

Les changements climatiques futurs

Jean-Loup Cadiou
jean-loup.cadiou@univ-tln.fr

2021-2022



Emmanuel BARTAIRE
Février 2020 (alt environ 1400m)

Les changements climatiques futurs

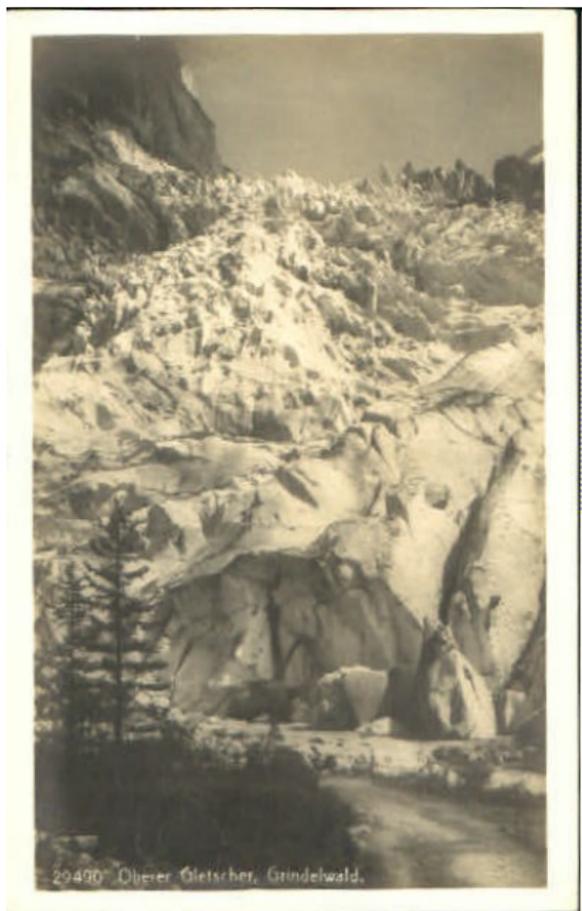
Jean-Loup Cadiou
jean-loup.cadiou@univ-tln.fr

2021-2022

Si je vous dit climat et climats futurs vous pensez à ???



Photographie anonyme 1930



Photographie anonyme 1940



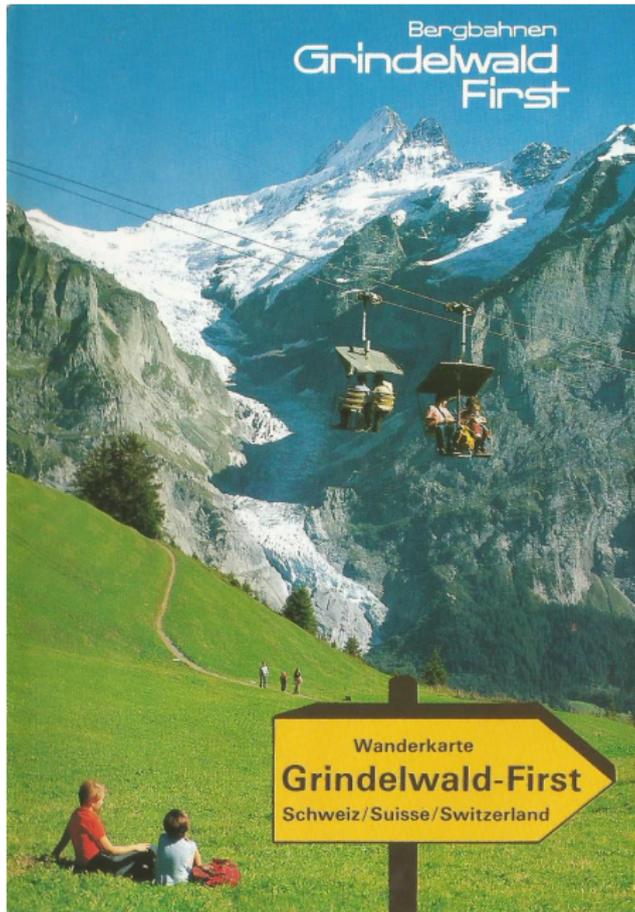
Cliché : R. Pfetzing
Été 1972

R. Pfetzing, été 1972



R. Pfetzing
11/11/1968

R. Pfetzing, Novembre 1968

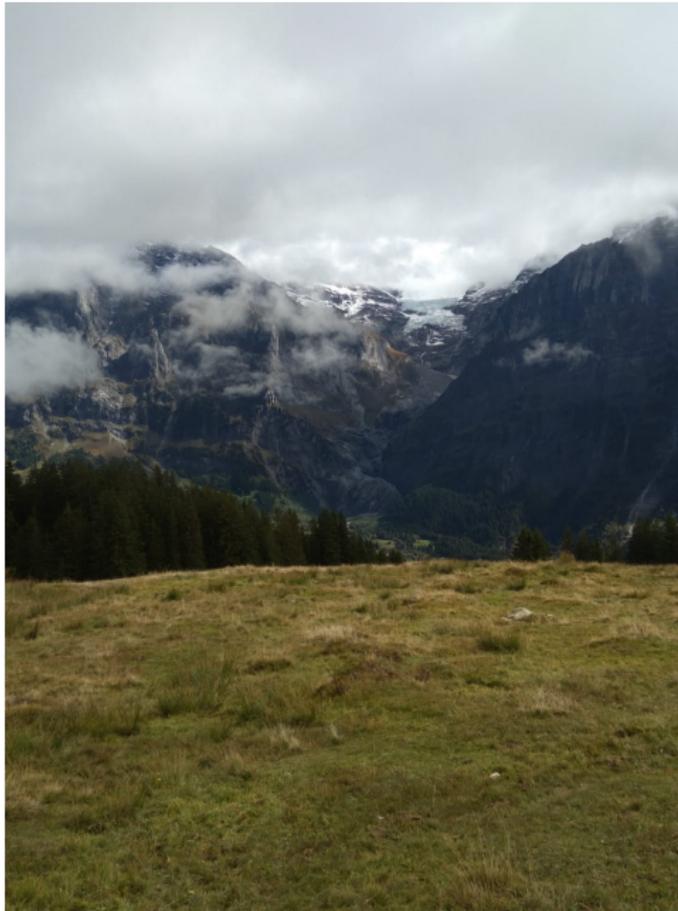


Prospectus de publicité, Années 1990



A. Pftzinger
10/2018

A. Pftzinger, octobre 2018



A. Pfetzing, octobre 2022

Idée pédagogiques

Demandez à vos élèves d'interroger leurs proches pour trouver des exemples personnels des changements climatiques



