depuis 1958

Latest CO_2 reading: 411.43 ppm

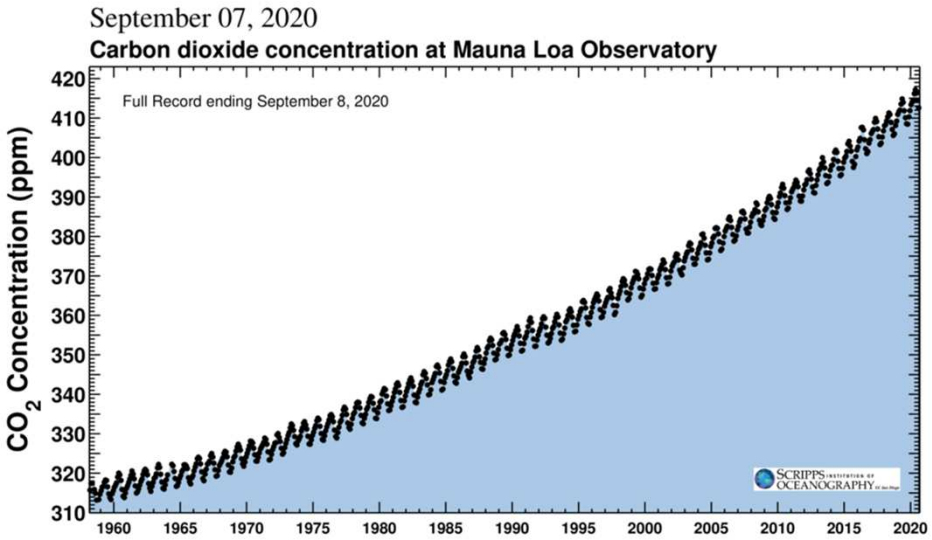


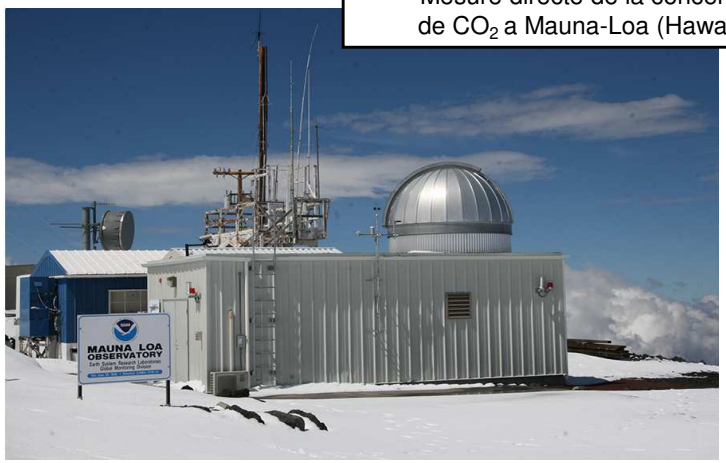


Mesure directe de la concentration de CO_2 a Mauna-Loa (Hawaii –US)

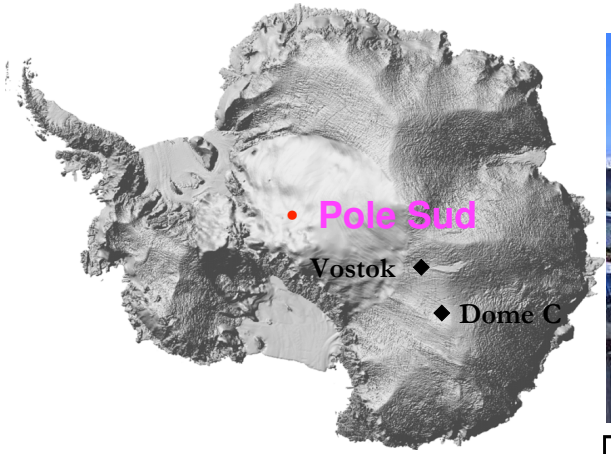
Concentration de CO_2 depuis …

Latest CO_2 reading: 411.43 ppm





Mesure directe de la concentration de CO_2 a Mauna-Loa (Hawaii –US)





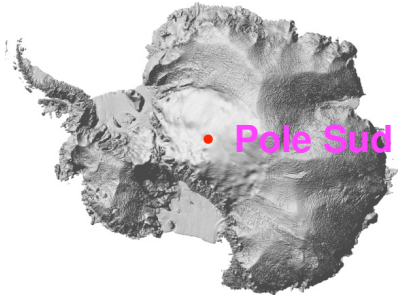




Carottage a DOME C (Antarctique)

Source des photos: CEA

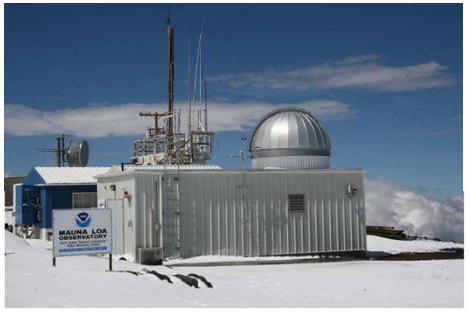
Concentration de CO_2 depuis 400,000 ans

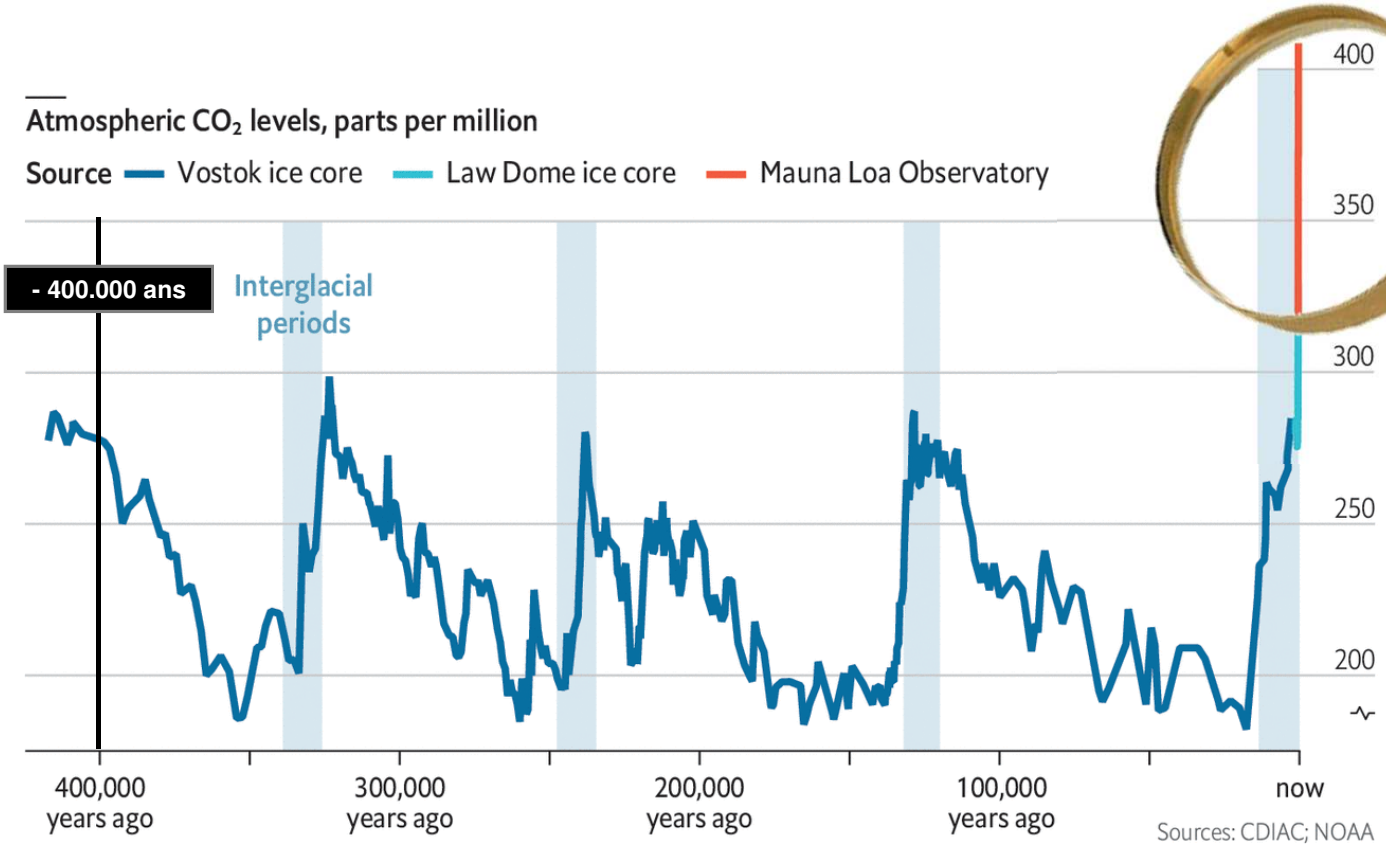


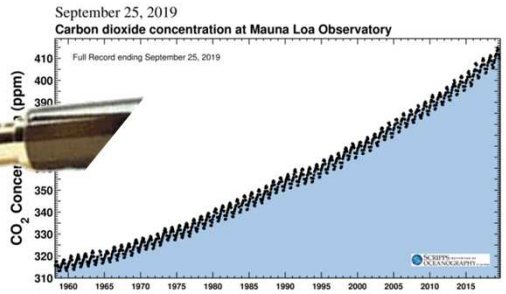




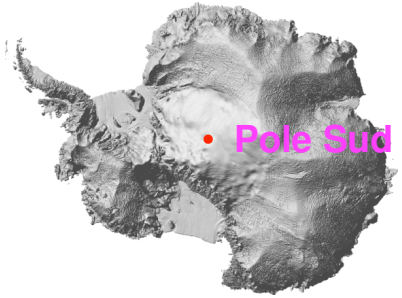








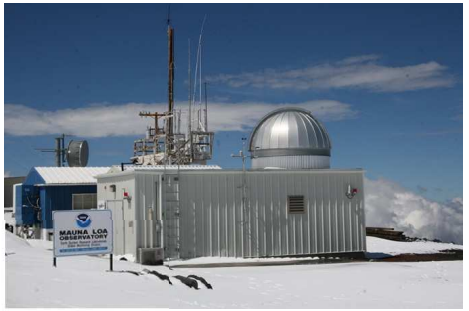
Concentration de CO_2 depuis ~1-million d'années

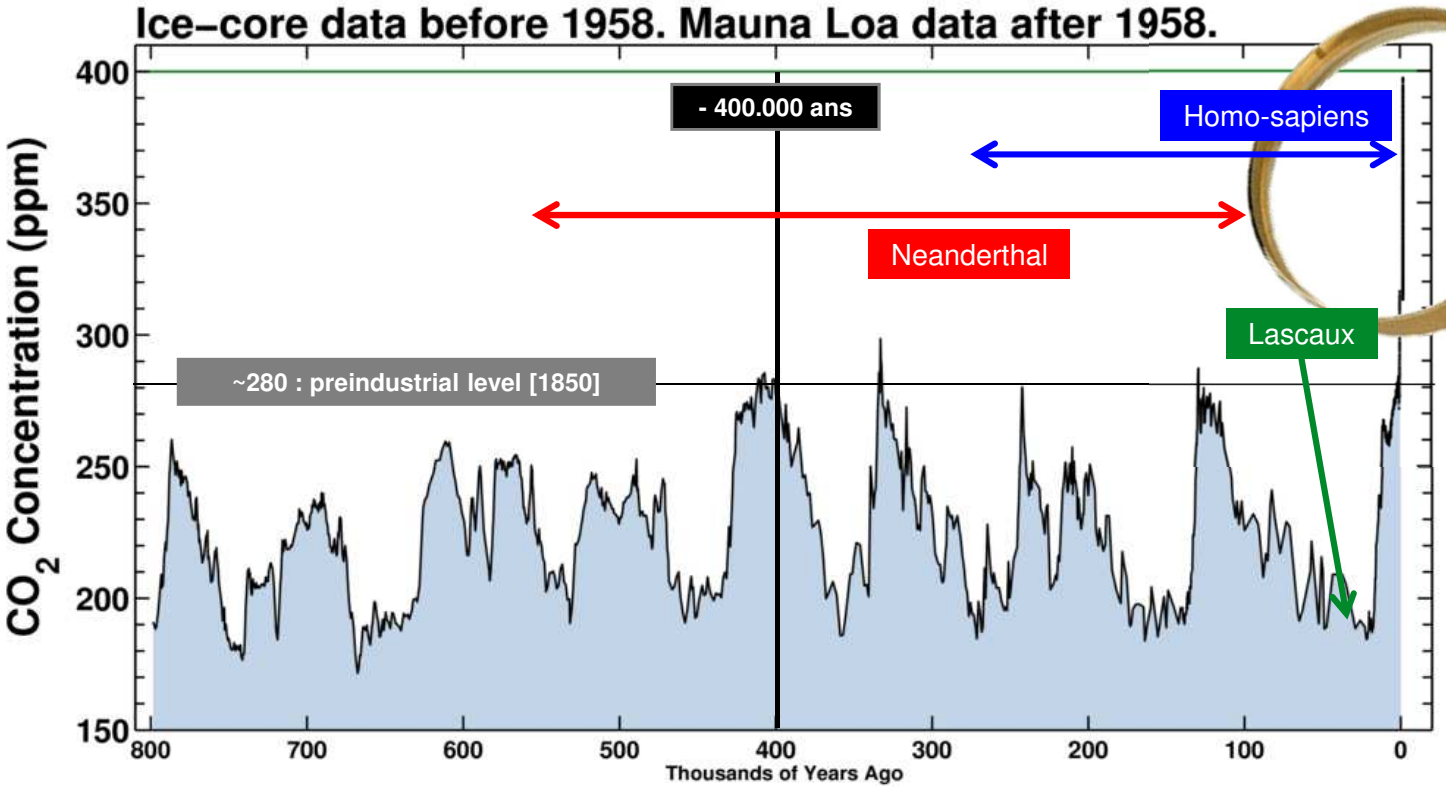


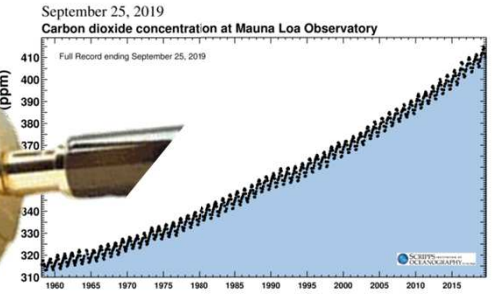










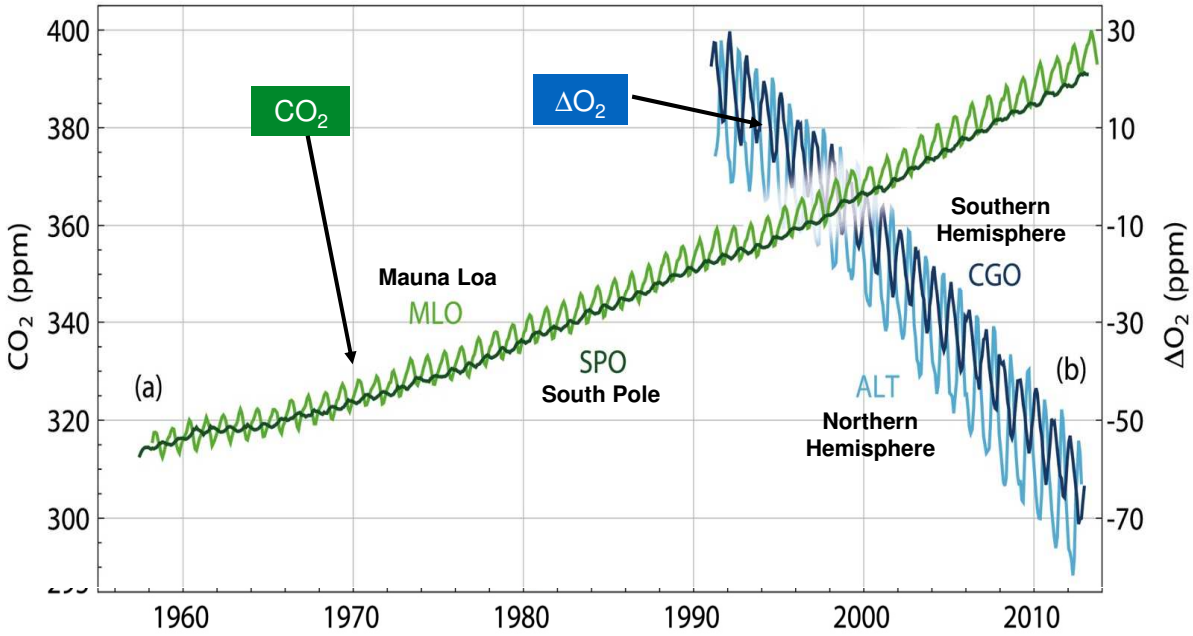


L'expérience LIVE de géo-engineering la plus grande, rapide et jusqu'alors incontrôlée à l'échelle de l'Homme

Source: Scripps institution of oceanography

1. Etat du climat en 2020

Preuve de l'origine anthropique de l'augmentation de CO_2 atmos.



Mesure directe de la concentration de CO_2 a Mauna-Loa (Hawaii –US)

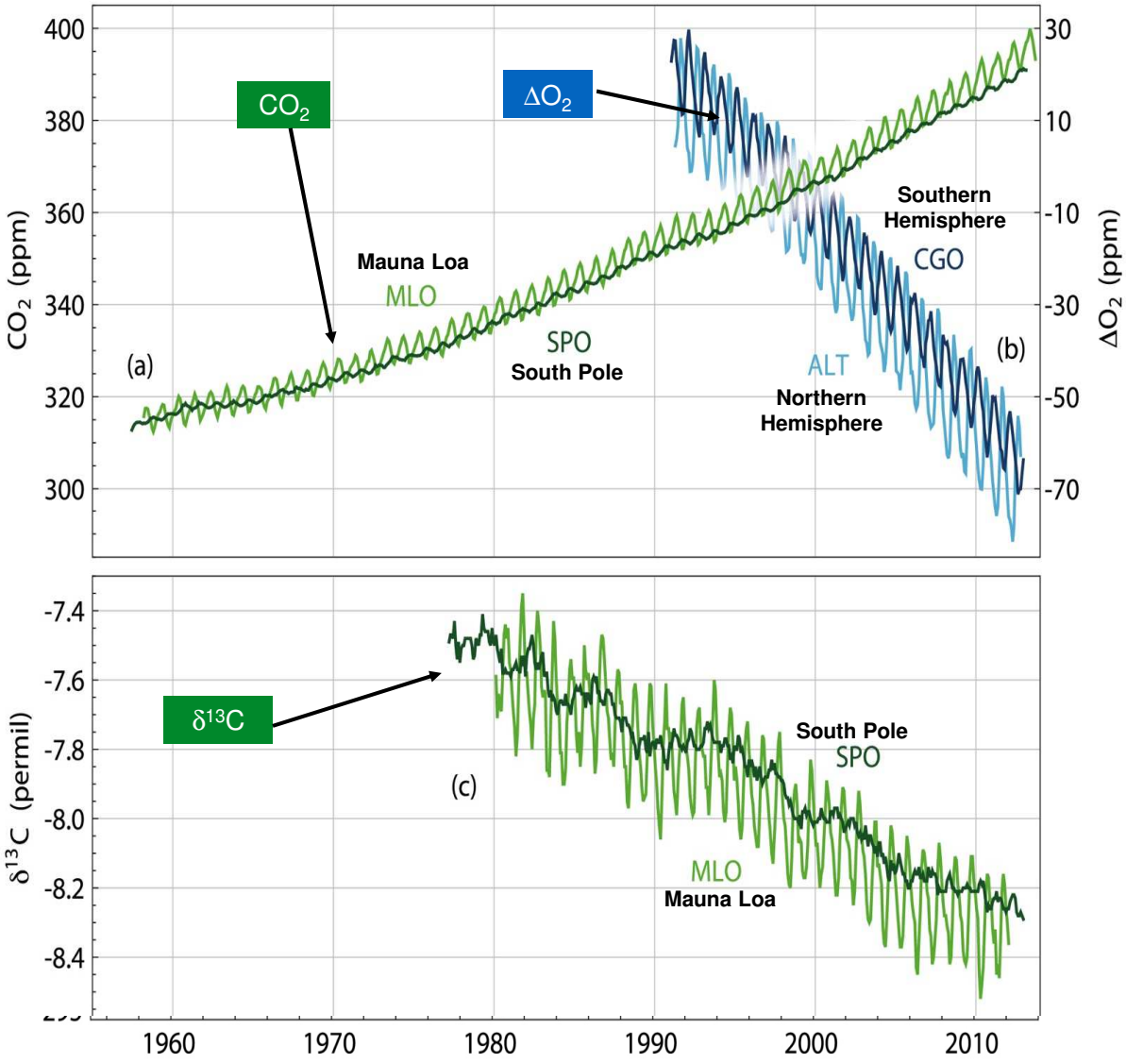


- **La concentration d'O_2 diminue à un taux compatible avec la combustion des énergies fossiles**

Source : IPCC-report AR5

1. Etat du climat en 2020

Preuve de l'origine anthropique de l'augmentation de CO_2 atmos.



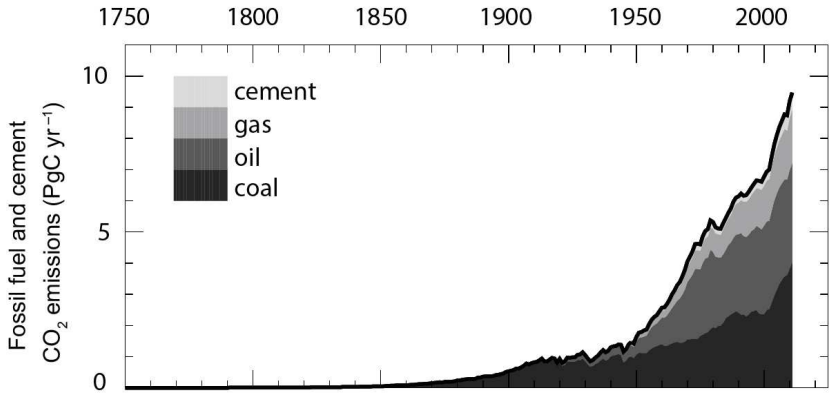
Source : IPCC-report AR5

Mesure directe de la concentration de CO_2 a Mauna-Loa (Hawaii –US)



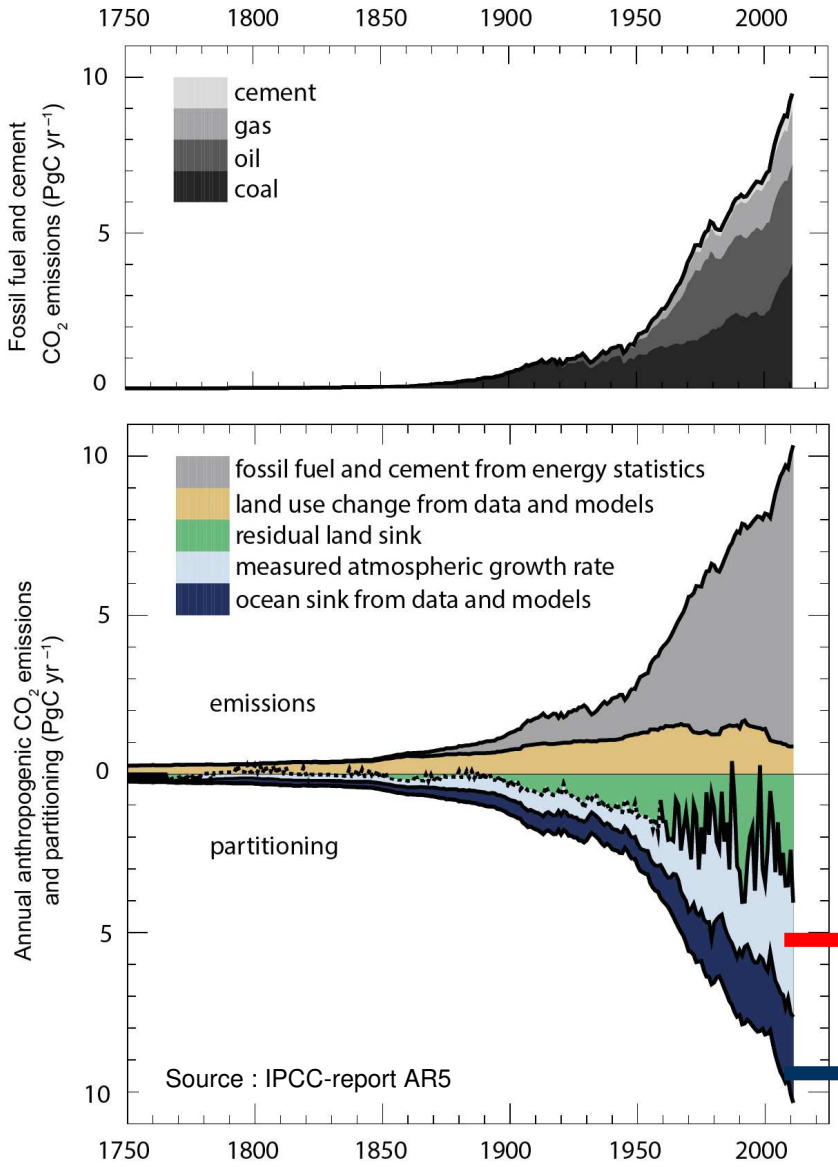
- **La concentration d'O_2 diminue à un taux compatible avec la combustion des énergies fossiles**
- **Le rapport isotopique observé entre ^{13}C et ^{12}C décroit et est cohérent avec les propriétés chimiques des énergies fossiles et de leur combustion**

Quelles sont les sources d'émissions de CO_2?

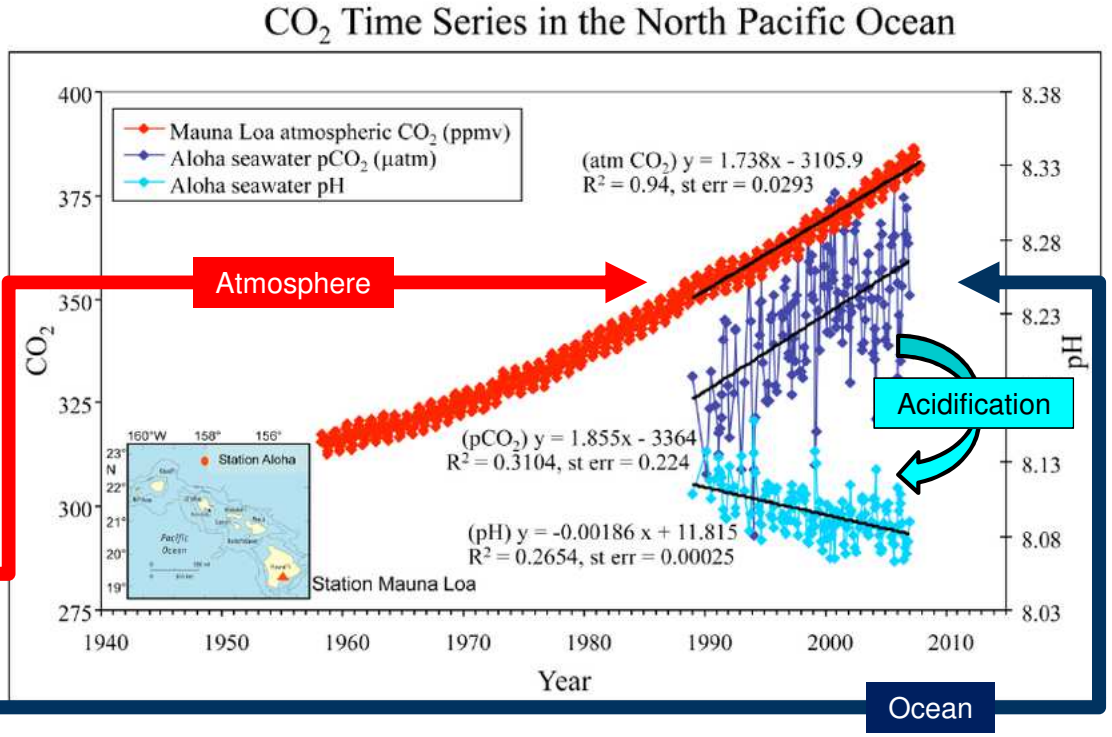


Source : IPCC-report AR5

Répartition de l'excès de CO_2 dans le système climatique



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

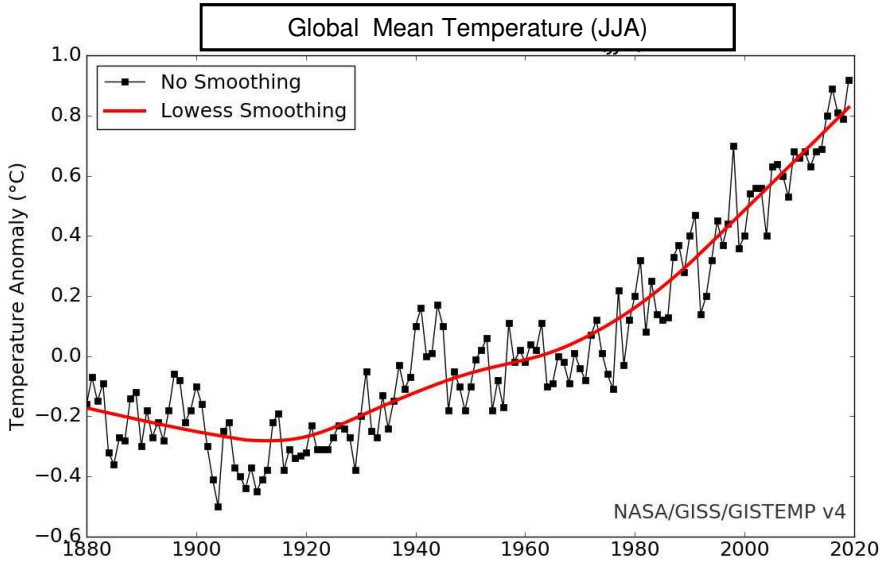


Source : data: Pieter Tans, NOAA/ESRL and David Karl, University of Hawaii (after Feely, 2008).

Conclusions

- Les émissions de CO_2 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

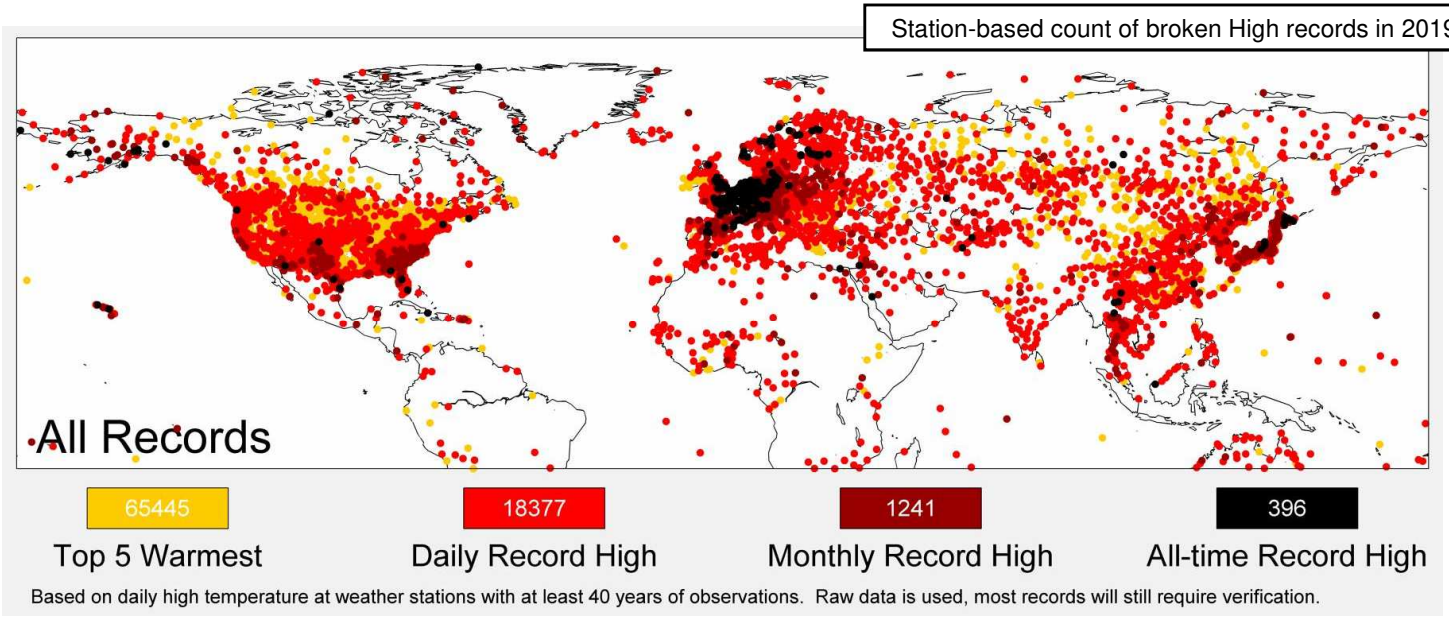
Températures estivales en 2019 à l'échelle globale



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

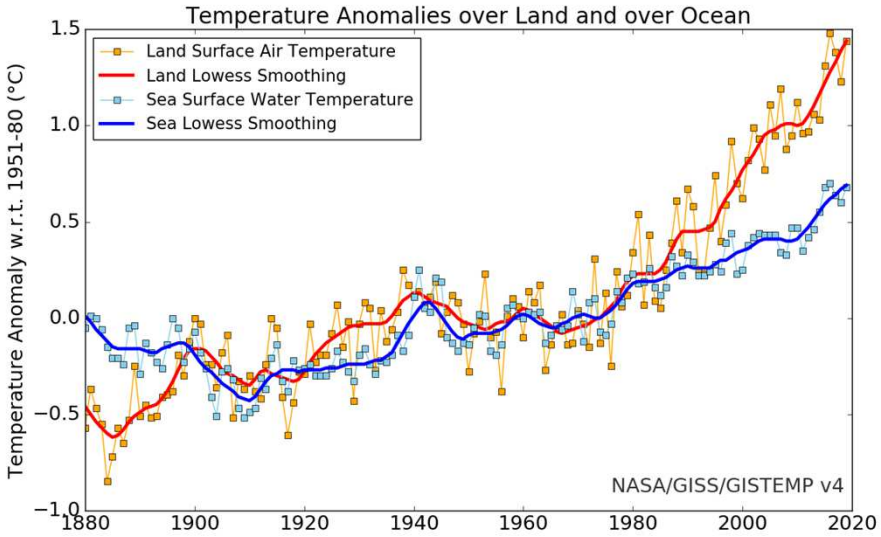
Top 1

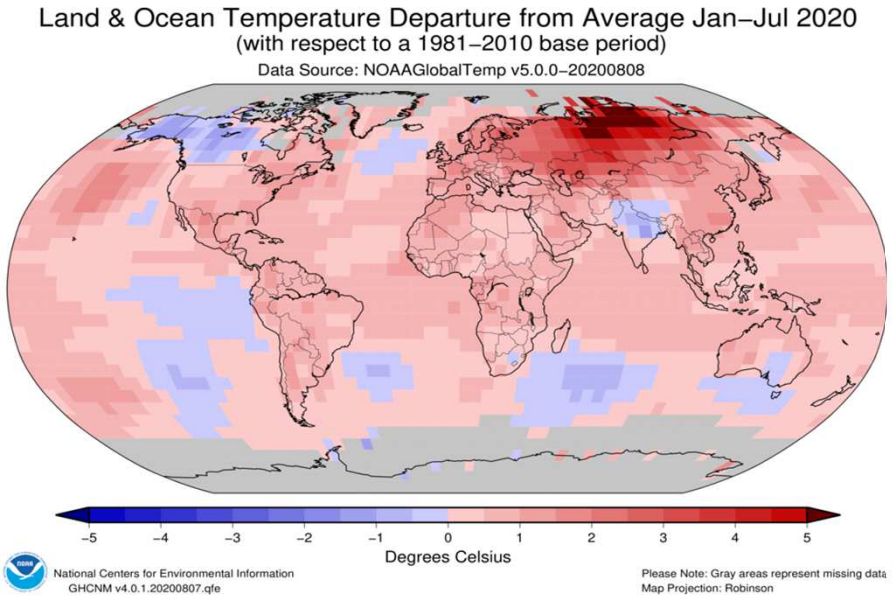
Probablement détrôné par 2020

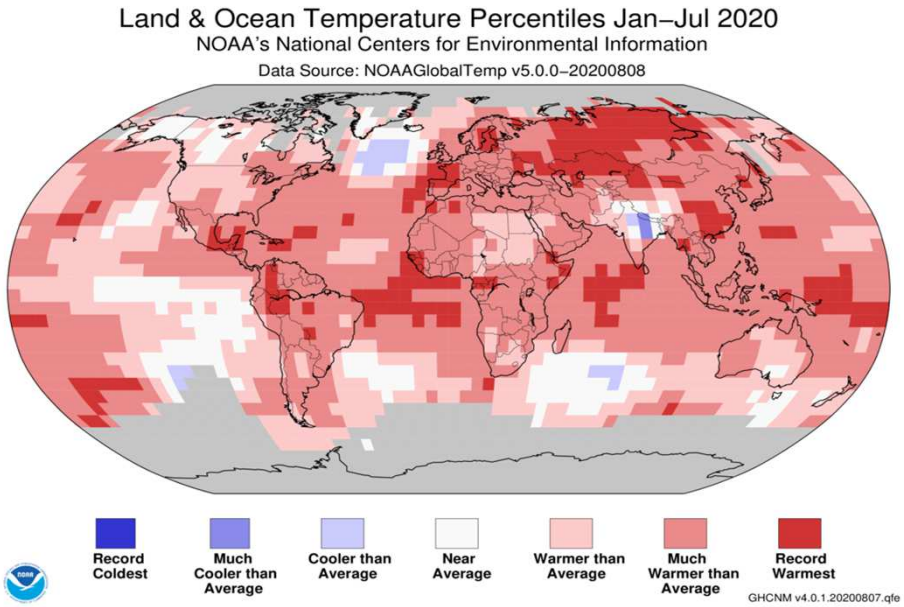


Source: @RaRodhe

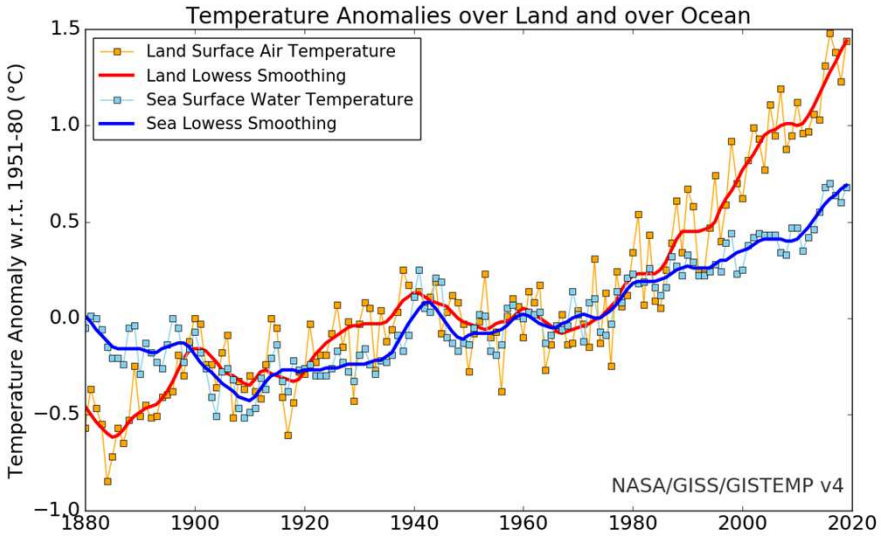
Evolution de la température globale depuis 1850