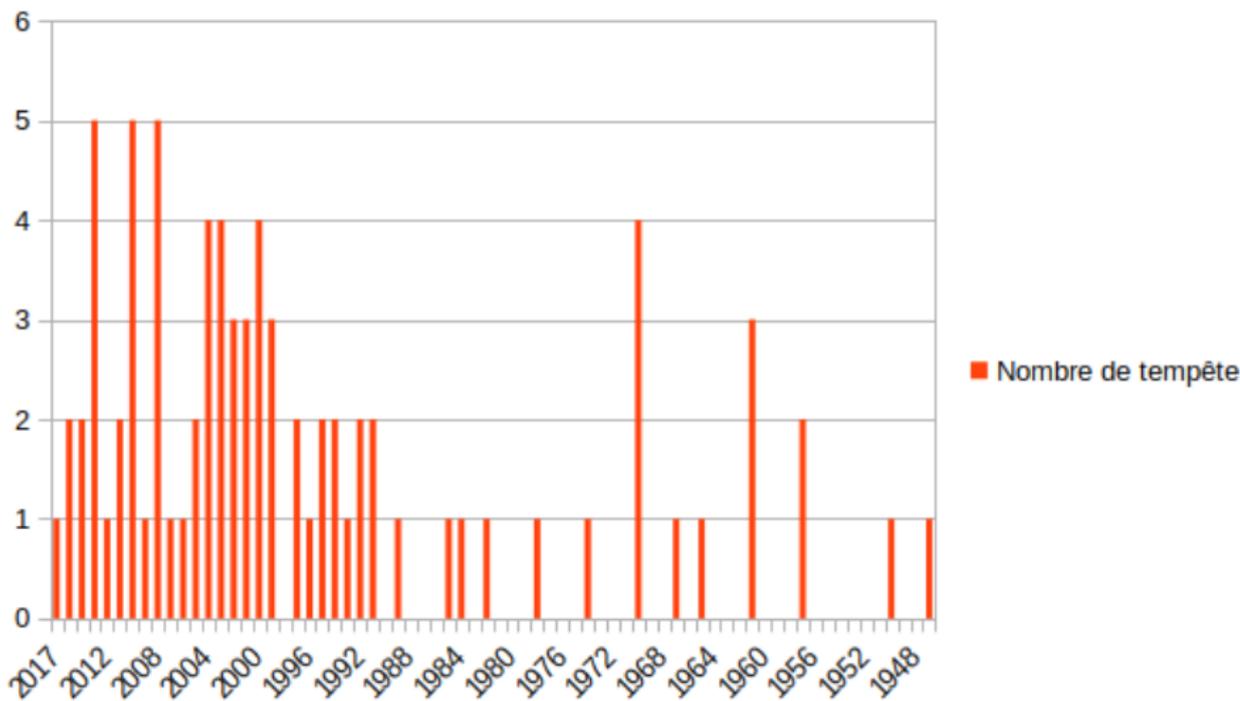
Saint Martin Vésubie, un village perché à 1h de Nice

Vues satellite

- Vue satellite avant 2020 : [\[GoogleEarth\]](#)
- Vue satellite après le 2 octobre 2020 : [\[satellites.pro\]](#)

2 octobre 2020, quelques images de la tempête Alex

[\[Youtube, chaîne Le Monde.Fr\]](#)



Fréquence des tempêtes dans le Var (1947-2017) [brgm.fr]

- └ Les changements climatiques en images
- └ Les événements climatiques extrêmes

Exemple de sites de vulgarisation mettant en évidence les effets du réchauffements futurs

- [Modélisation des climats locaux américains]
- [PLEins d'outils pour comprendre l'évolution du climats passés et futurs aux USA]
- [Application météo france]
- [NASA – Climate time machine]
- [NOAA- Variation niveau des mers]
- [Climate interactive (développé notamment par le MIT)]
- [Un site complet sur le climat]

Effet d'un changement de consommation sur le réchauffement climatique

[Parcel]

Vidéo à voir

- [The Late Show]
- [Débat Allègre - Jouzel]
- [Trump l'ennemie du climat]

**Jean-Marie Le Pen** ✓

@lepenjm



Brrr brrr on se calle les miches ! Ceux qui dénoncent le réchauffement climatique sont désespérés.

♥ 4 587 20:11 - 24 févr. 2018



💬 6 956 personnes parlent à ce sujet

**Donald J. Trump** ✓

@realDonaldTrump



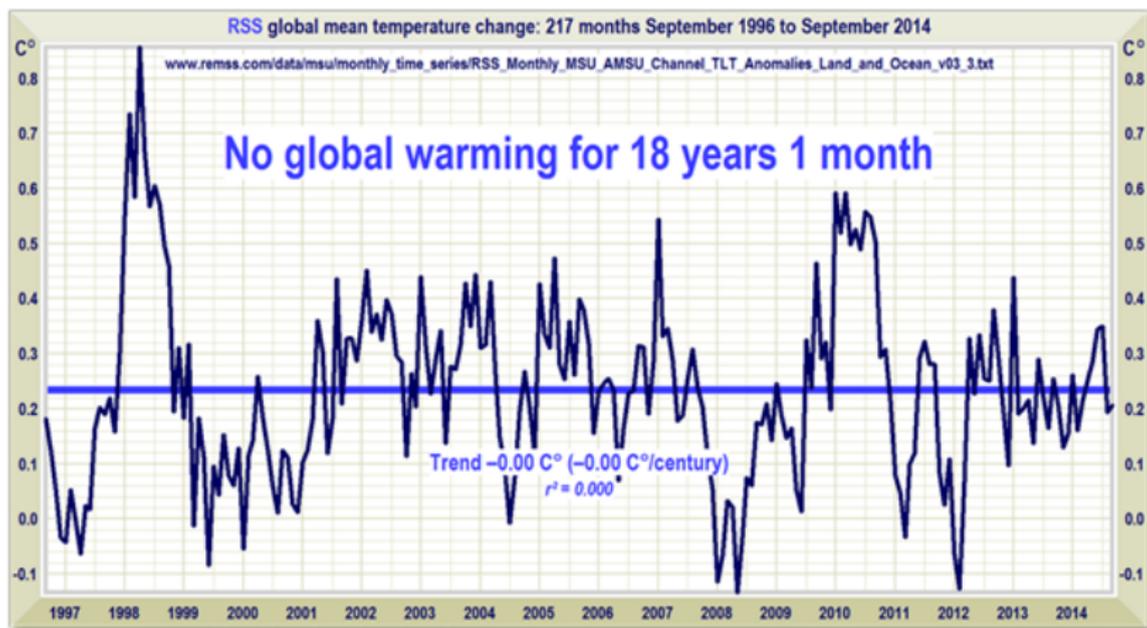
In the East, it could be the COLDEST New Year's Eve on record. Perhaps we could use a little bit of that good old Global Warming that our Country, but not other countries, was going to pay TRILLIONS OF DOLLARS to protect against. Bundle up!

♥ 193 k 01:01 - 29 déc. 2017

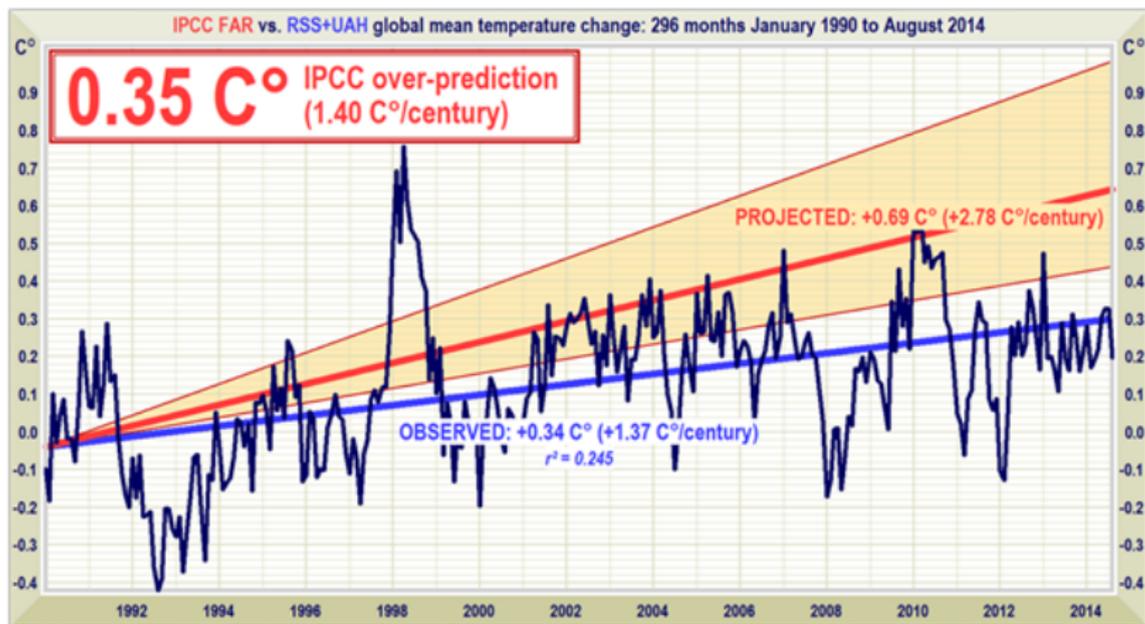


💬 188 k personnes parlent à ce sujet

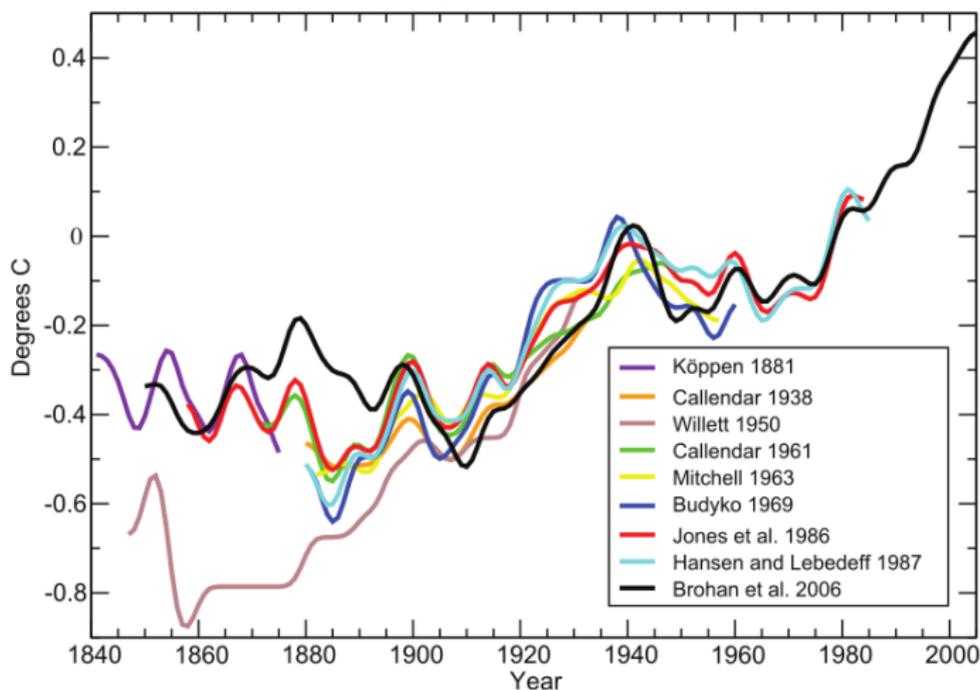




Graphique présenté sur une page web d'un site climatocceptique [contrepoints.org]



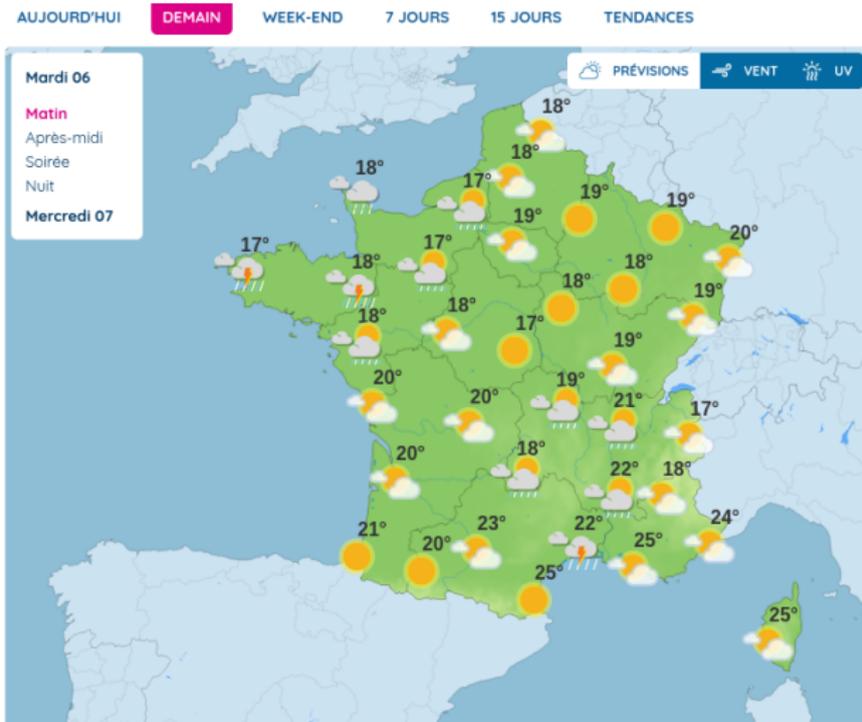
Graphique présenté sur une page web d'un site climatosceptique [contrepoints.org]



Compilation des données de température mondiale mesurée entre 1850 et 2010 [GIEC 2017]

Les arguments climato-sceptique (aux-quelles vous devrez savoir répondre à la fin de ce cours) (donnée de politifact.com)

- Le réchauffement climatique est le fruit des cycles solaires et des cycles de Milankovitch et a déjà eu lieu de manière similaire dans le passé.
- Il fait froid cette année et personne n'en parle donc le réchauffement climatique n'existe pas
- Les modèles climatiques futurs ne sont pas fiables
- Les prévisions des modèles sont pour dans des décennies et non pour l'année prochaine donc les modèles sont faux
- La Terre s'approche de plus en plus du soleil tout les ans
- Le CO_2 n'est pas le principal contributeur au changement climatique que l'on voit



Prévisions météorologiques pour la France pour le mardi 06 septembre 2022 entre 6h et 10h (prévision du lundi 05 septembre 21h) [meteofrance.fr]