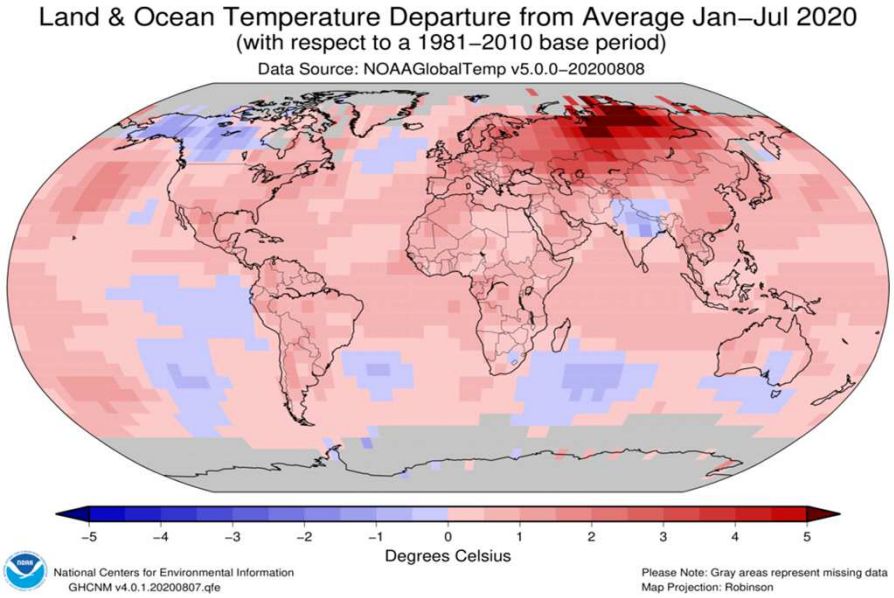


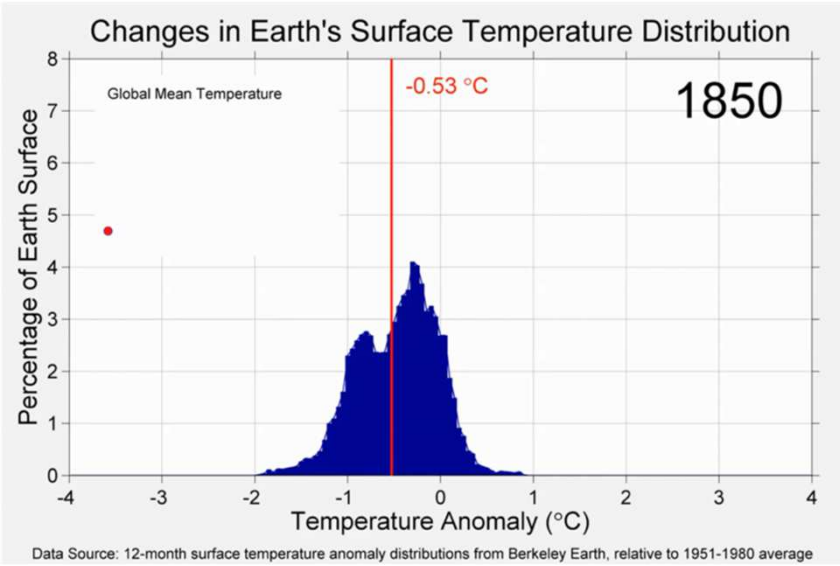




Evolution de la température globale depuis 1850

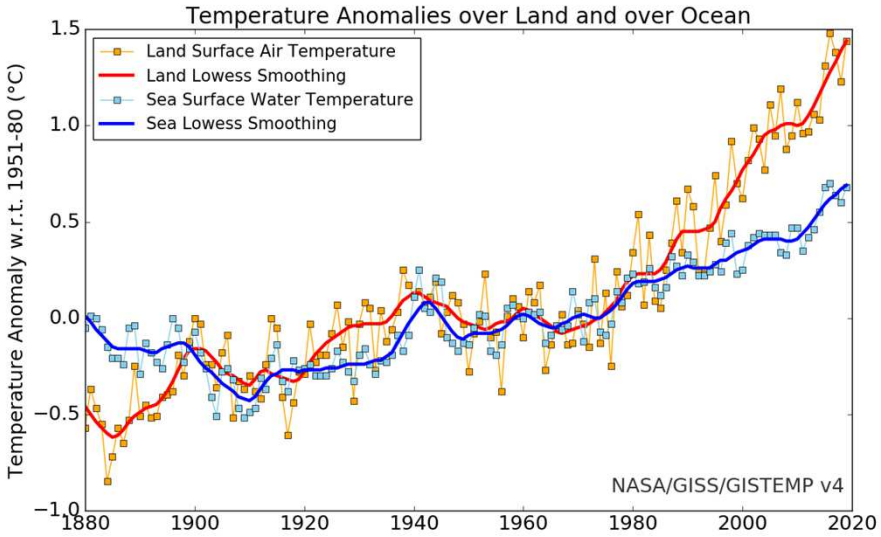




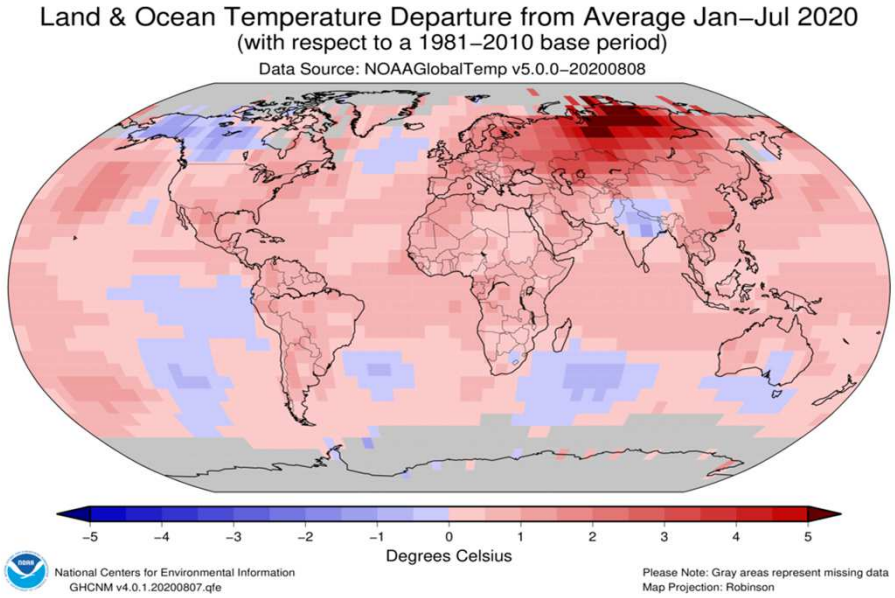


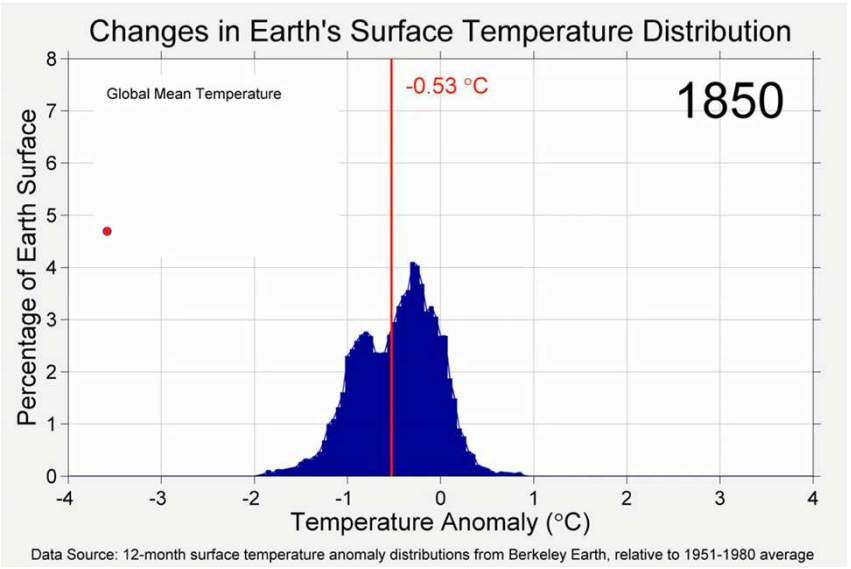
Source: @RaRodhe

Distribution des anomalies de temp. depuis 1850

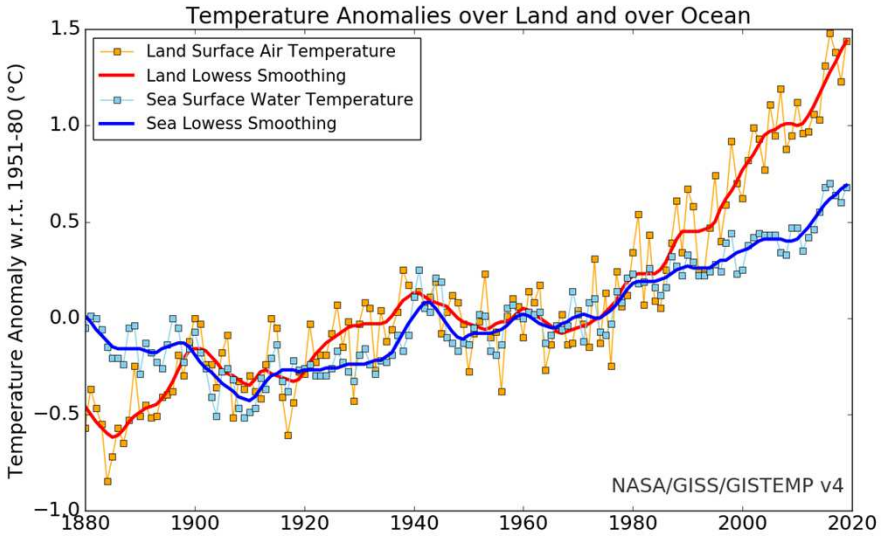


- **Décalage de la distribution des anomalies de température conduisant à un changement non seulement de la moyenne mais aussi de la variance et donc des extrêmes**



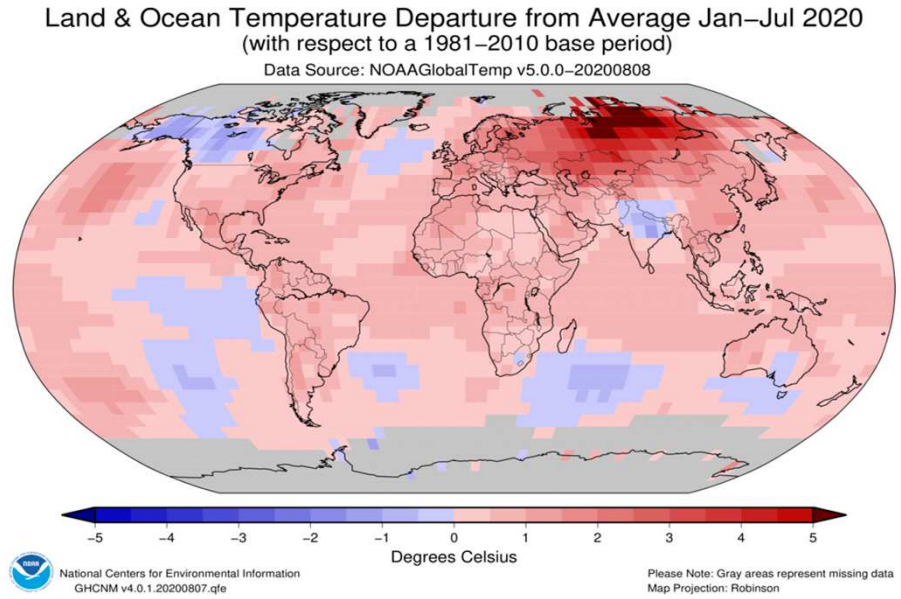


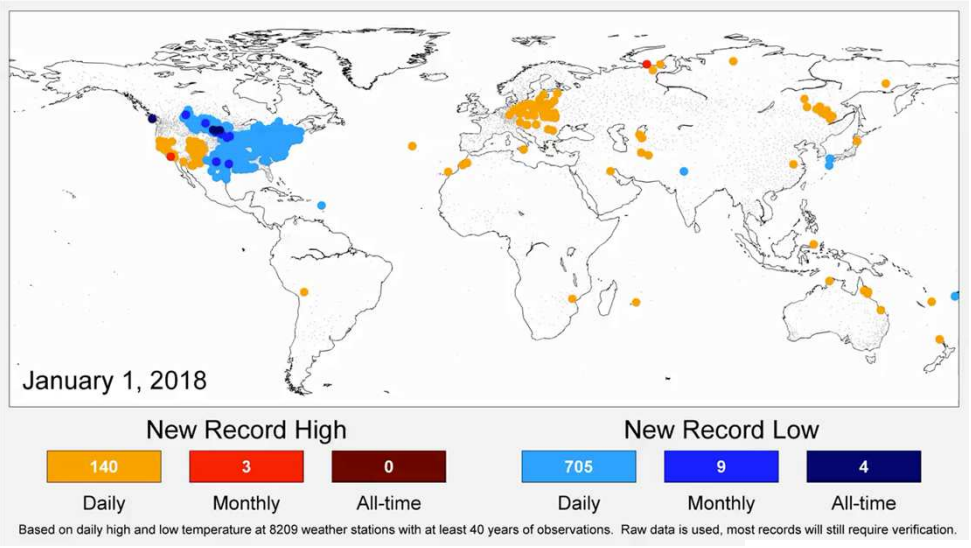
Changement des extremes de temperatures chauds



- **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**

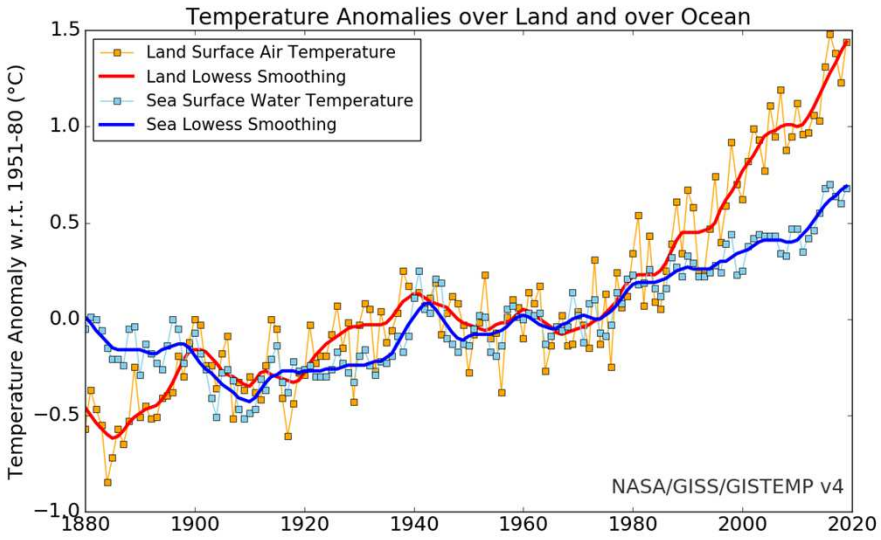
- **Le rapport entre le nombre de record chaud versus froid est égal a 2, en cohérence avec le réchauffement global et les lois théoriques d'évolution des extrêmes.**

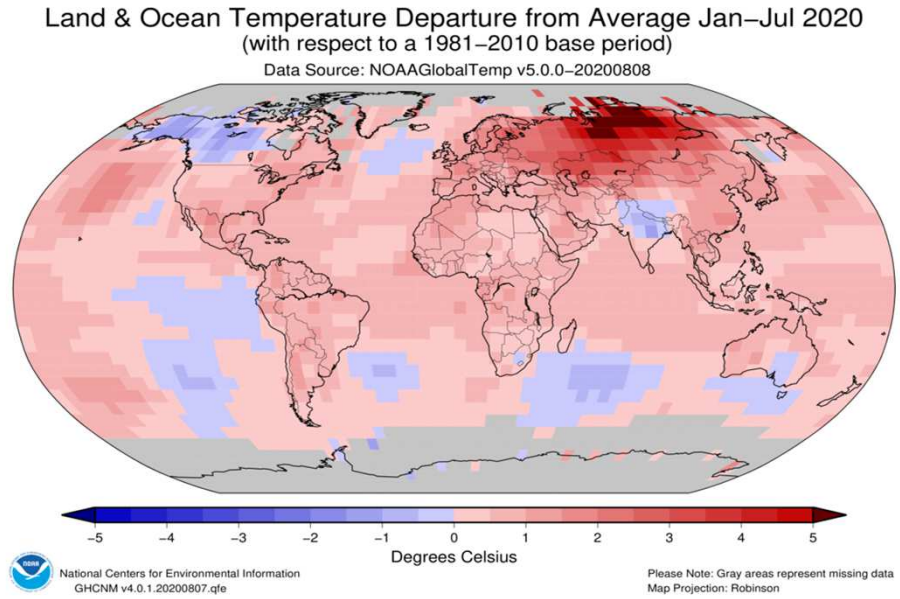




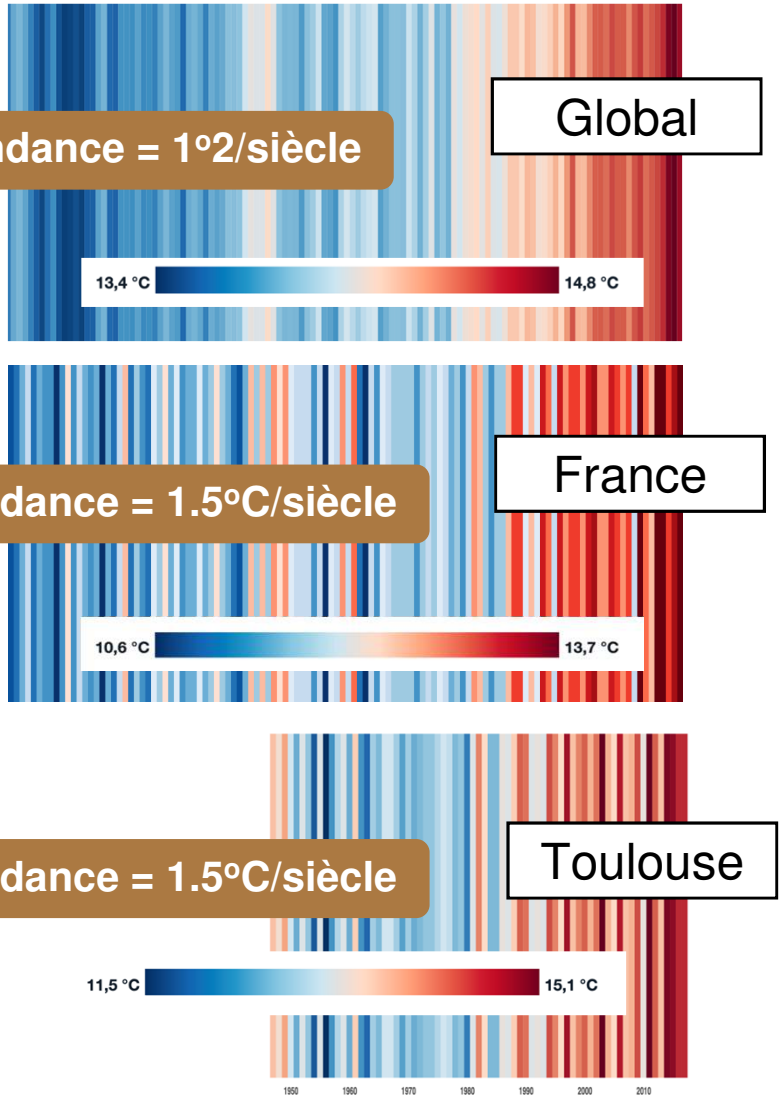
Source: @RaRodhe

Invariance d'échelle du réchauffement global

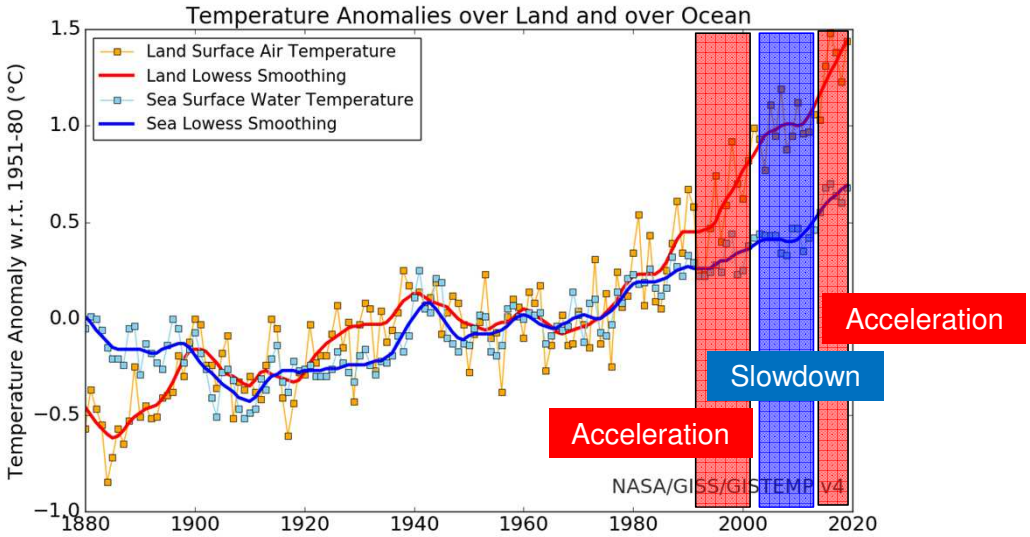




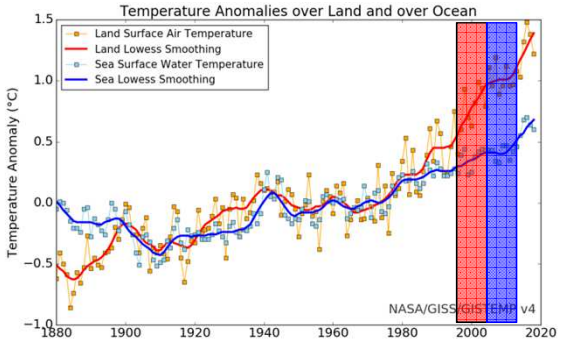
Climate stripes (@EdHawkins)

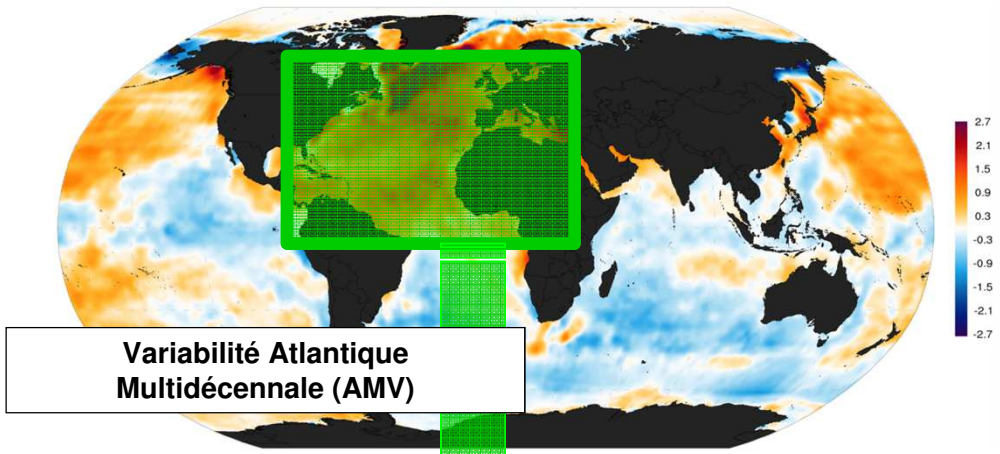


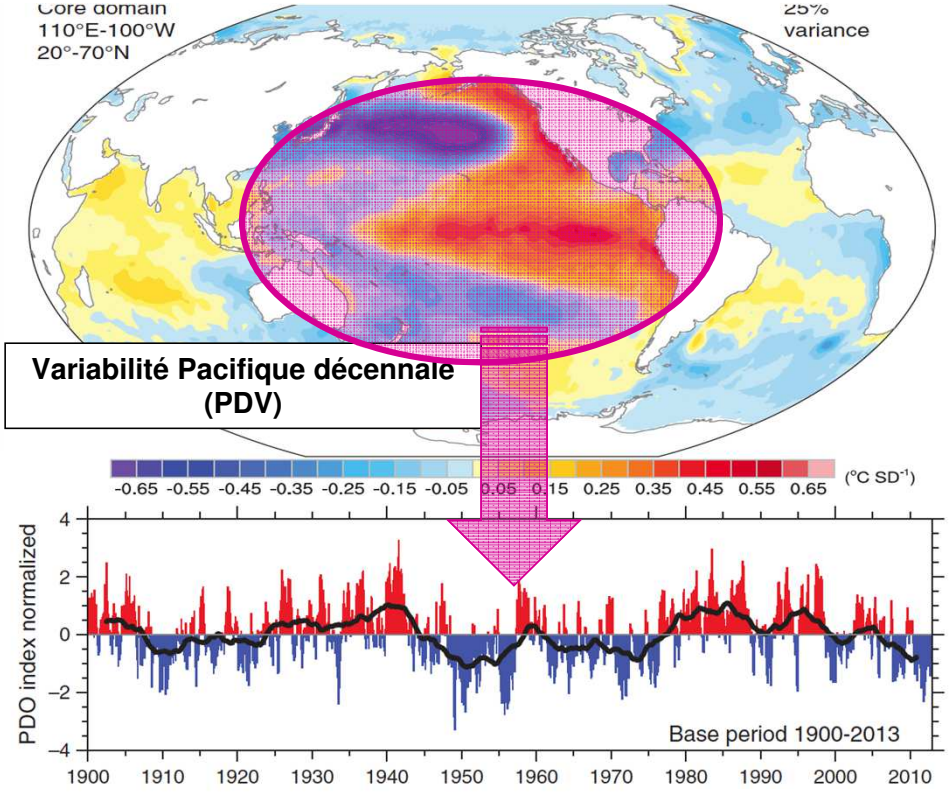
Modulation décennale du réchauffement global