METEO LA GARDE (83130) ☆

AUJOURD'HUI

PAR HEURE

DEMAIN

WEEK-END

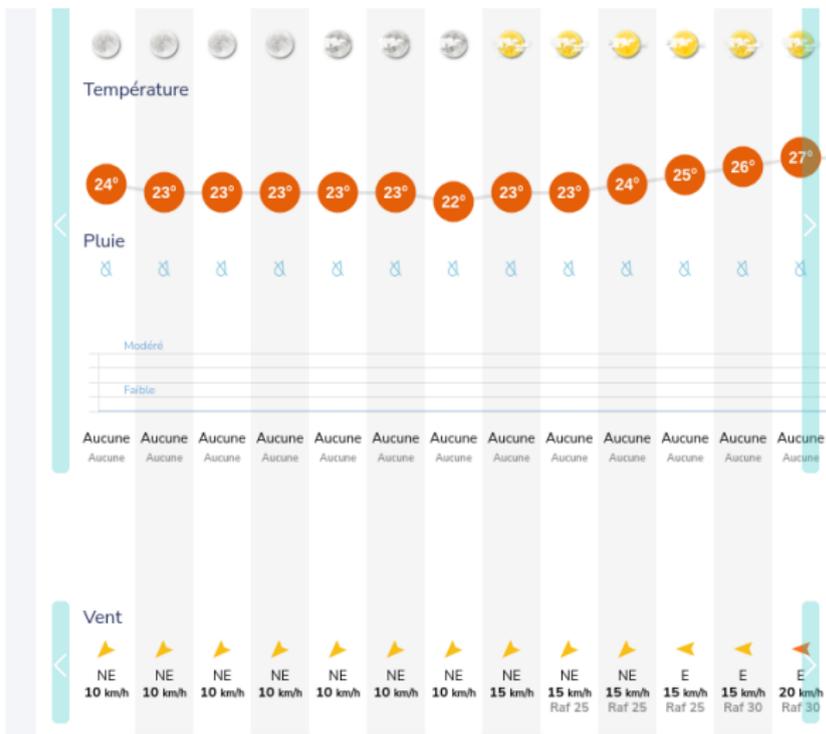
7 JOURS

15 JOURS

TENDANCES



Prévisions météorologiques pour la Garde (83130) pour le mardi 06 septembre 2022 entre 6h et 10h (prévision du lundi 05 septembre 21h) [meteofrance.fr]



Prévisions météorologiques pour la Garde (83130) pour le mardi 06 septembre 2022 entre 6h et 10h (prévision du lundi 05 septembre 21h) [lachainemeteo.com]

Prévisions météorologiques

- Se font pour une région donnée
- Se font pour une période donnée
- Se font suivant des modèles différents

- 1 Les bases de climatologie nécessaires à la compréhension des changements climatiques futures
- 2 Les instances internationales dédiées aux changements climatiques
- 3 Modélisation des climats futurs de la Terre
- 4 Effets des changements climatiques
- 5 Changements climatiques et événements extrêmes
- 6 Les changements climatiques sont dû aux activités humaines

- 1 Les bases de climatologie nécessaires à la compréhension des changements climatiques futures
 - Les différents climats sur Terre
 - Les grands types de climats
 - Caractéristiques des grands types de climats terrestres
 - Les différents écosystèmes associées aux différents climats
 - Paramètres influençant les différents types de climats sur Terre
 - Flux solaire et température d'équilibre de la Terre
 - L'effet de serre
- 2 Les instances internationales dédiées aux changements climatiques
- 3 Modélisation des climats futurs de la Terre
- 4 Effets des changements climatiques
- 5 Changements climatiques et événements extrêmes
- 6 Les changements climatiques sont dû aux activités humaines

Guide to Iceland













Problématiques

- Quels sont les différents climats terrestres et leurs Caractéristiques?
- Quels sont les principaux écosystèmes liées aux climats ?
- Quels sont paramètres physico-chimiques-géographiques à l'origine des différents climats terrestre

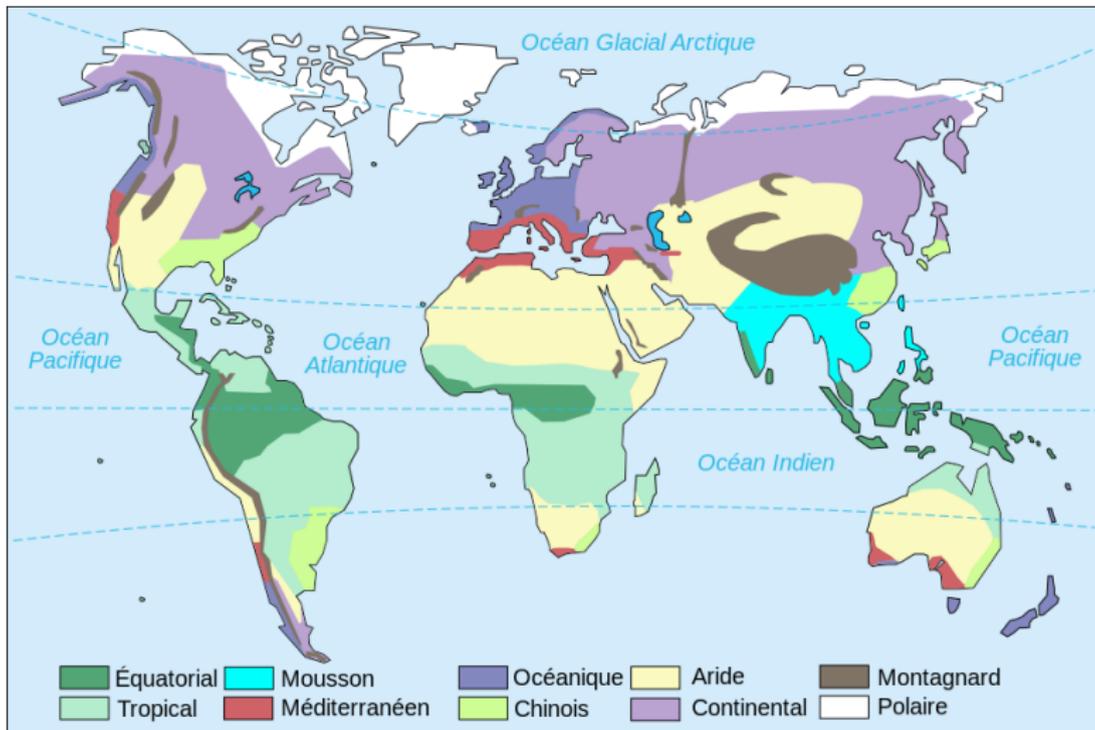
- 1 Les bases de climatologie nécessaires à la compréhension des changements climatiques futures
 - Les différents climats sur Terre
 - Les grands types de climats
 - Caractéristiques des grands types de climats terrestres
 - Les différents écosystèmes associées aux différents climats
 - Paramètres influençant les différents types de climats sur Terre
 - Flux solaire et température d'équilibre de la Terre
 - L'effet de serre
- 2 Les instances internationales dédiées aux changements climatiques
- 3 Modélisation des climats futurs de la Terre
- 4 Effets des changements climatiques
- 5 Changements climatiques et événements extrêmes
- 6 Les changements climatiques sont dû aux activités humaines

- └ Les bases de climatologie nécessaires à la compréhension des changements climatiques futures
- └ Les différents climats sur Terre

Utilisation de Google Earth

Les différents climats sur Terre (niveau collège ...)

- Climats polaires
- Climats sub-polaire
- Climats continentaux
- Climats océanique
- Climats désertique
- Climats sub-tropicales
- Climats tropicales
- Climats équatorials



Carte des différents climats terrestres

- 1 Les bases de climatologie nécessaires à la compréhension des changements climatiques futures
 - Les différents climats sur Terre
 - Les grands types de climats
 - Caractéristiques des grands types de climats terrestres
 - Les différents écosystèmes associées aux différents climats
 - Paramètres influençant les différents types de climats sur Terre
 - Flux solaire et température d'équilibre de la Terre
 - L'effet de serre
- 2 Les instances internationales dédiées aux changements climatiques
- 3 Modélisation des climats futurs de la Terre
- 4 Effets des changements climatiques
- 5 Changements climatiques et événements extrêmes
- 6 Les changements climatiques sont dû aux activités humaines

Changements climatiques

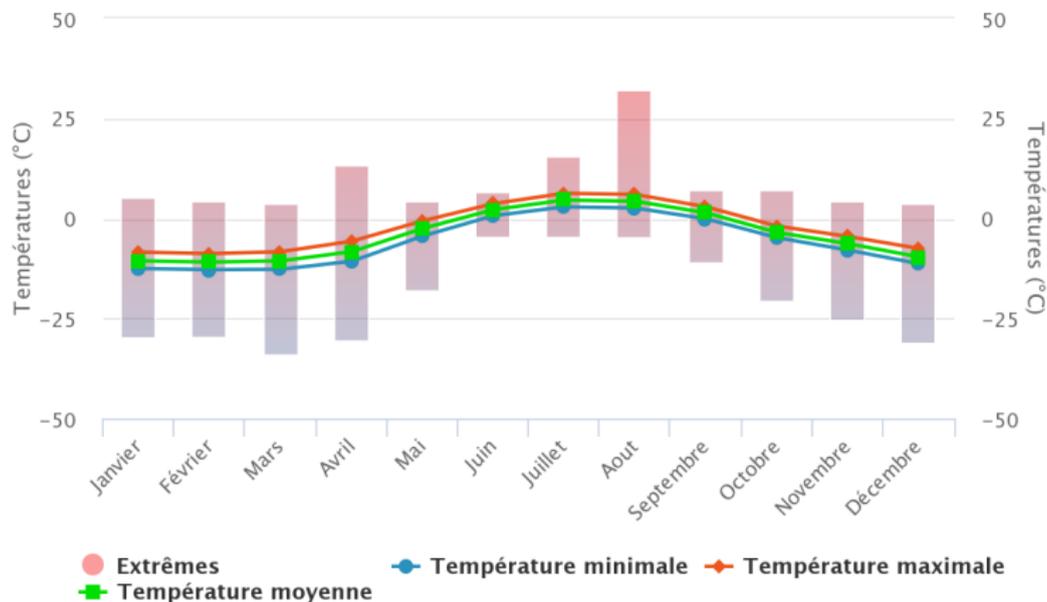
- └ Les bases de climatologie nécessaires à la compréhension des changements climatiques futures
- └ Les différents climats sur Terre



Localisation de la station climatique de Svalbard (climats polaire, végétation de type Tundra)

Températures à Hornsund River – Svalbard

Période 1981-2010

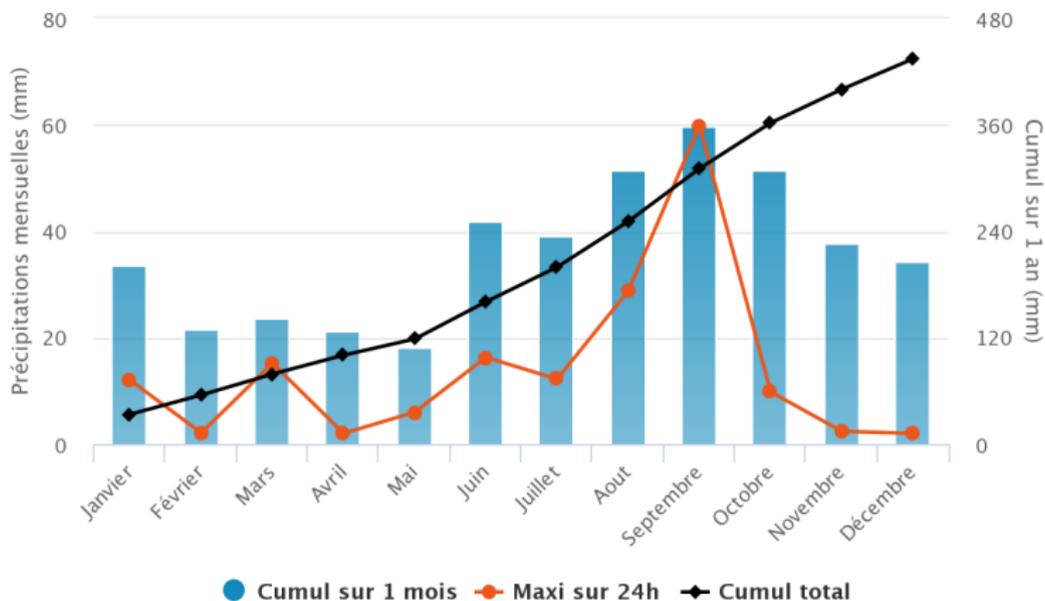


infoclimat.fr

Evolution des températures (1981-2010) à Svalbard [infoclimat.fr]

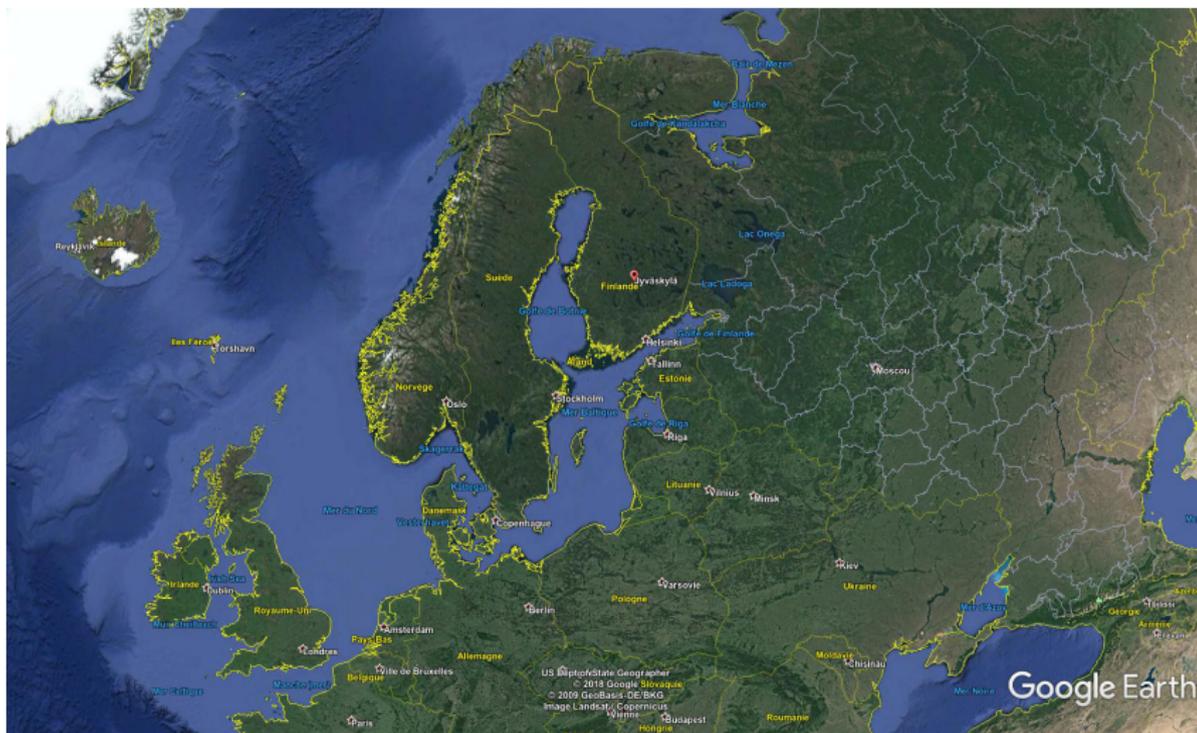
Précipitations à Hornsund River – Svalbard