Modes de variabilité décennale d'origine interne



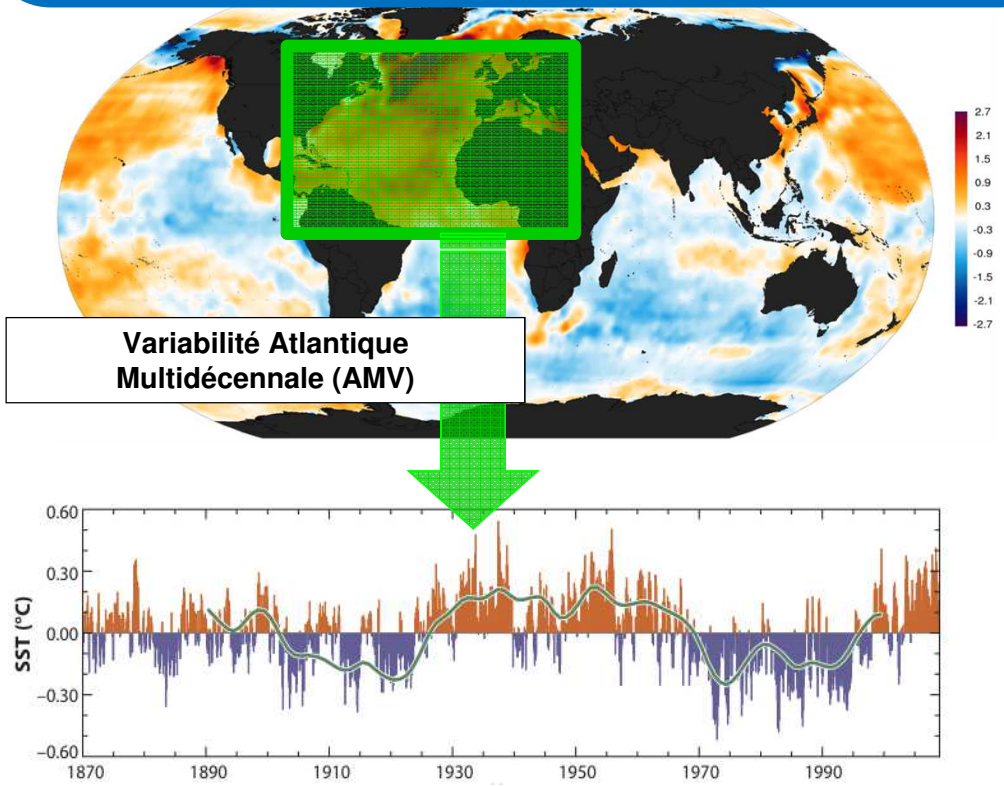




Source: Deser et al. (2012)

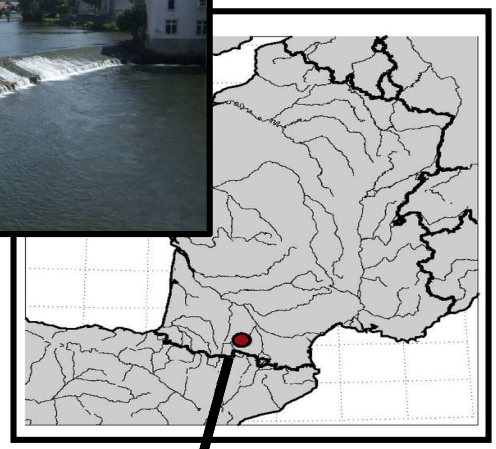
Influences régionales de la variabilité interne décennale

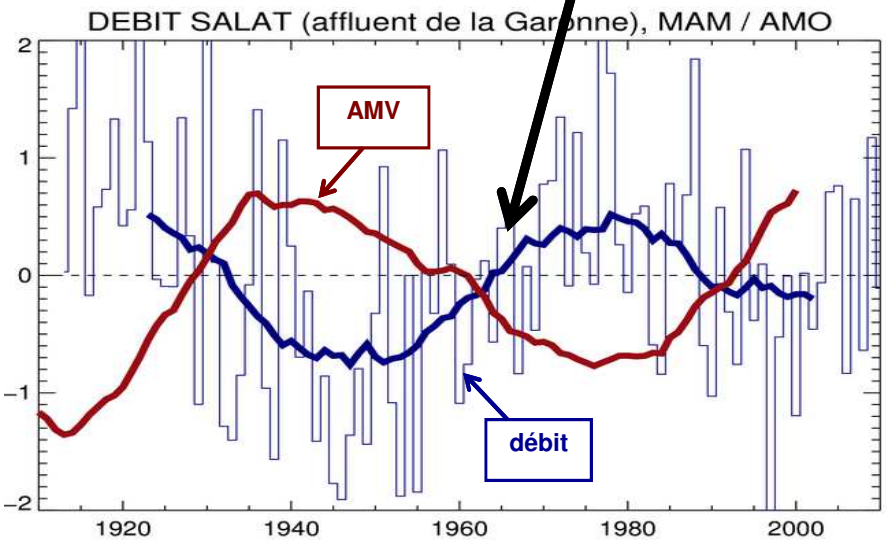
- **Les influences des modes de variabilité peuvent dominer certaines tendances aux échelles régionales, en particulier pour les précipitations/débit de rivières, etc.**
- **Les influences de l'AMV dominent la variabilité multidécennale de l'activité cyclonique Atlantique**



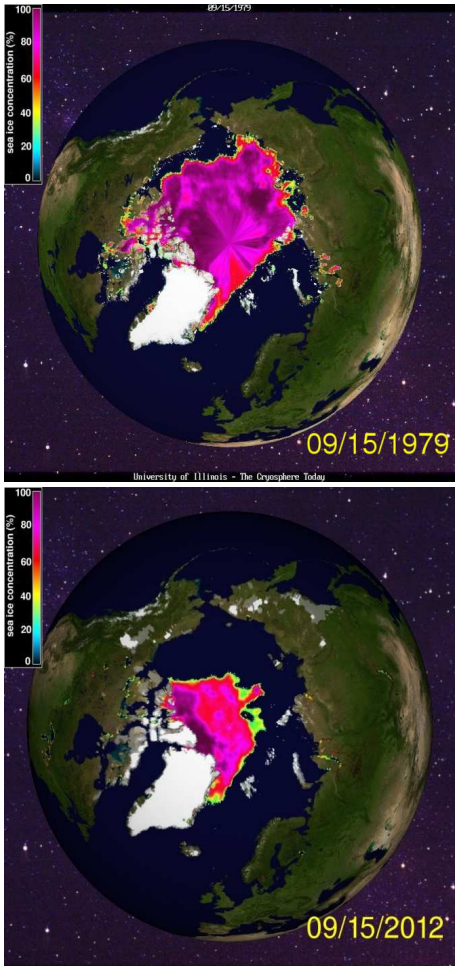


Source: Boe and Habets (2014)

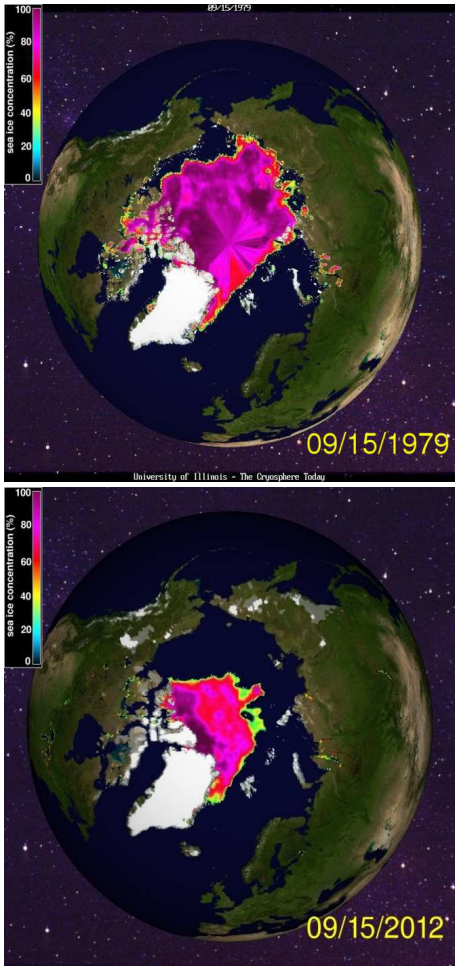


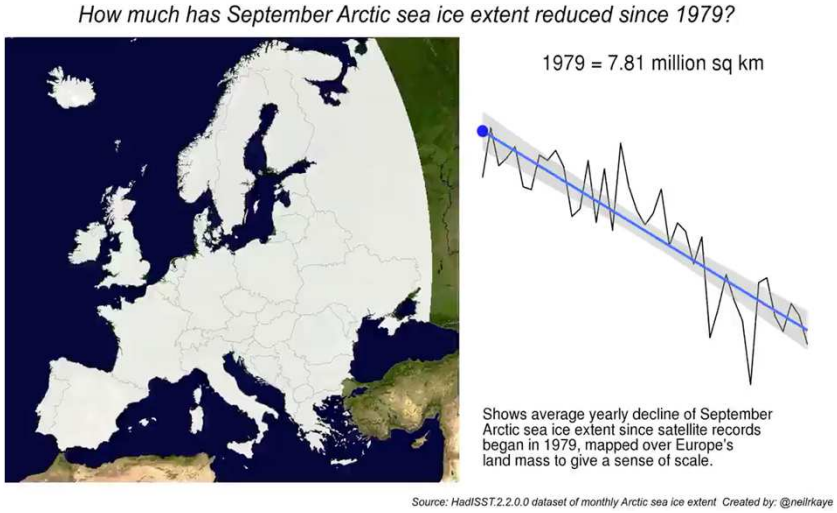


Amplification des changements dans l'Arctique



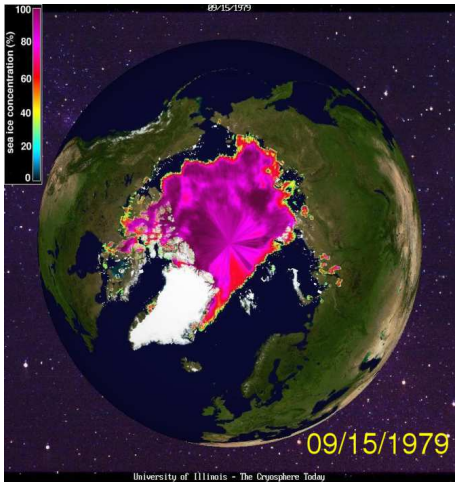
Amplification des changements dans l'Arctique

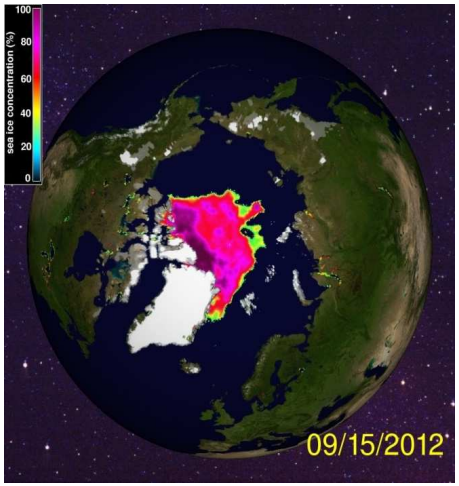


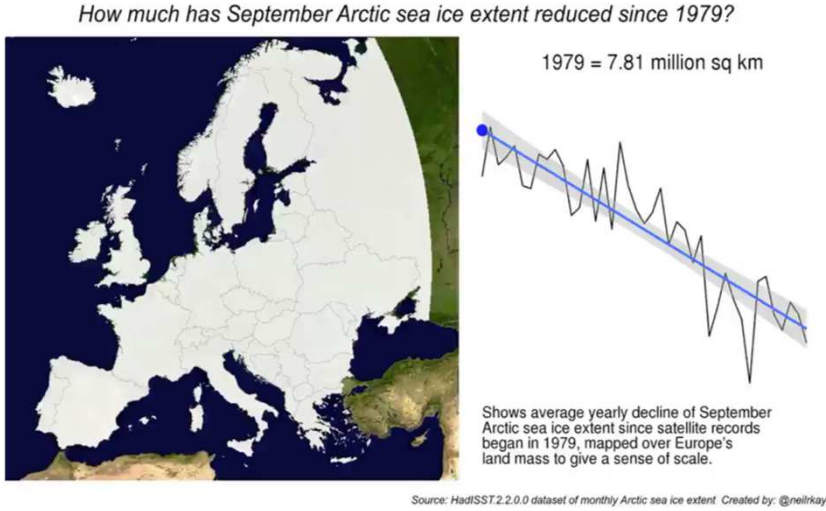


- **Changement d'albedo de surface conduisant a un feedback positif**

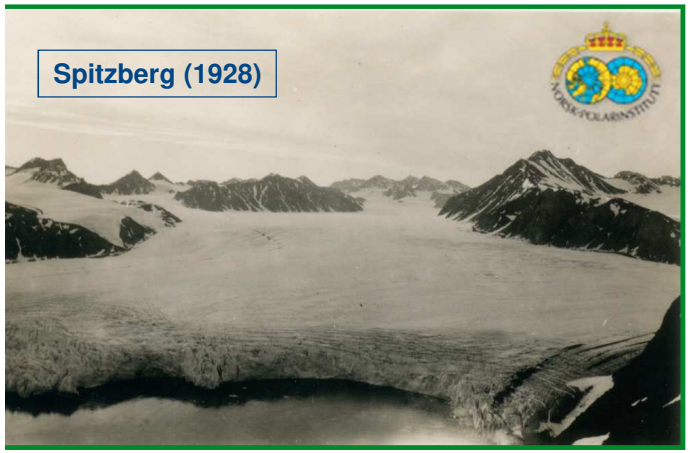
Amplification des changements dans l'Arctique







Source: Norsk Polarinstitutt

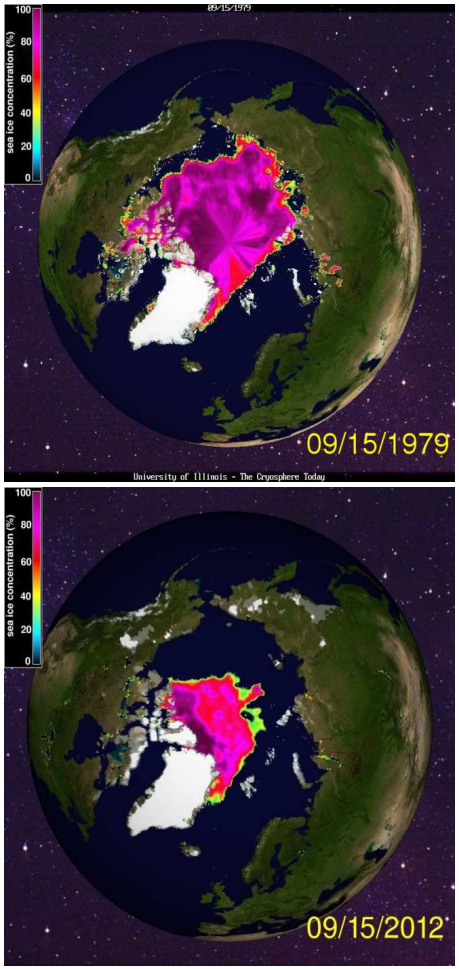


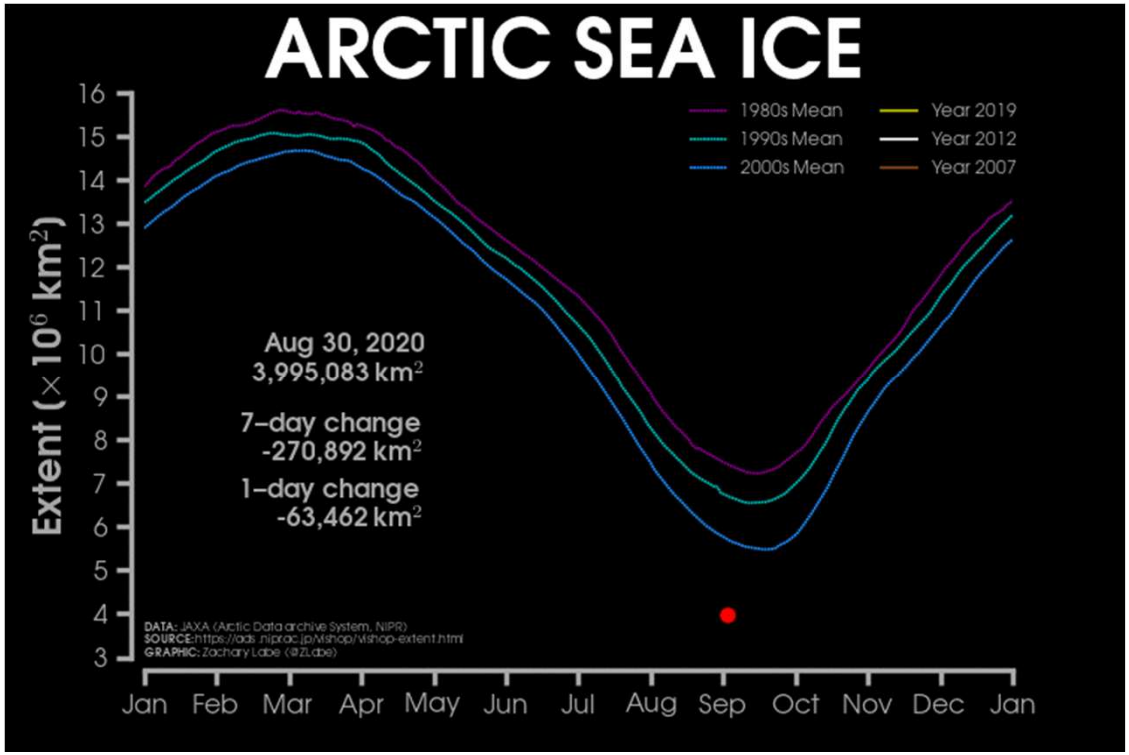


Source: Les derniers messagers des glaces

- **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].**

2020, en route vers un nouveau record?





Source: @ZacharyLabe

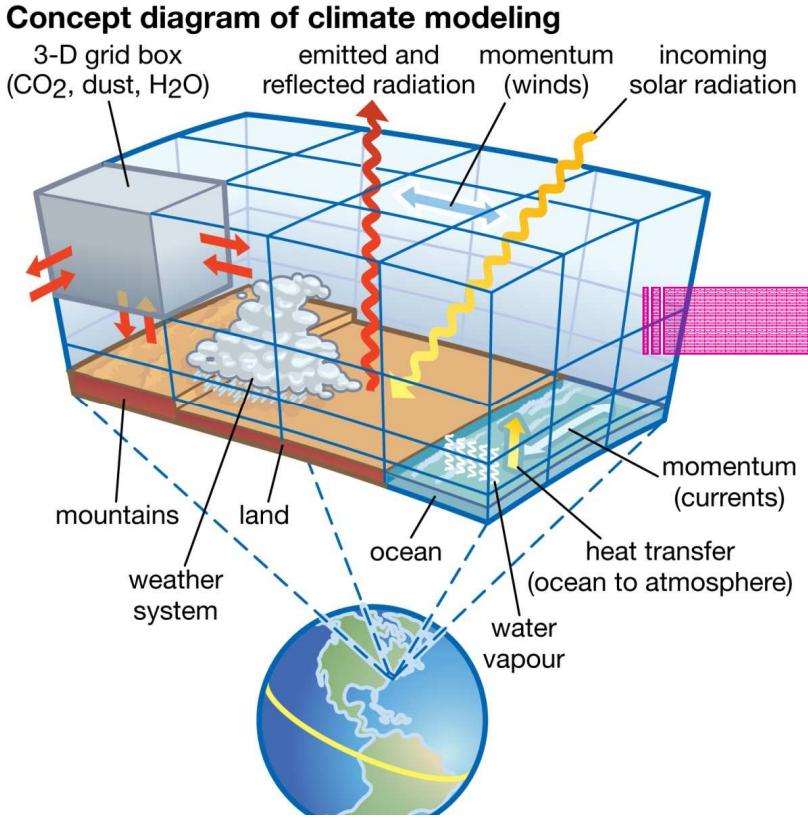
Conclusions

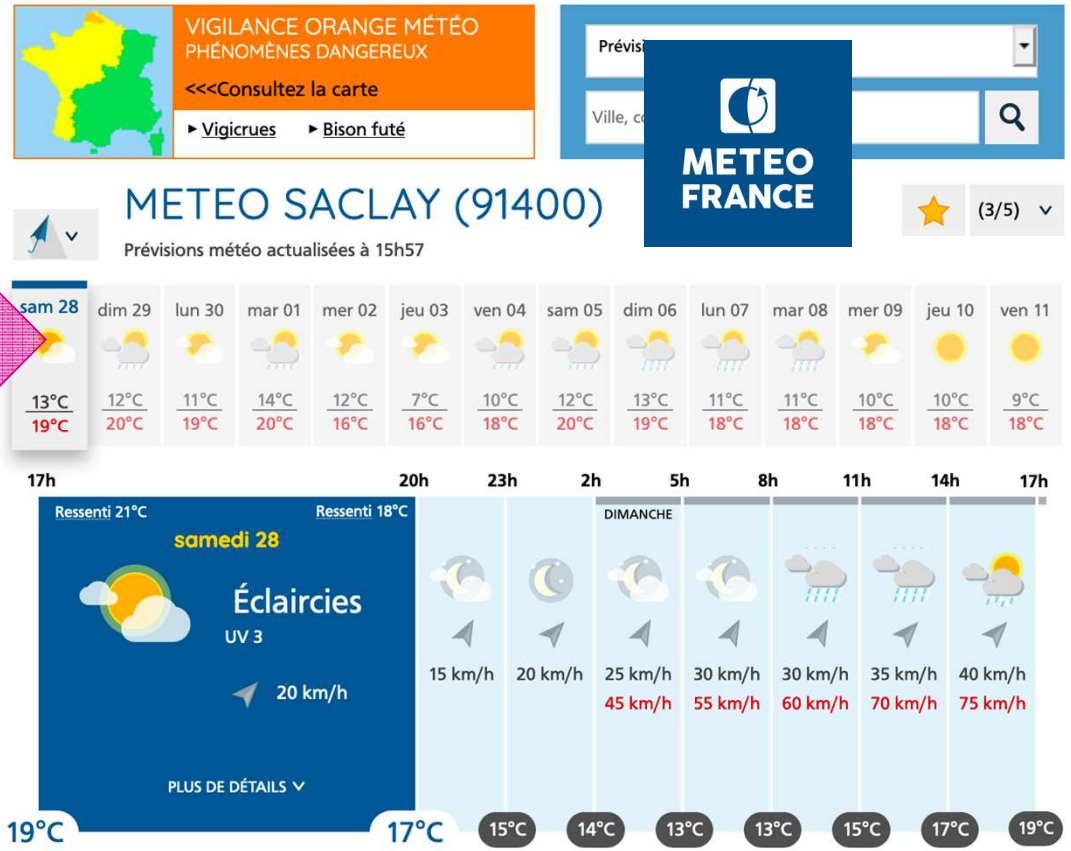
- Les émissions de CO_2 d'origine anthropique sont responsables de changements sans précédents et irréversibles dans le cycle du carbone aux échelles de temps géologiques et dans toutes les composantes du système climatique
- La température moyenne a augmenté de 1°2C/siècle à l'échelle globale, plus 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 20e siècle. Le rythme de cette hausse est 2.5 rapide au 21e siècle [2000-2019] comparé au 20e 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 (récurrence et intensité des canicules, sécheresse, pluie diluviennes dans le Sud Est de la France – évènements cévenols-, décalage des saisons, etc.)

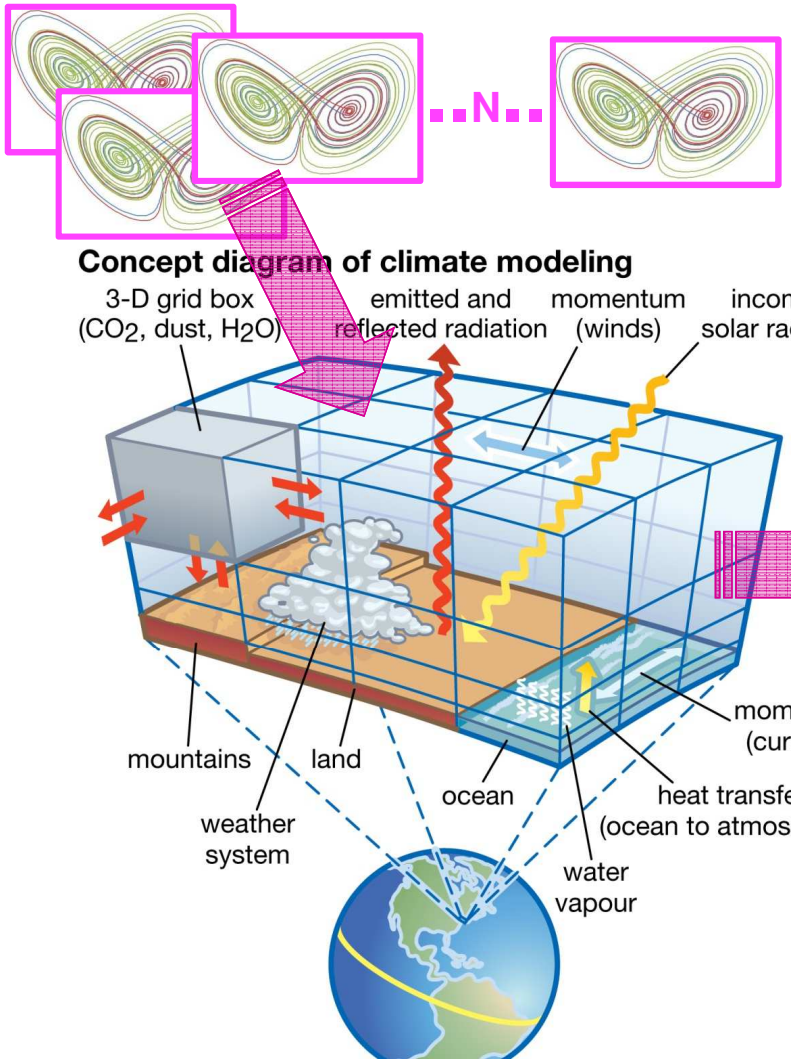
Les modèles de circulation générale

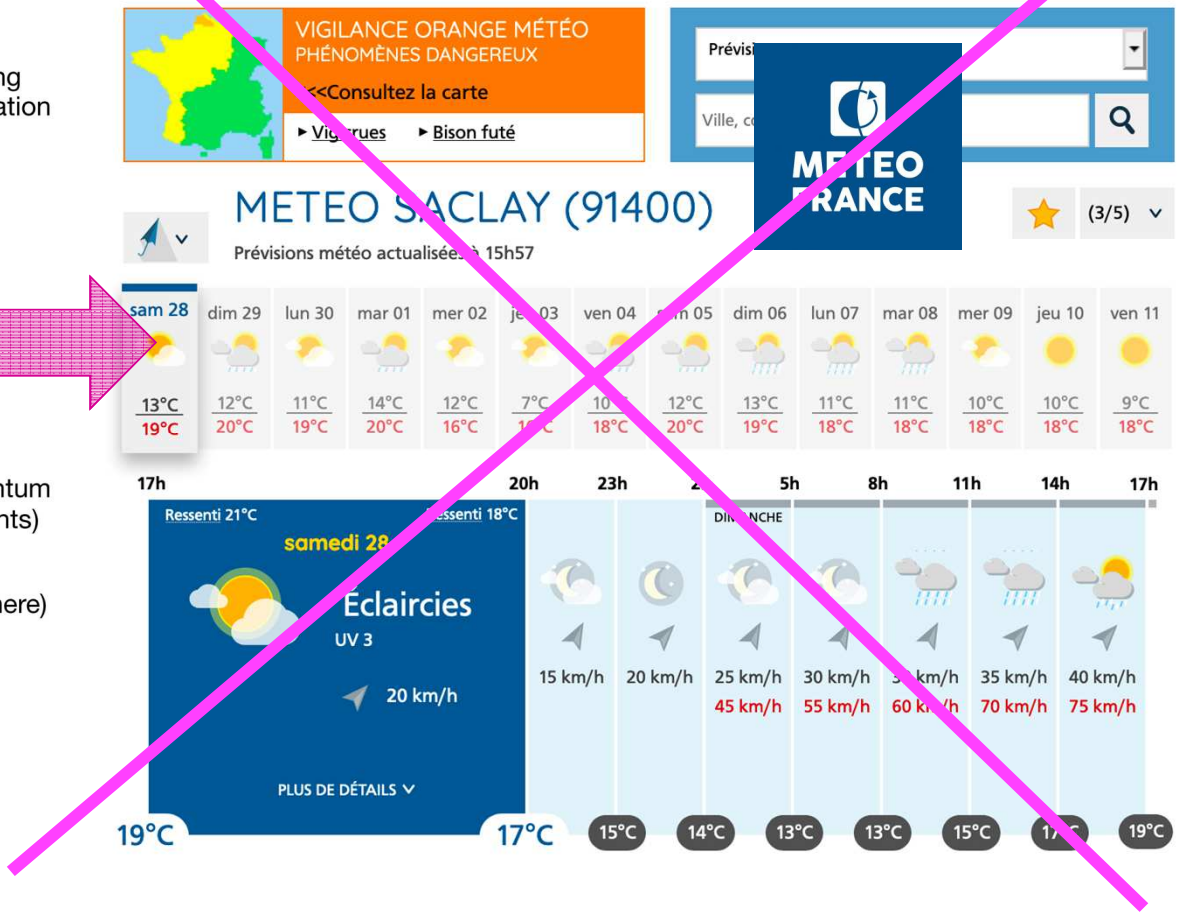
Modèles numériques = planète virtuelle utilisée pour la compréhension des processus et de la variabilité observée + la prévision à toutes les échelles de temps (paléo à la prévision météo en temps réel)



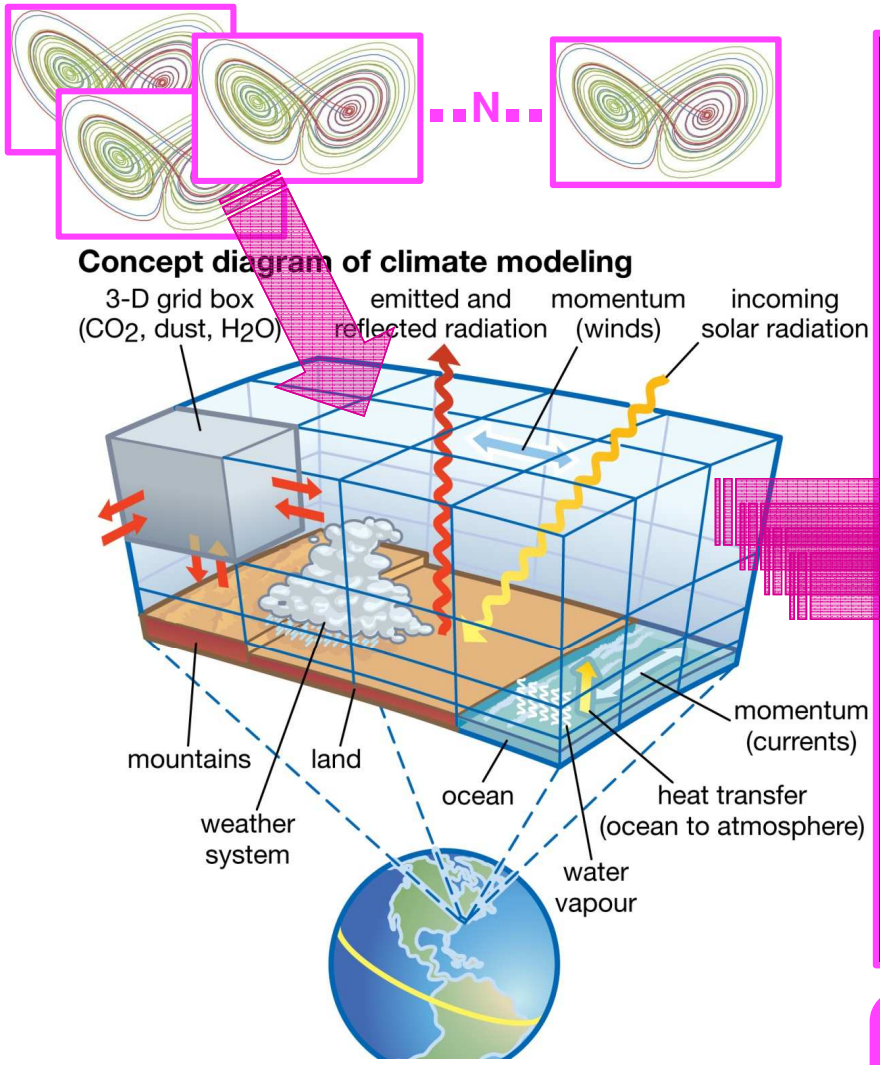


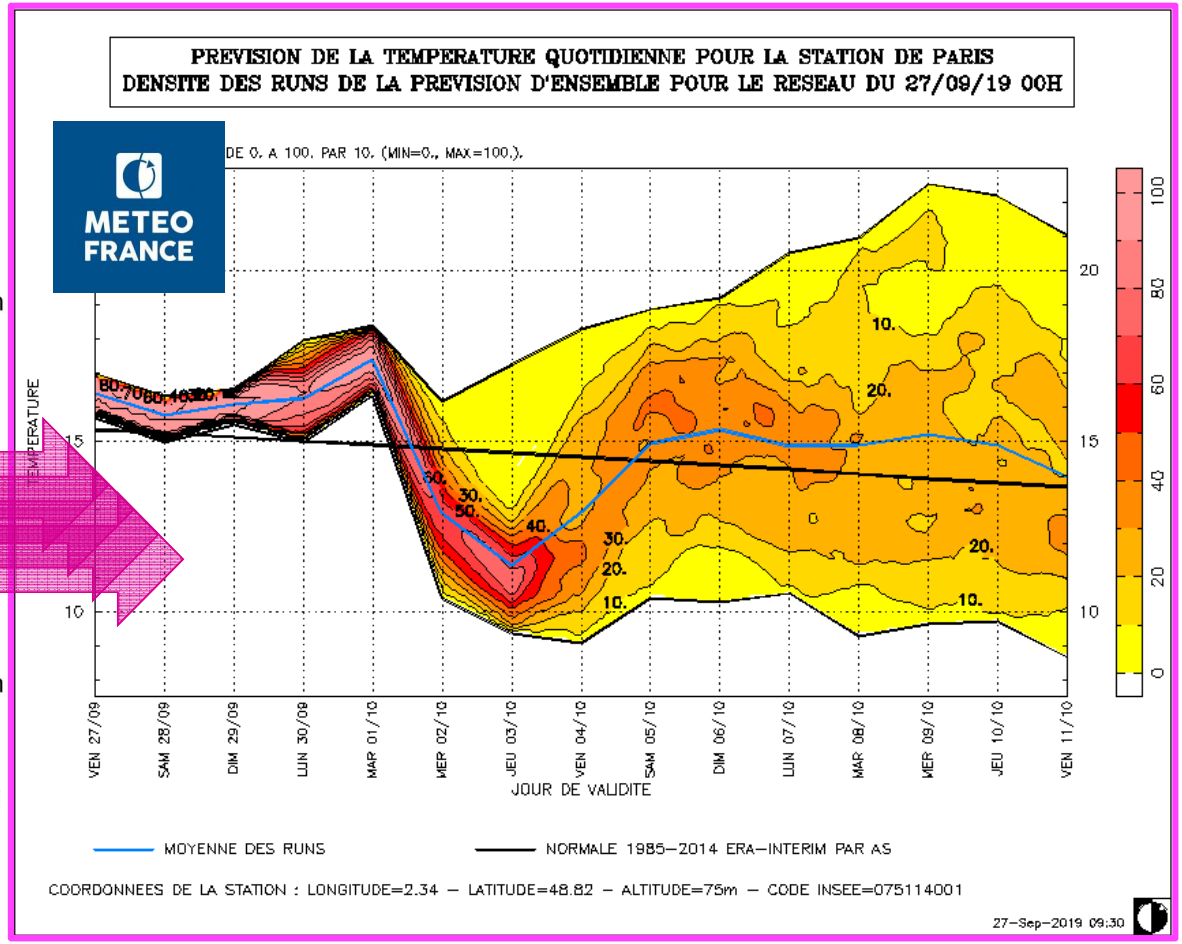
Prévision météo: probabiliste/approche ensembliste





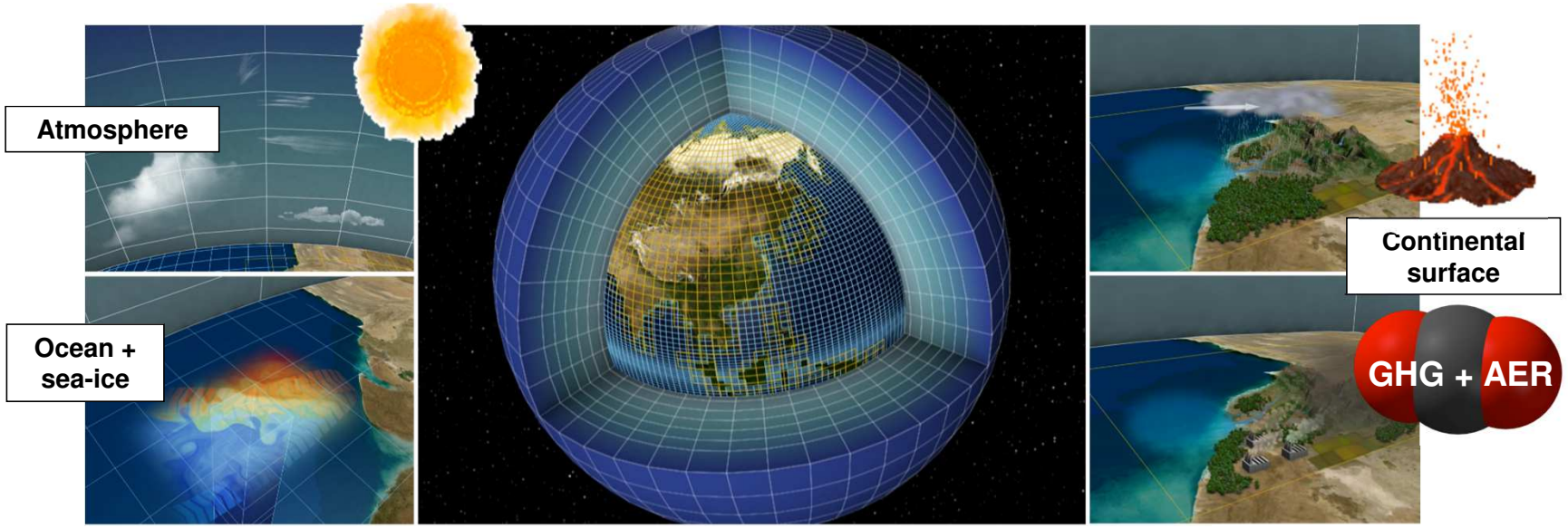
Prévision météo: probabiliste/approche ensembliste



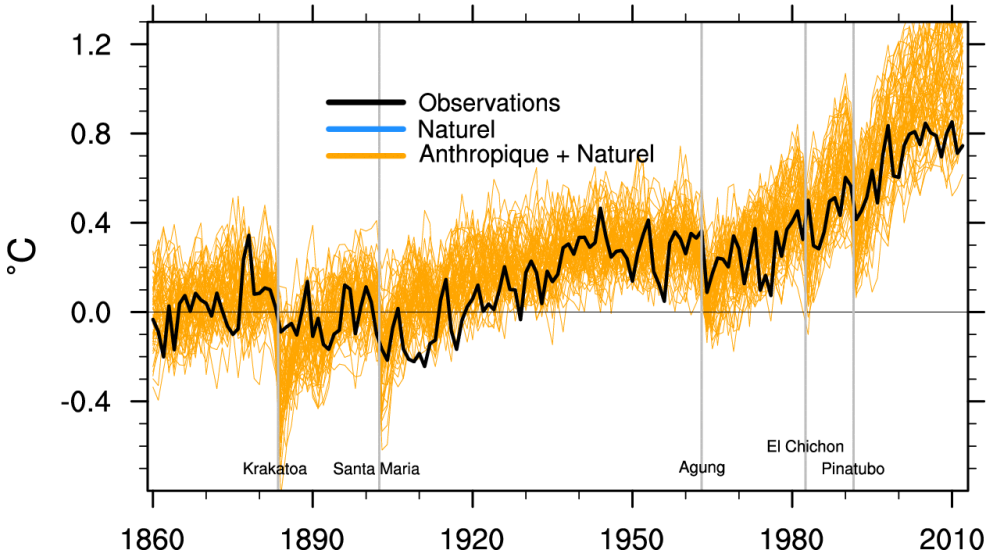


- **Par nature, tout type de prévision (quelque soit l'échelle de temps) est probabiliste pour prendre en compte la variabilité intrinsèque chaotique du climat.**