Période 1981-2010

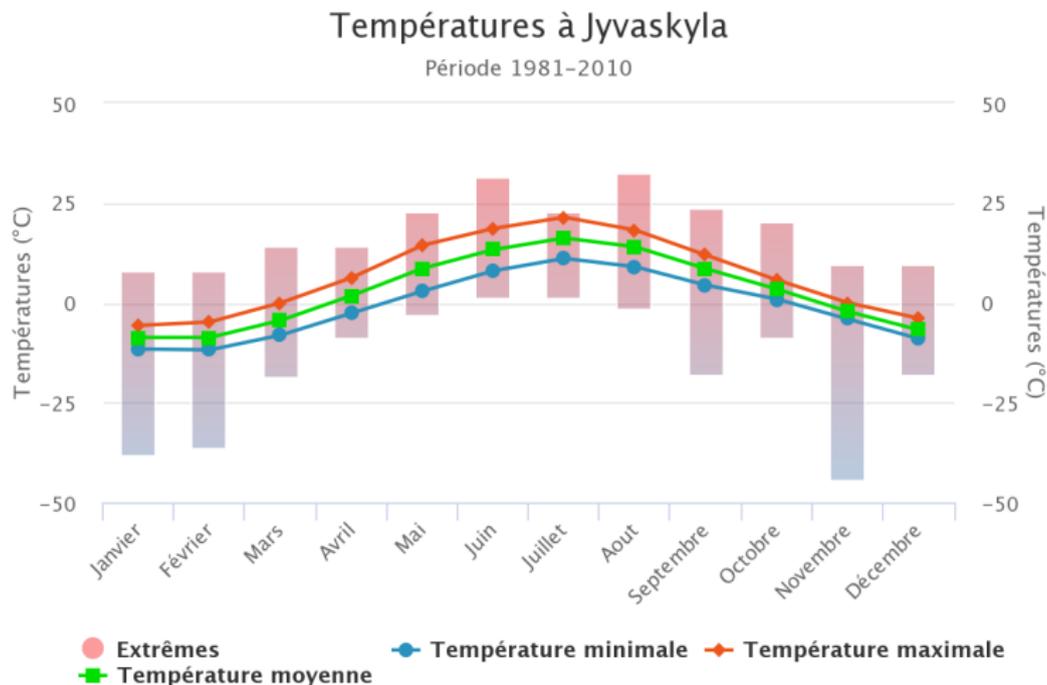


infoclimat.fr

Evolution des précipitations (1981-2010) à Svalbard [\[infoclimat.fr\]](http://infoclimat.fr)



Localisation de Jyväskylä (Finlande) (climats sub-polaire, végétation de type Taïga) [GoogleEarth]

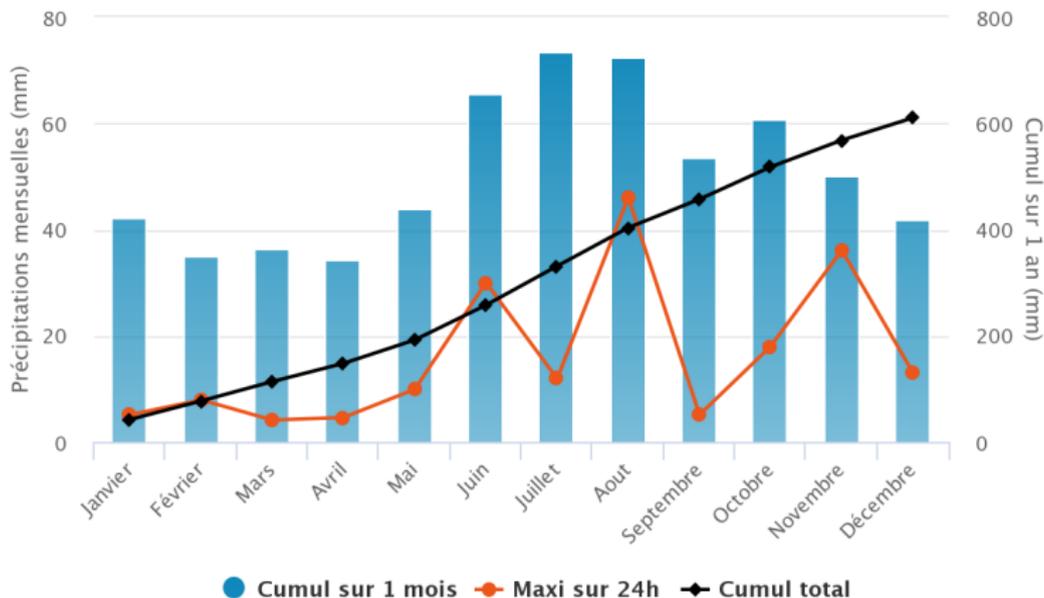


infoclimat.fr

Evolution des températures (1981-2010) à Jyvaskyla (Finlande)
[\[infoclimat.fr\]](http://infoclimat.fr)