Rôle des forçages naturels versus anthropiques

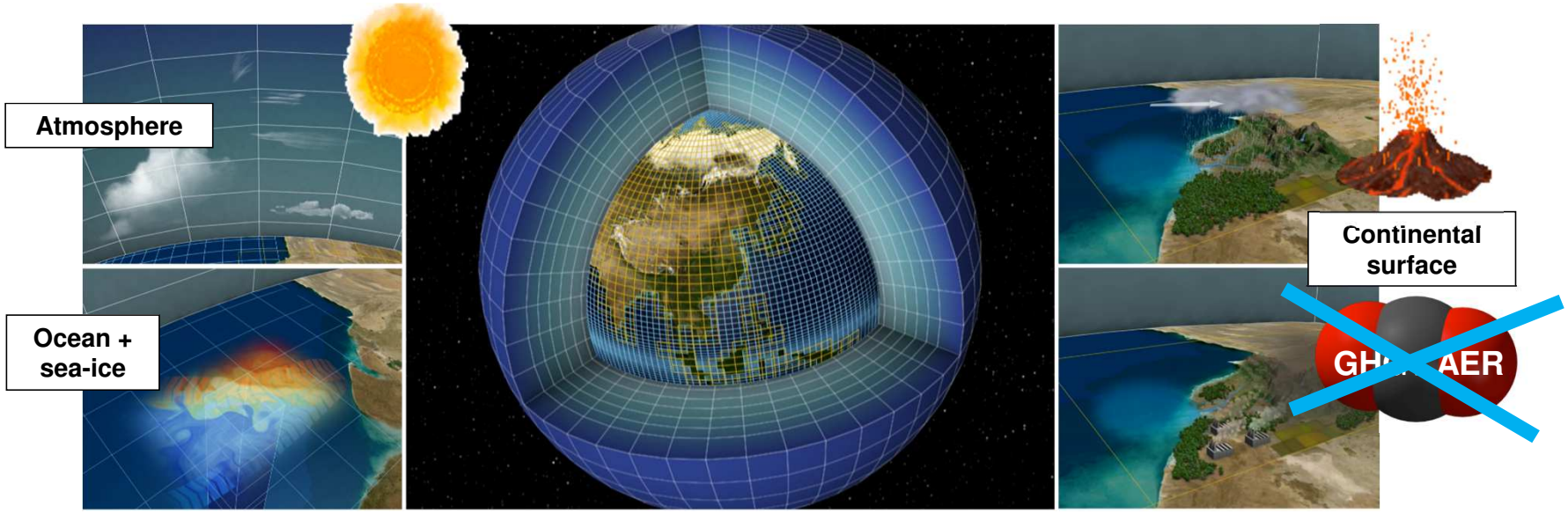


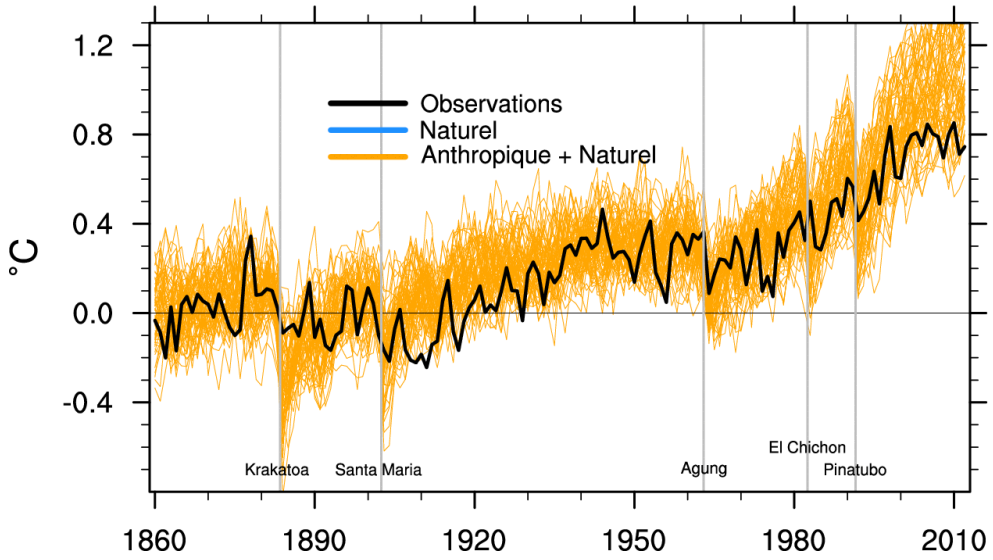
Source: IPSL

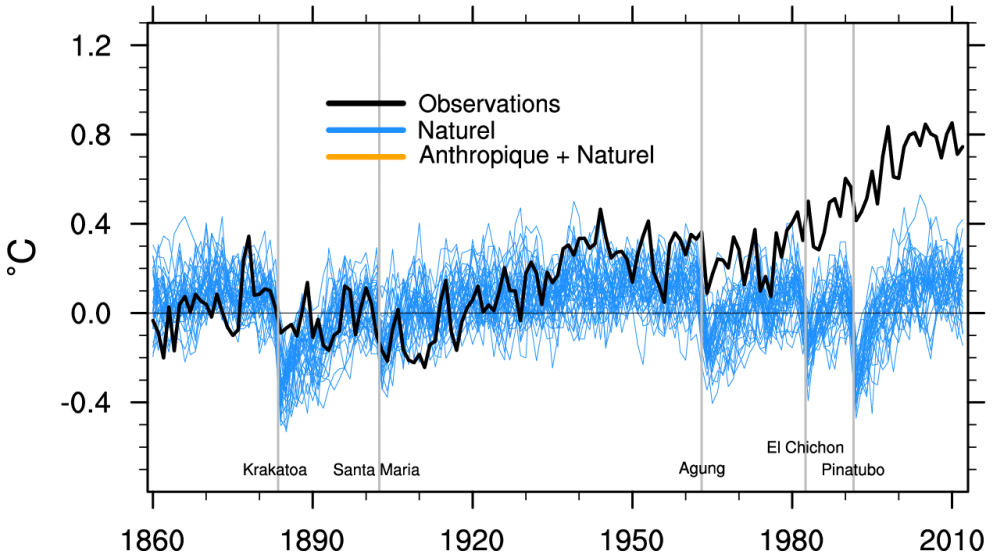


Source: données CMIP5/graphe Ch. Cassou

Rôle des forçages naturels versus anthropiques







Source: données CMIP5/graphe Ch. Cassou

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

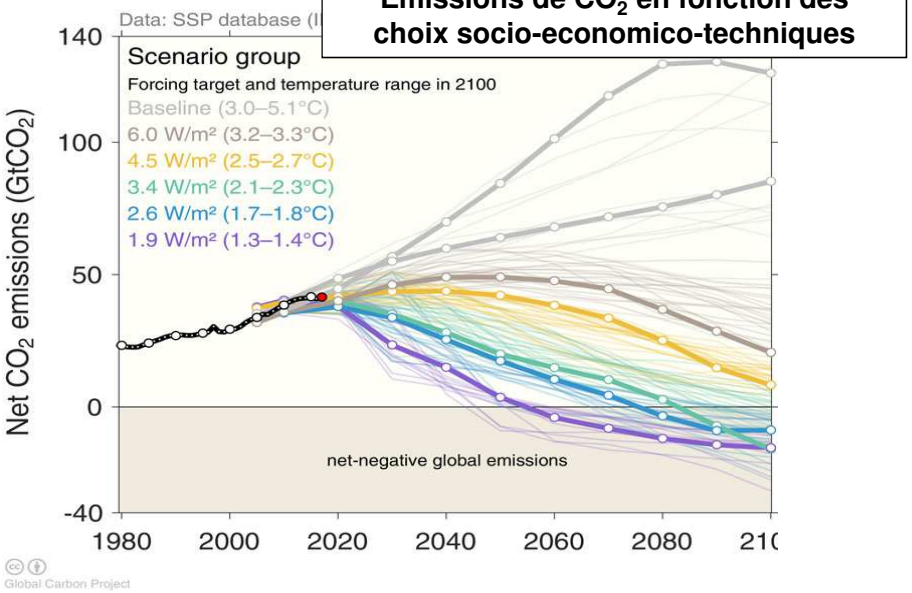
- Les incertitudes sont prises en compte et quantifiées via des approches ensemblistes en multi-modèles.
  - Incertitude stochastique (nature chaotique du système) : irréductible
  - Incertitude épistémique (connaissance scientifique et maturité des modèles) : réductible

- 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**

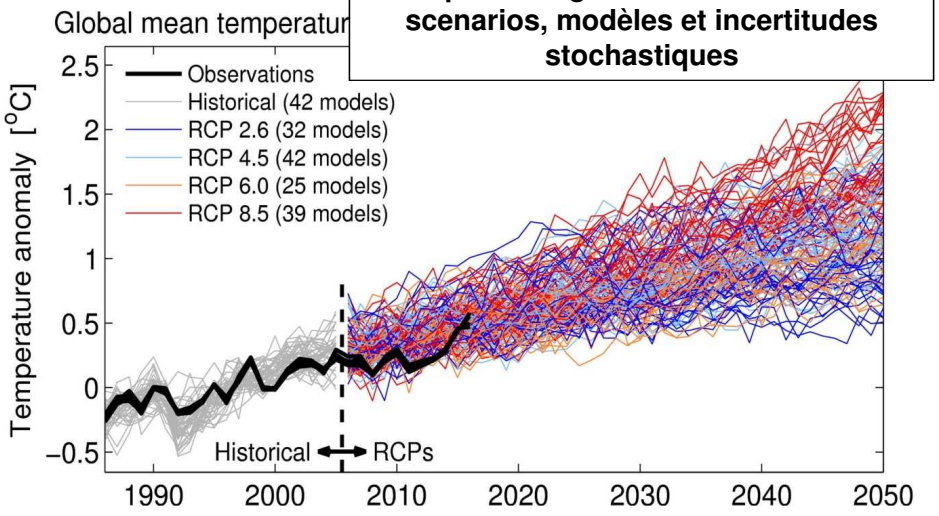
Scenarios climatiques d'émission de GES

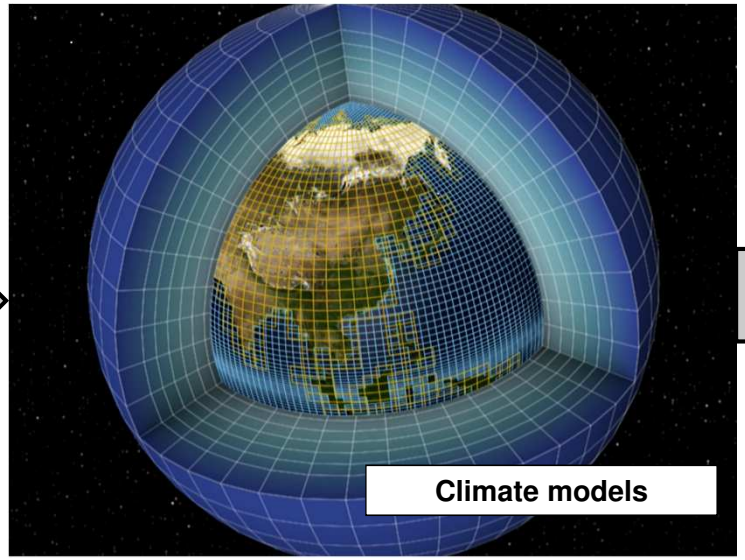
Emissions de CO_2 en fonction des choix socio-economico-techniques



Source: Global Carbon Project

Possibles climatiques pour la température globale en fonction des scenarios, modèles et incertitudes stochastiques





Source: IPSL

Evolution de la température de surface

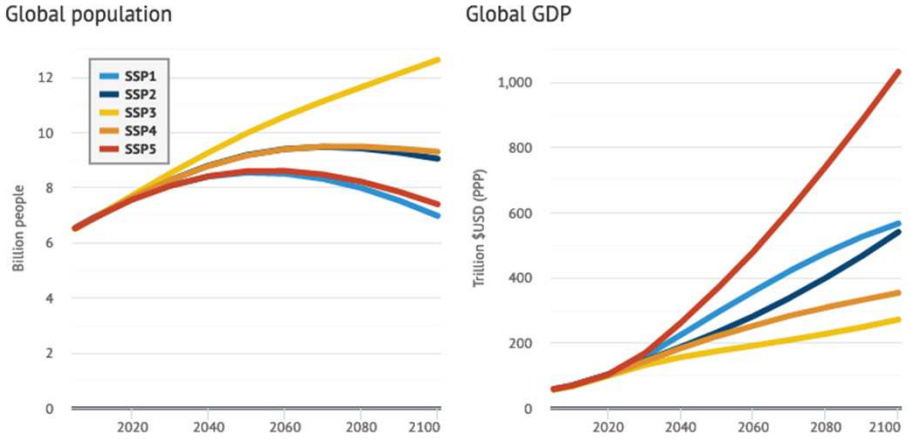
Scenario sobre

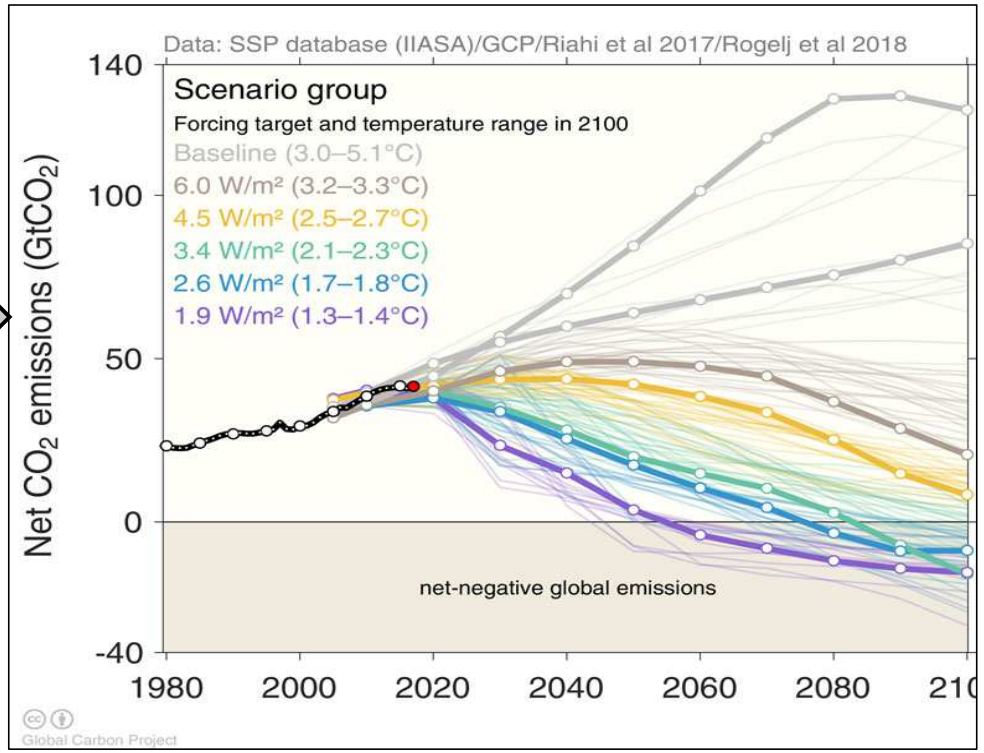
Scenario du laisser faire

Les nouveaux scénarios au coeur du prochain rapport du GIEC



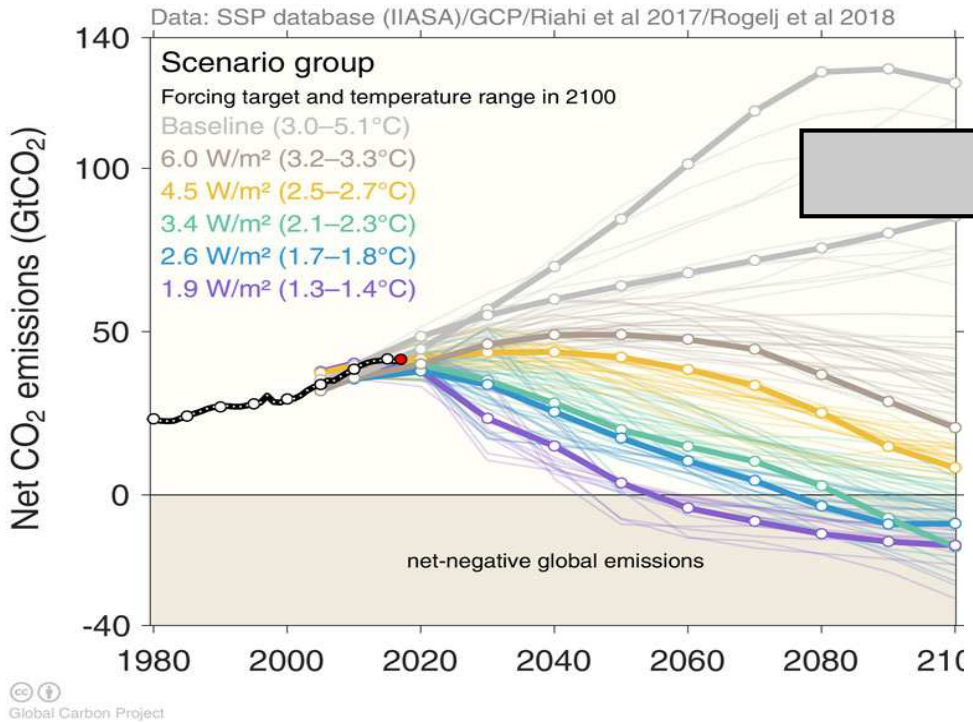
Narration/histoire (shared socio-economical pathways -SSP) combinant une multitude de facteurs pour chacune d'entre elles

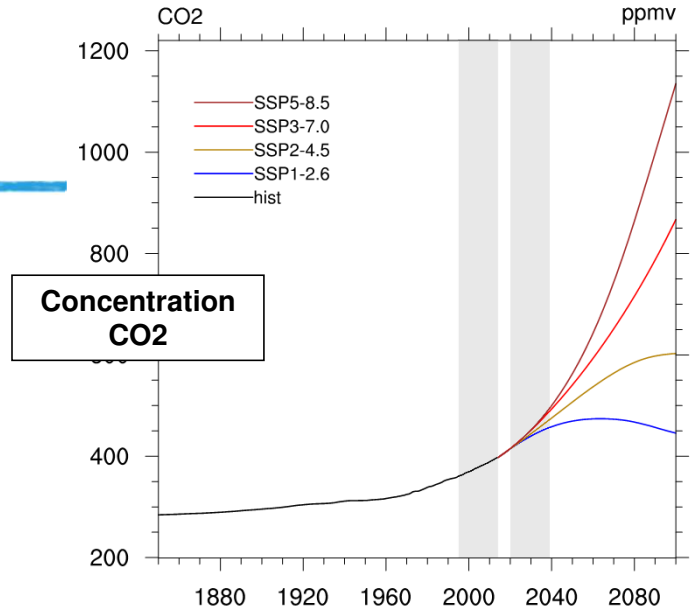




Des ssp aux forcages (1)

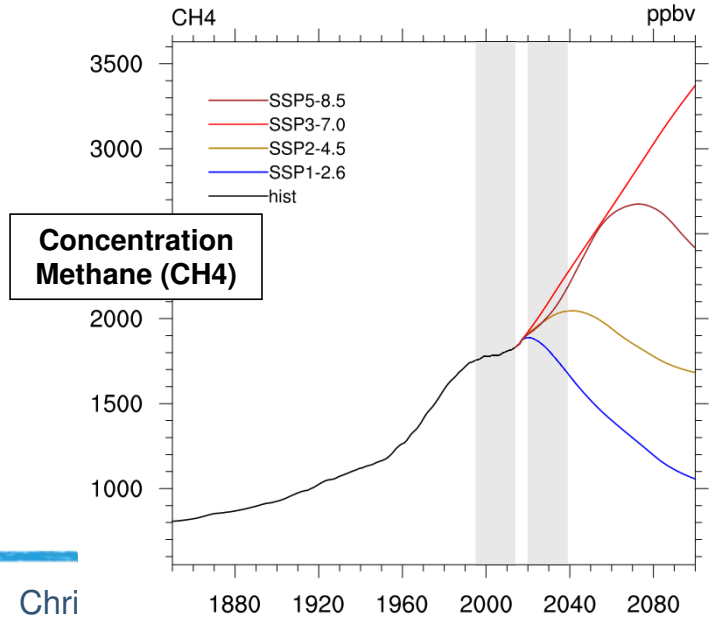
Narration/histoire (shared socio-economical pathways -SSP) combinant une multitude de facteurs pour chacune d'entre elles





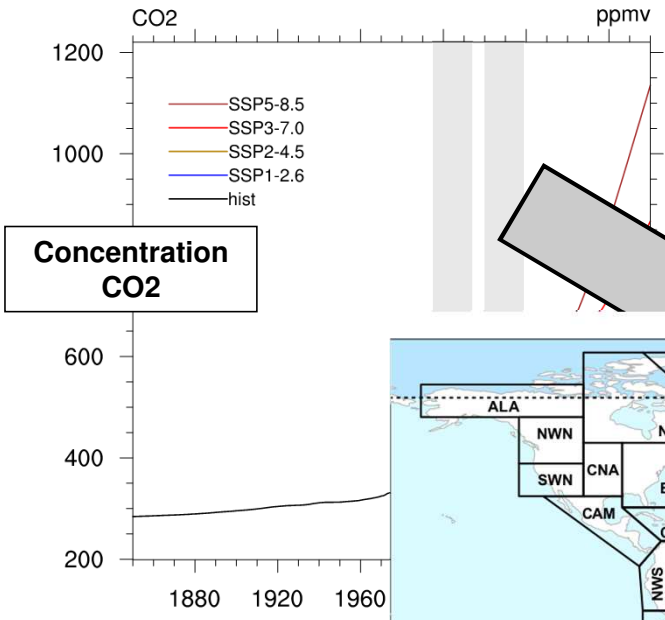
Concentration CO2

Concentration en gaz à effet de serre +aérosols

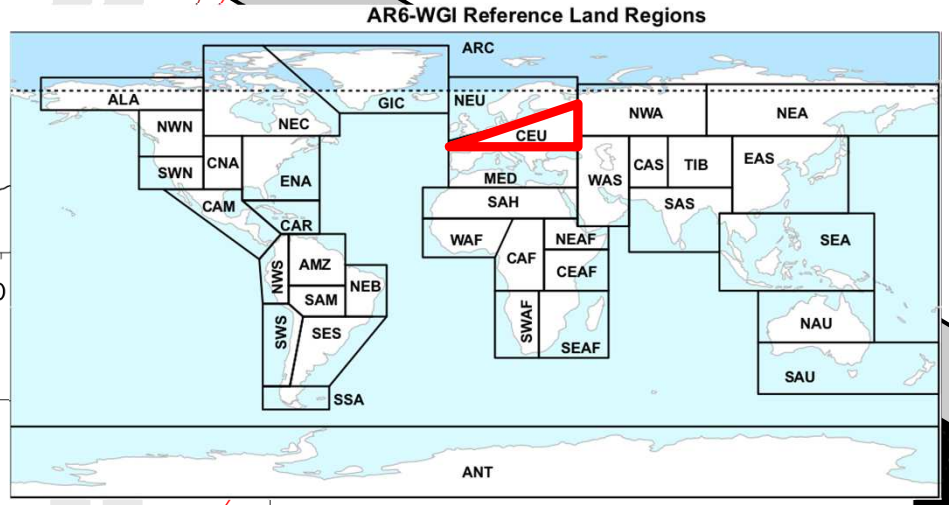


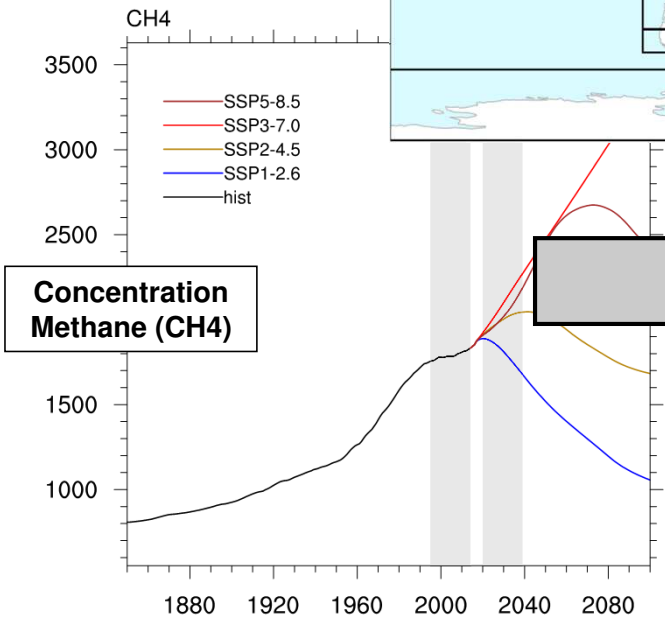
Concentration Methane (CH4)

Des ssp aux forçages climatiques (2)

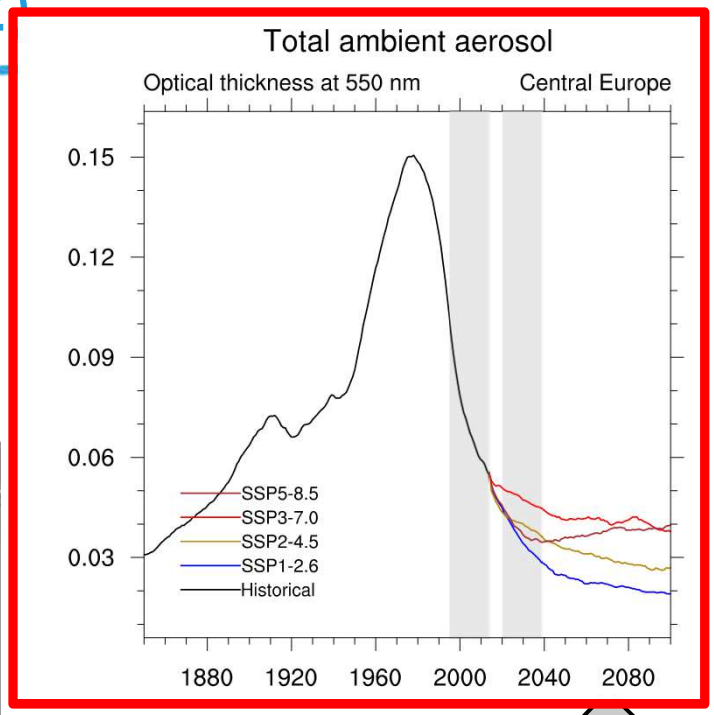


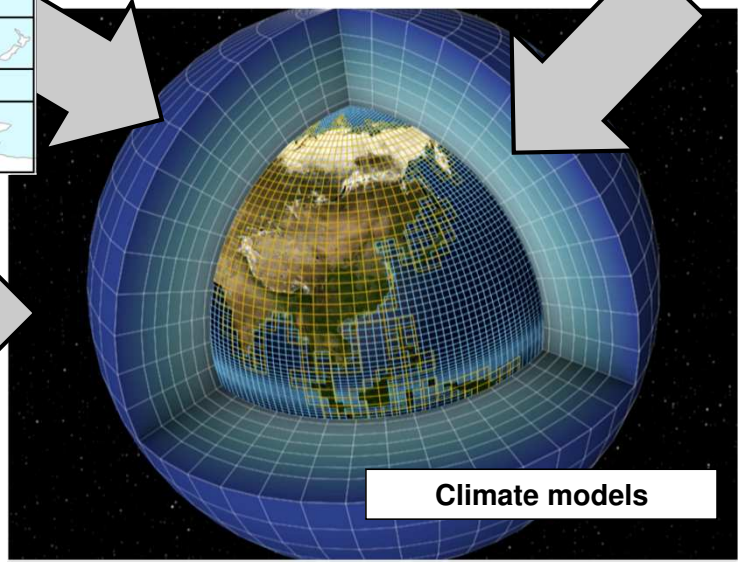
Concentration CO2



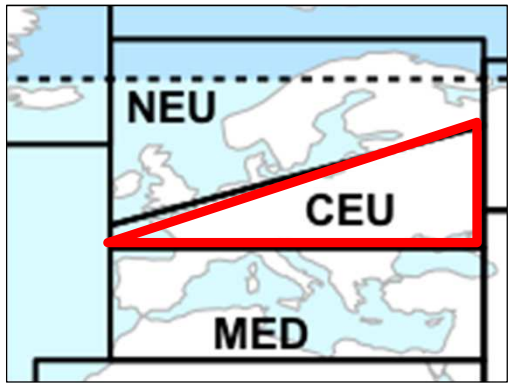


Concentration Methane (CH4)

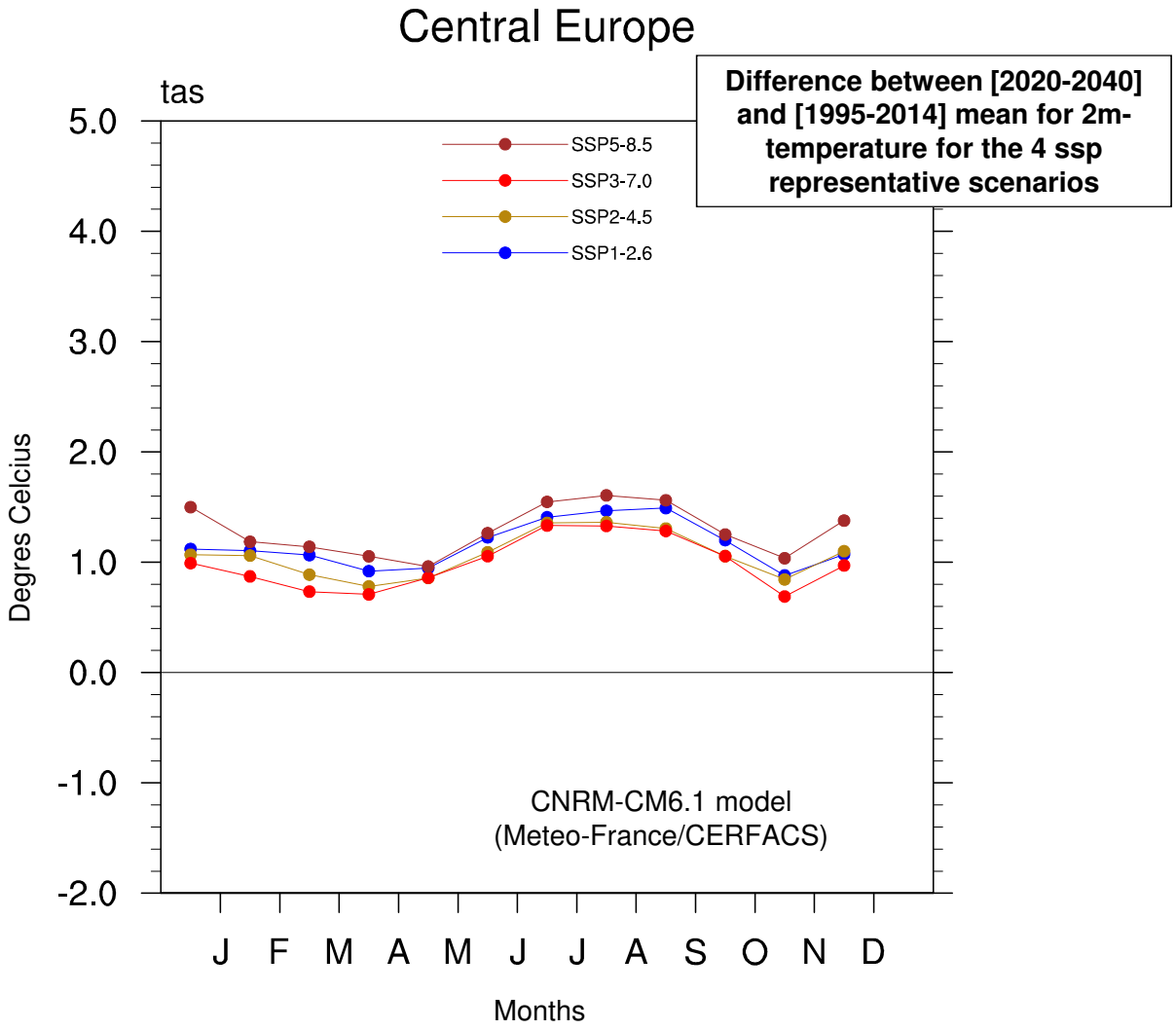




Changements des Temp. moyennes sur 2020-2040

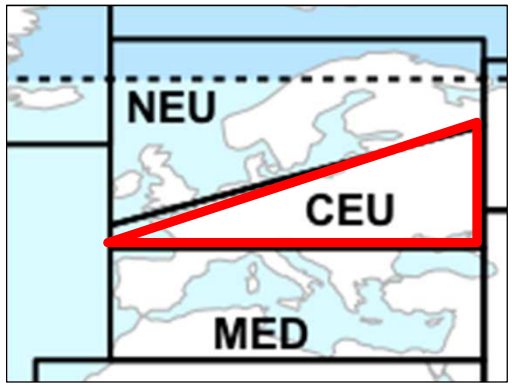


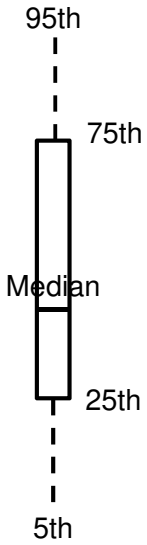
- **Saisonnalité du réchauffement**
- **Différences faibles mais significatives entre les différents scénarios p/r aux changements historiques observes au 20e siècle.**



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

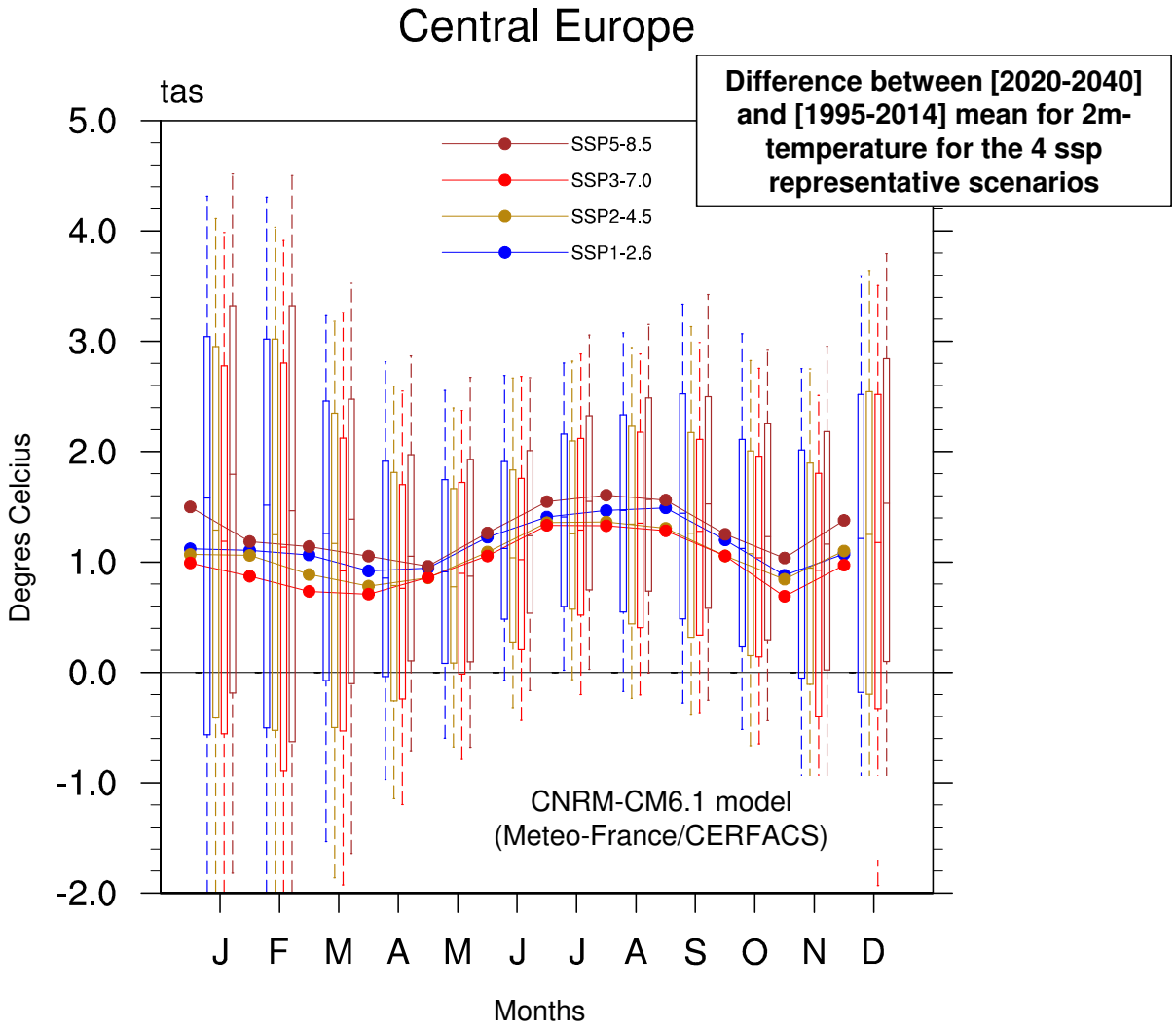
Incertitude irréducible due à la variabilité interne





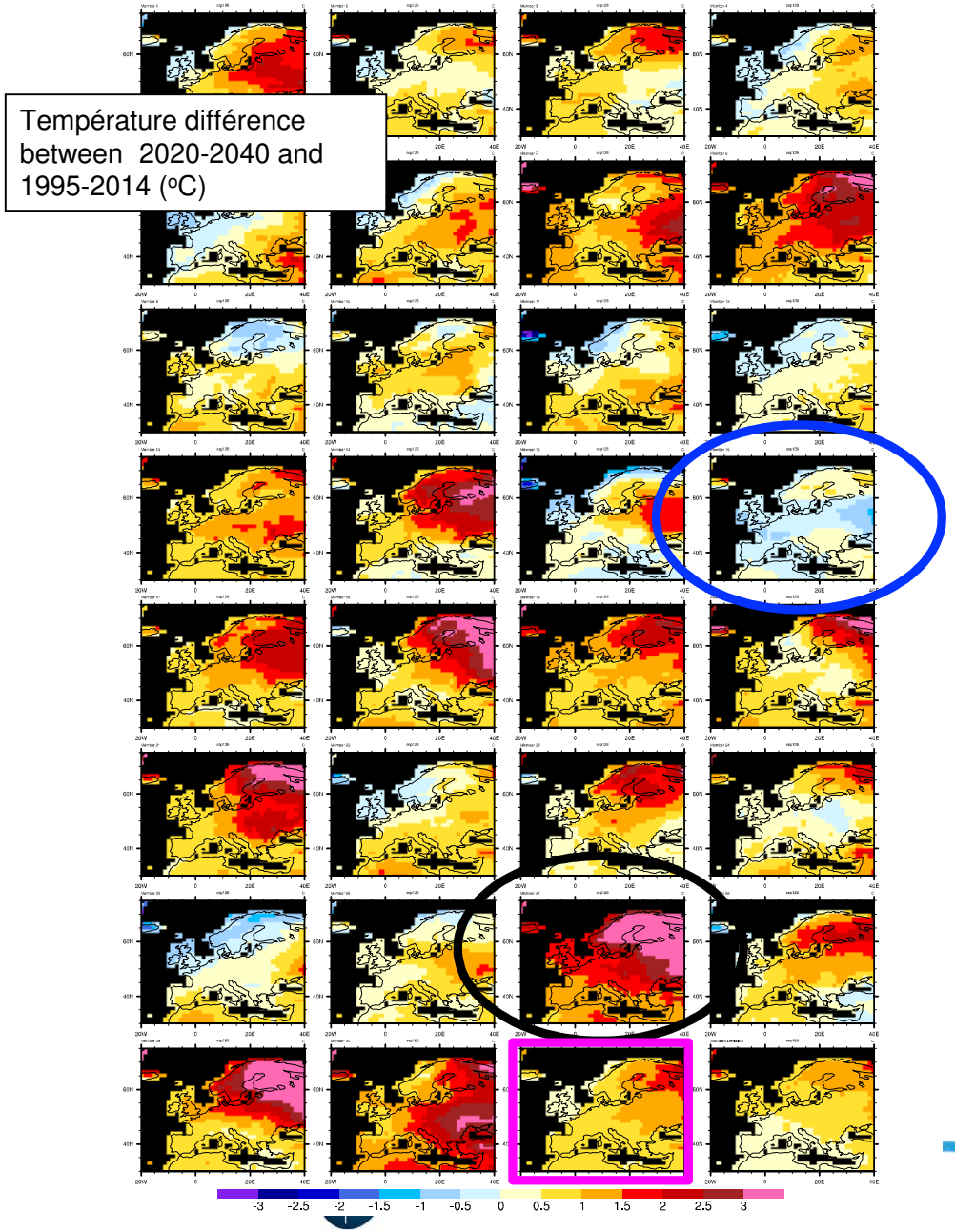
Approche ensembliste: réalisation de 30 simulations d'un même scénario, chaque simulation différant par leurs conditions initiales.

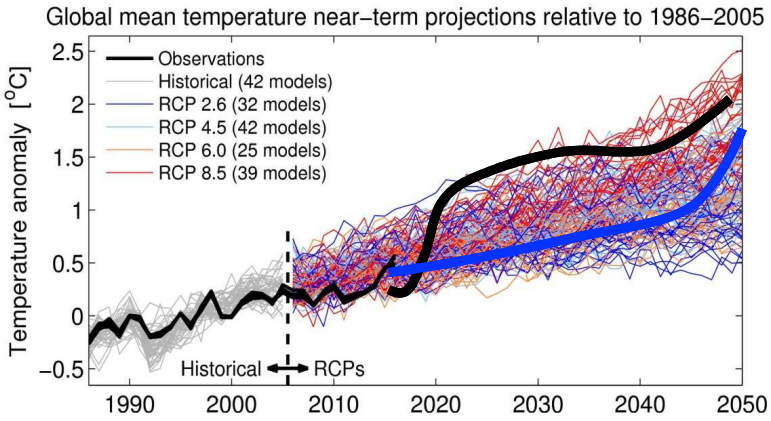
Forte variabilité interne sur l'Europe Centrale, en particulier en hiver



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

Empreinte de la variabilité interne en Europe en hiver





- Moyenne = +0.94°C

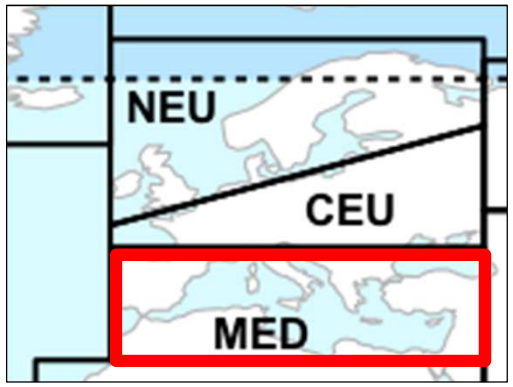
==> Réponse du système climatique aux forçages externes (estimée à partir d'un grand ensemble du modèle CNRM-CM6.1)

- Min = -0.09°C // Max =+2.22°C

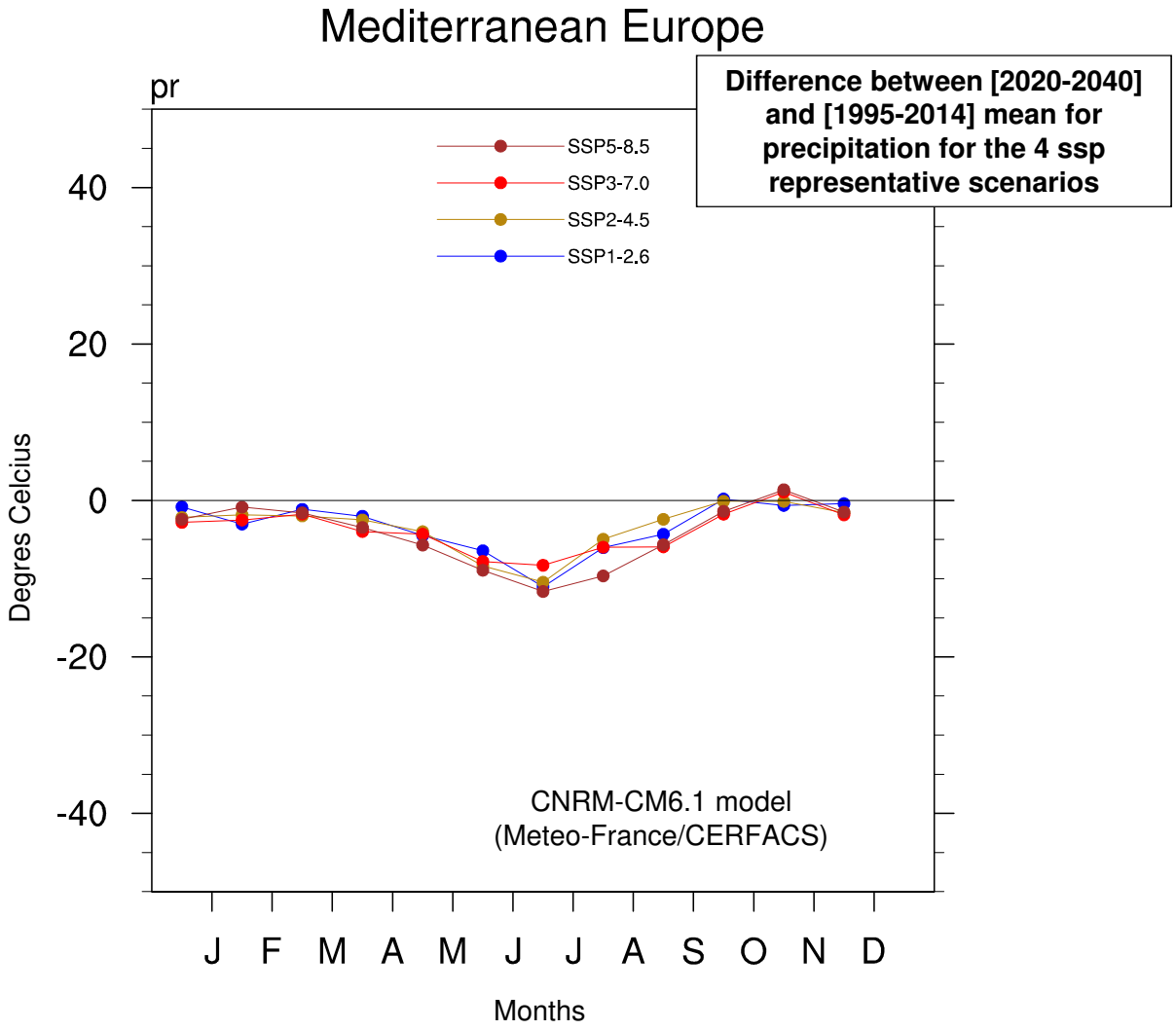
==> Intervalle associé aux modes internes de variabilité décennale qui peuvent ou moduler ou accélérer le réchauffement d'origine anthropique.