Précipitations à Jyvaskyla

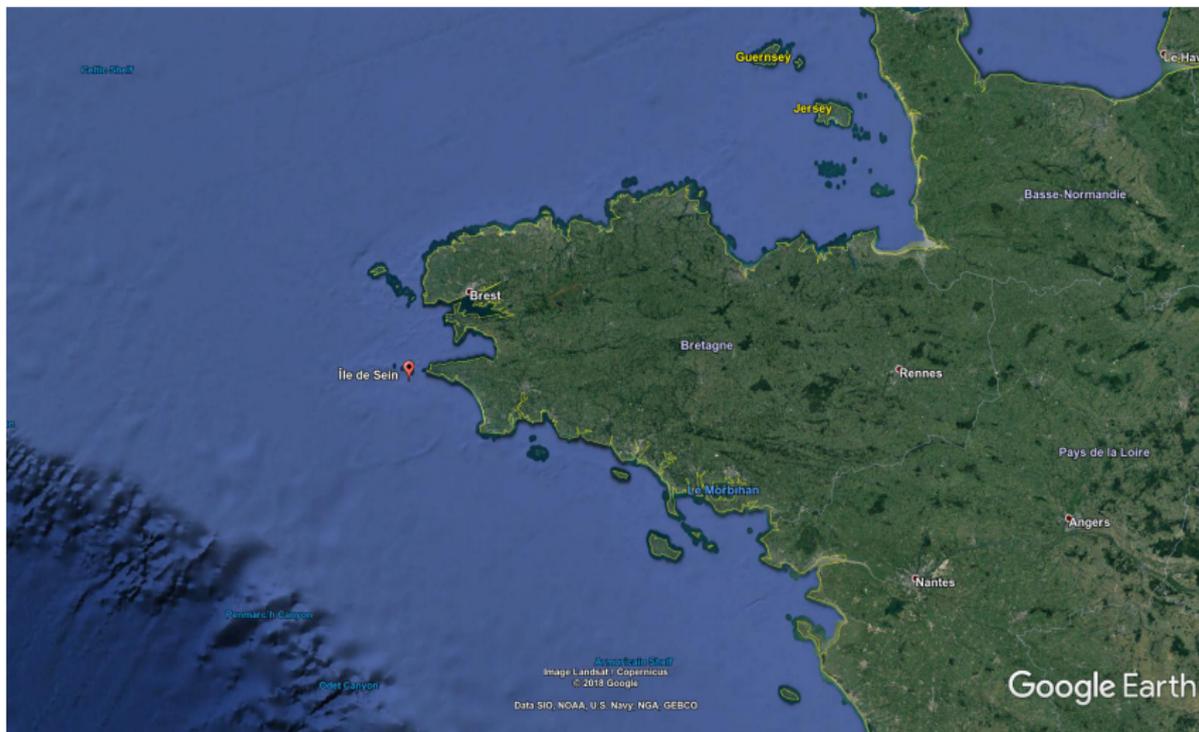
Période 1981-2010



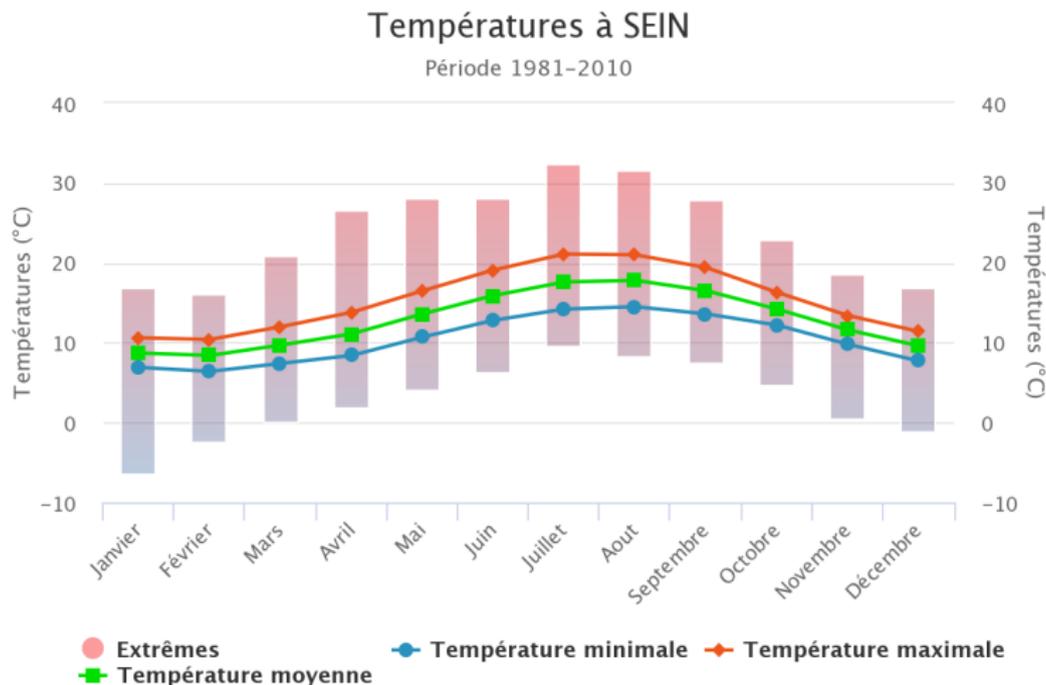
infoclimat.fr

Evolution des températures (1981-2010) à Jyvaskyla (Finlande)

[\[infoclimat.fr\]](http://infoclimat.fr)



**Localisation de l'île de Sein (France) (climat océanique)
[GoogleEarth]**

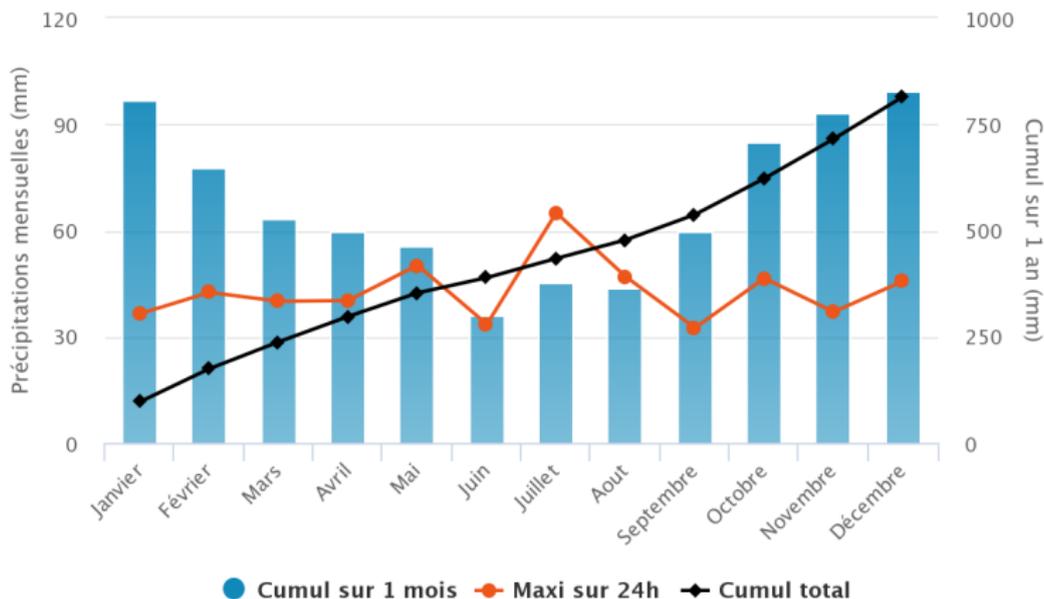


infoclimat.fr

Evolution des températures (1981-2010) sur l'île de Sein (France)
[\[infoclimat.fr\]](http://infoclimat.fr)