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

Changements des Précip. moyennes sur 2020-2040

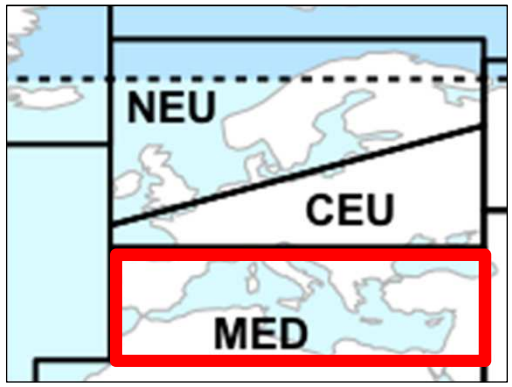


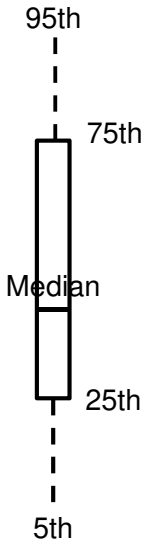
- **Pas de changement significatif en hiver mais une réduction significative en été.**
- **Pas de dépendance aux scénarios (besoin d'adaptation)**



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

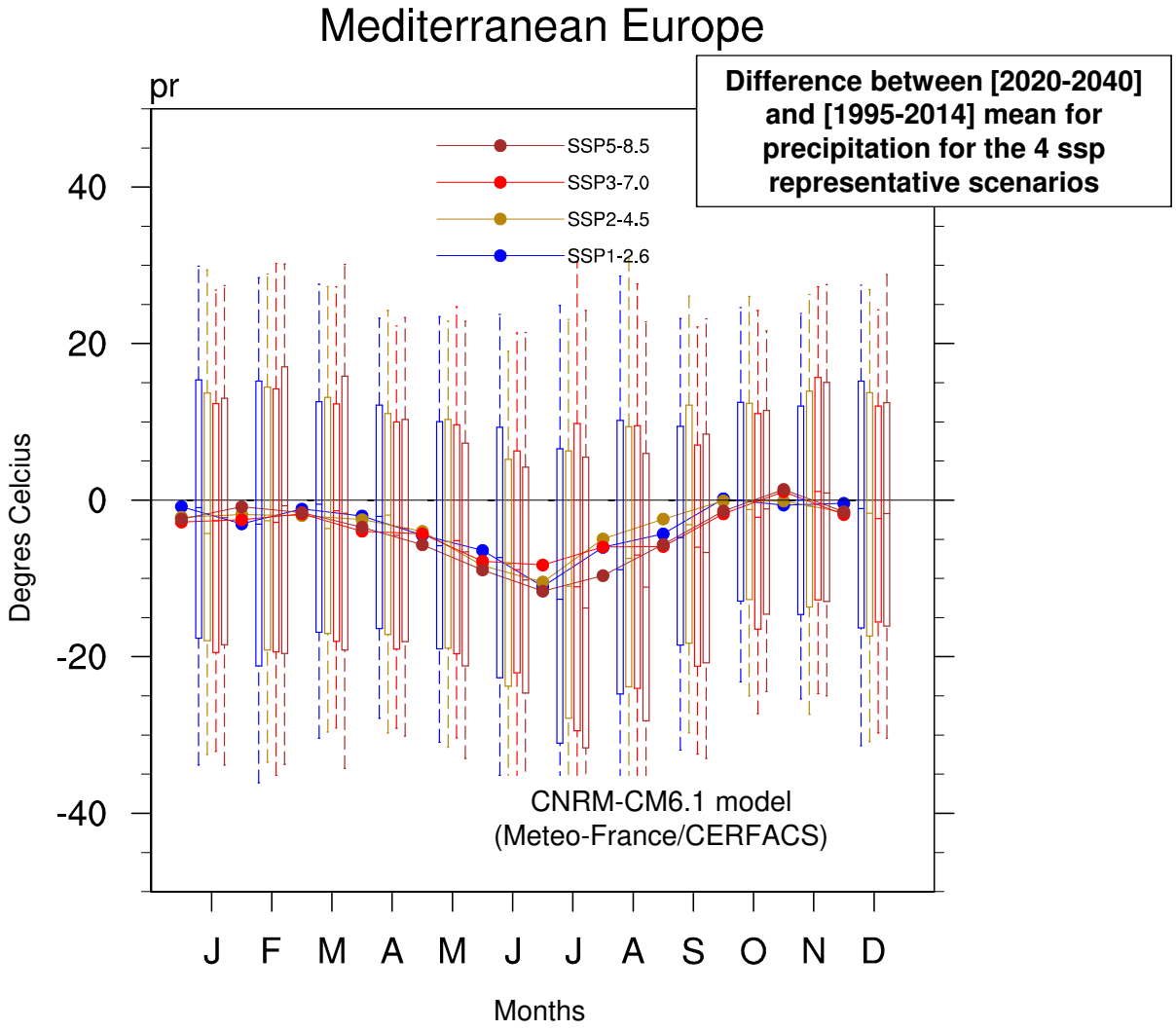
Incertitude irréductible due à la variabilité interne





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

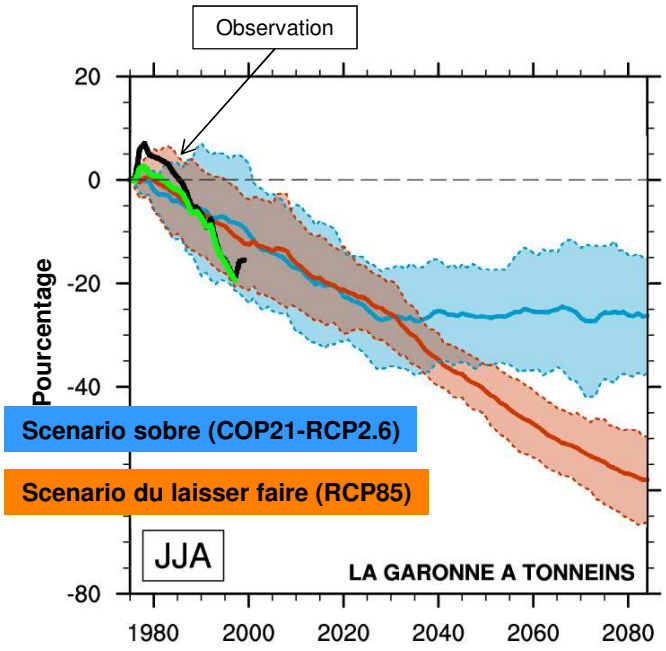
Forte variabilité interne sur l'Europe méditerranéenne se superposant à un assèchement moyen en été



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

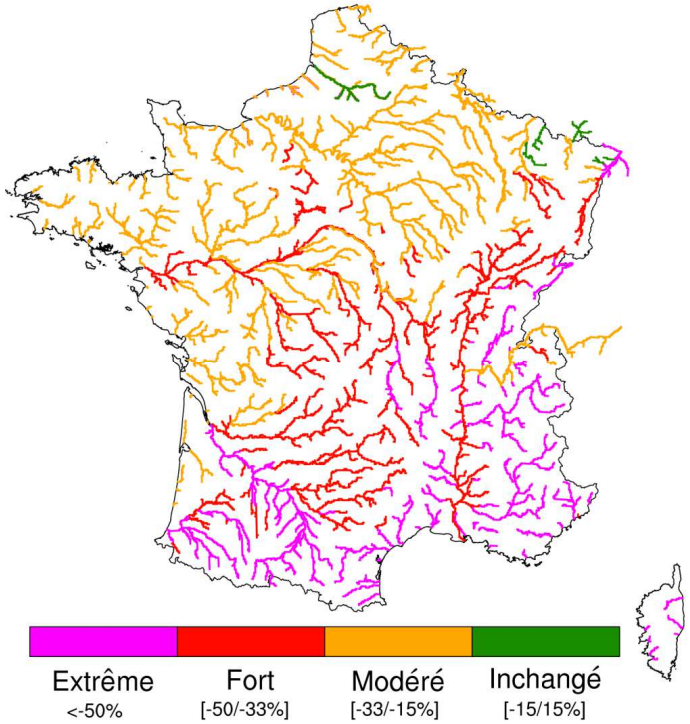
Impacts sur les rivieres/neige en France a long terme

Change in Garonne river flow estimated from 2 scenarios in summer

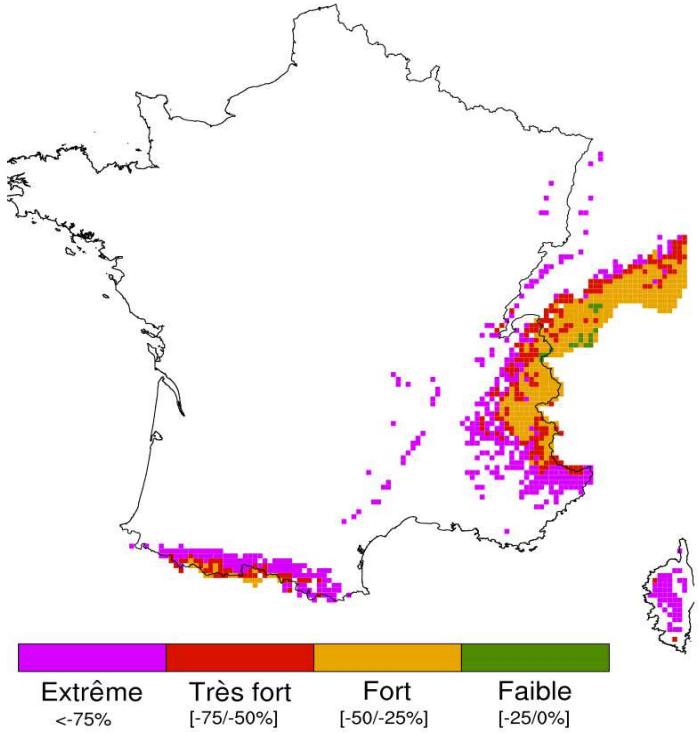


Débits d'étiage de la Garonne » diminution de ~30% à partir de 2030 quel que soit le scenario et de + de 50% à partir de 2050 dans le scenario du laisser-faire

Change in summer river flow in 2070



Change in snow cover in 2070



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

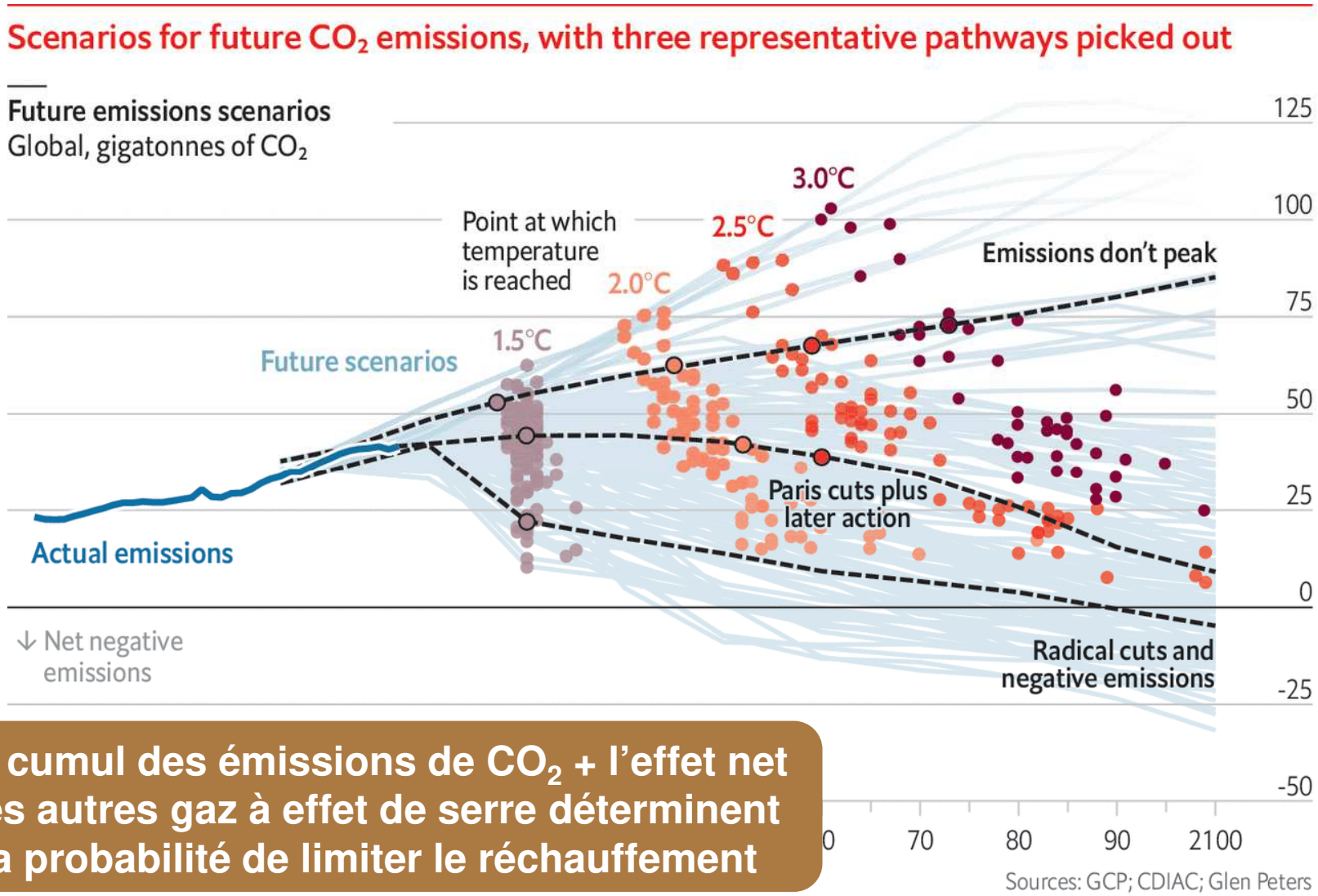
Impacts considérables sur les ressources en eau (pour l'agriculture, la sécurité alimentaire, le management de l'énergie, etc)

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.

Seuils de Température en fonction des émissions

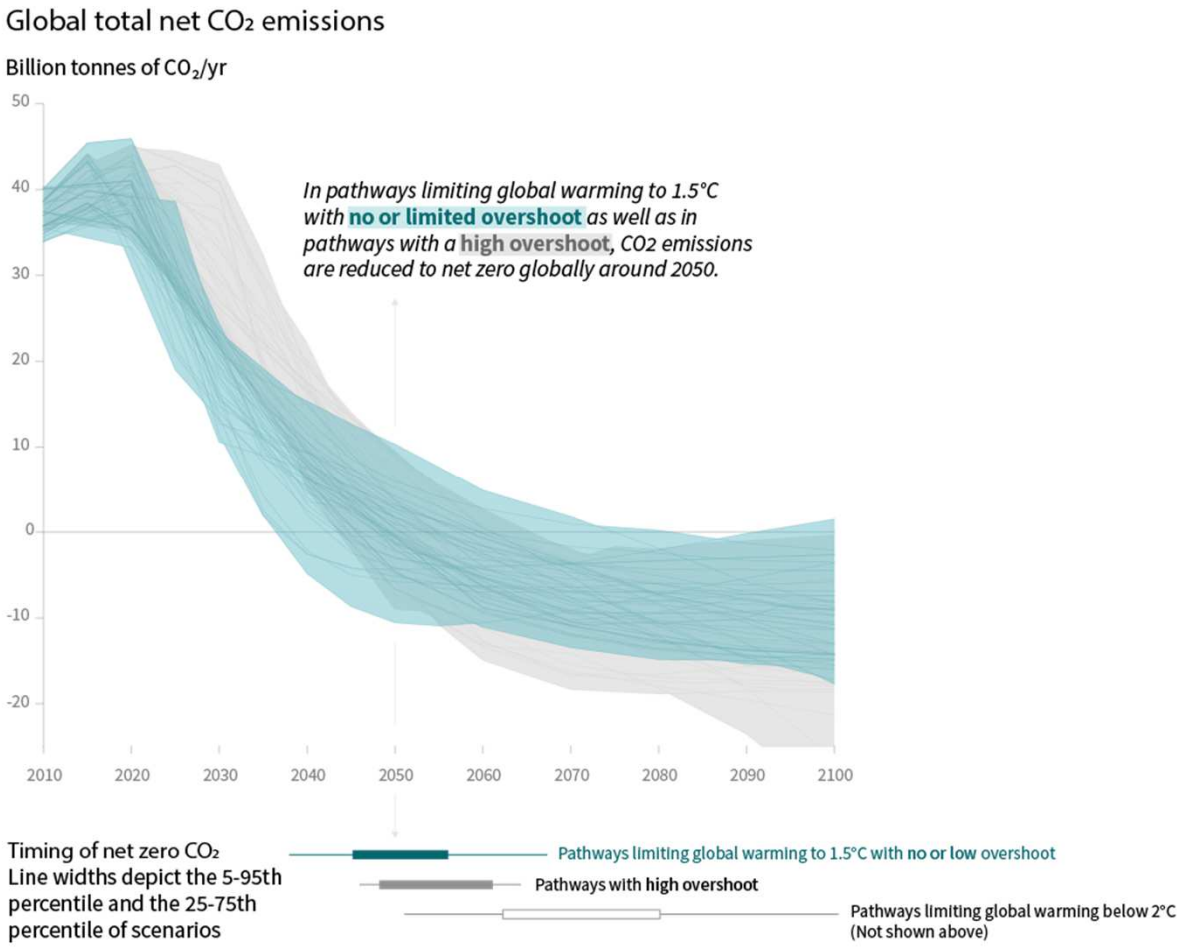


Le cumul des émissions de CO_2 + l'effet net des autres gaz à effet de serre déterminent la probabilité de limiter le réchauffement

4. Que visons nous? Ou allons nous vraiment?

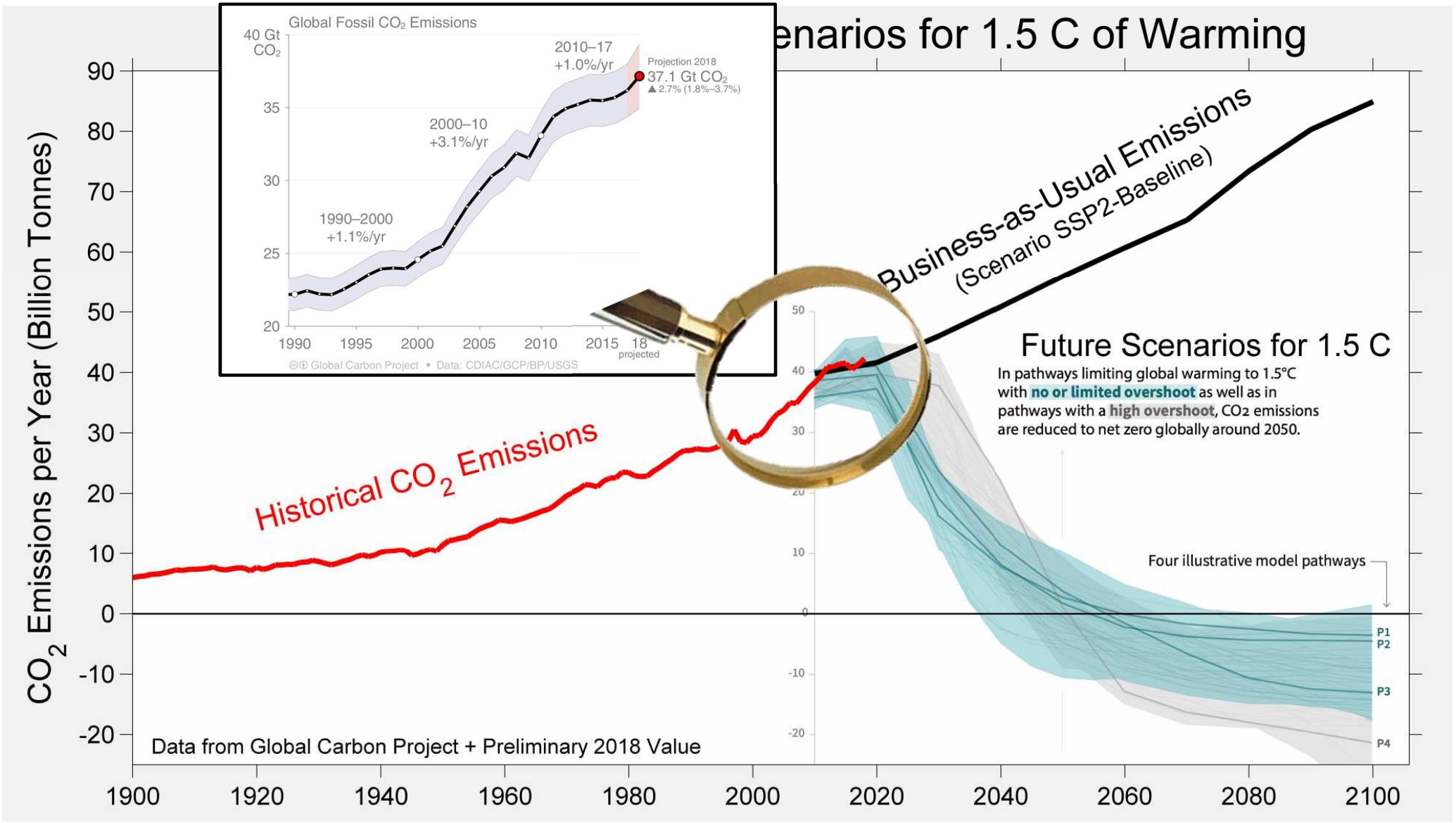
Trajectoires d'émission compatible avec la cible +1.5°C

Source: IPCC SR15



4. Que visons nous? Ou allons nous vraiment?

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



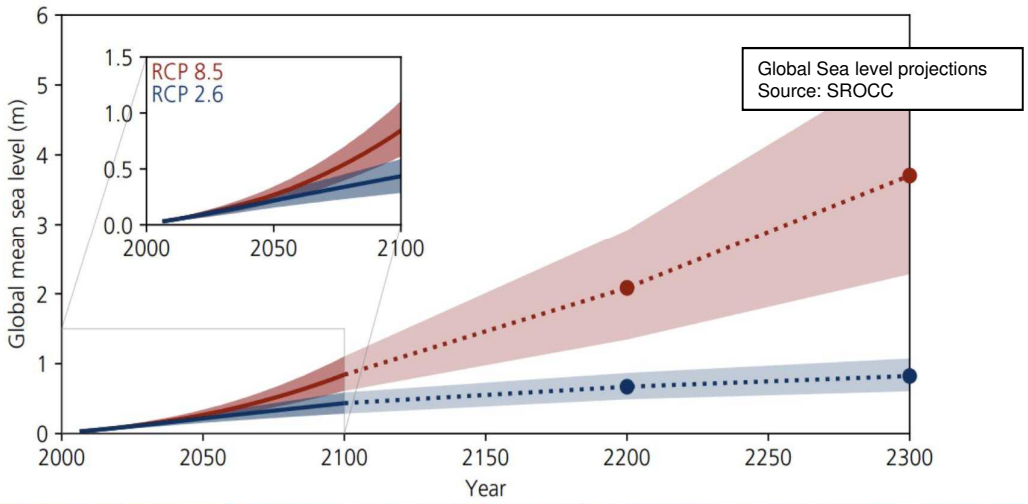
Conclusions

- 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
© Ch. CASSOU

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...