Précipitations à SEIN

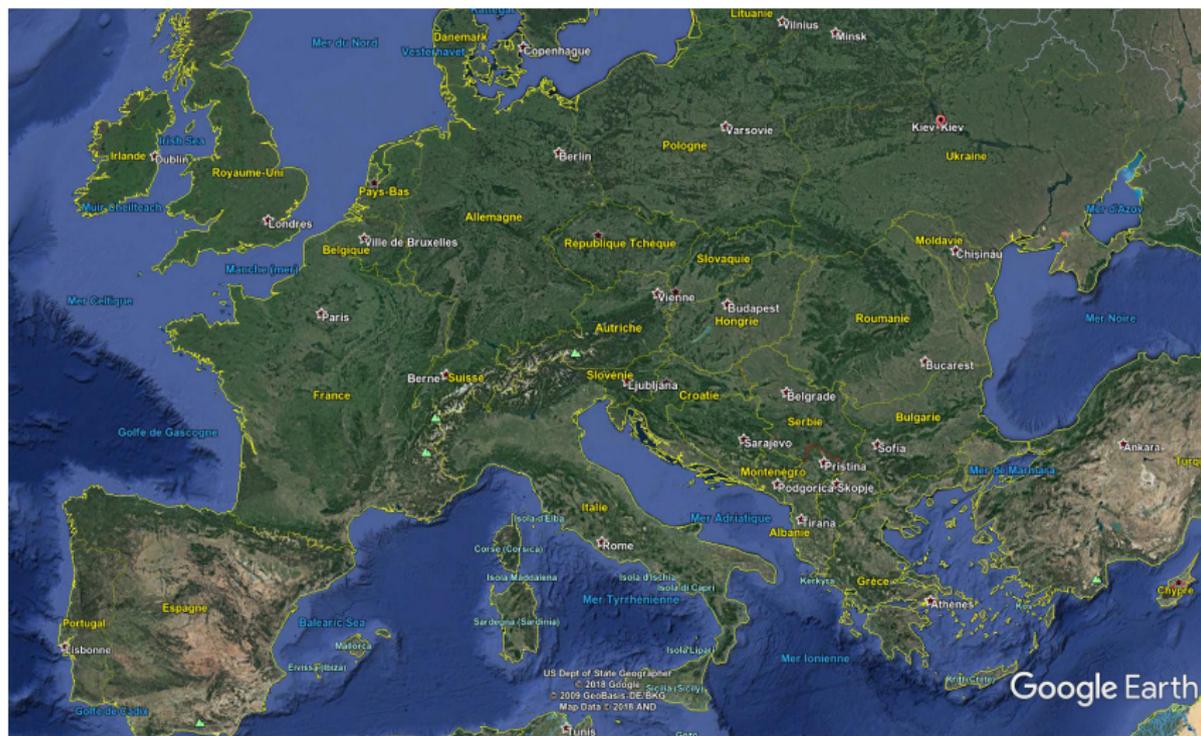
Période 1981-2010



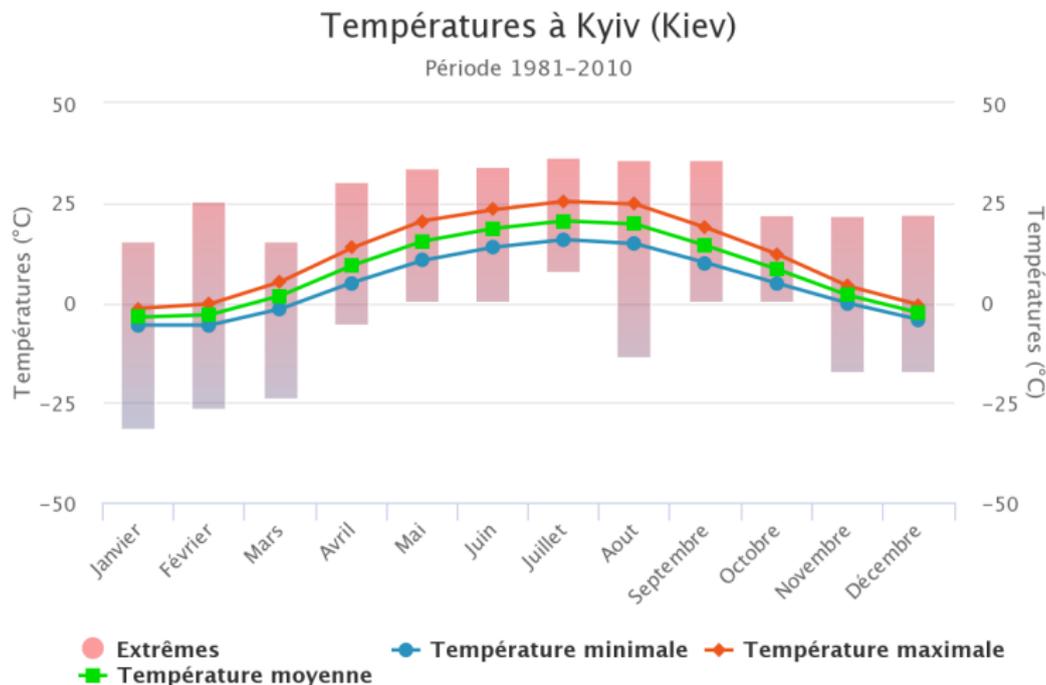
infoclimat.fr

Evolution des précipitations (1981-2010) sur l'île de Sein (France)

[\[infoclimat.fr\]](http://infoclimat.fr)



Localisation de Kiev (Ukraine) (climat continental) [GoogleEarth]

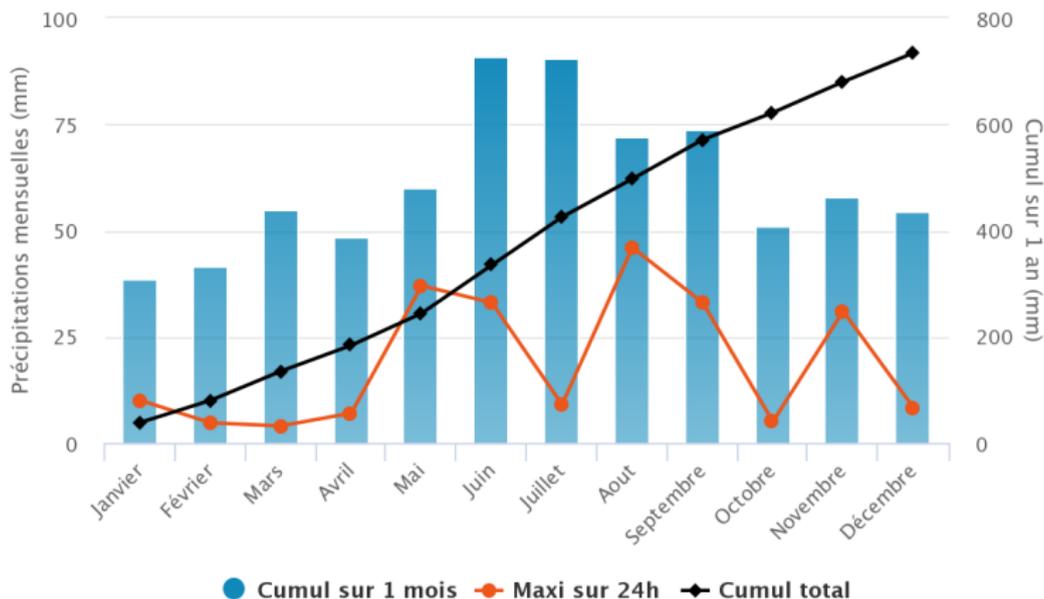


infoclimat.fr

Evolution des températures (1981-2010) à Kiev (Ukraine)
[\[infoclimat.fr\]](http://infoclimat.fr)

Précipitations à Kyiv (Kiev)

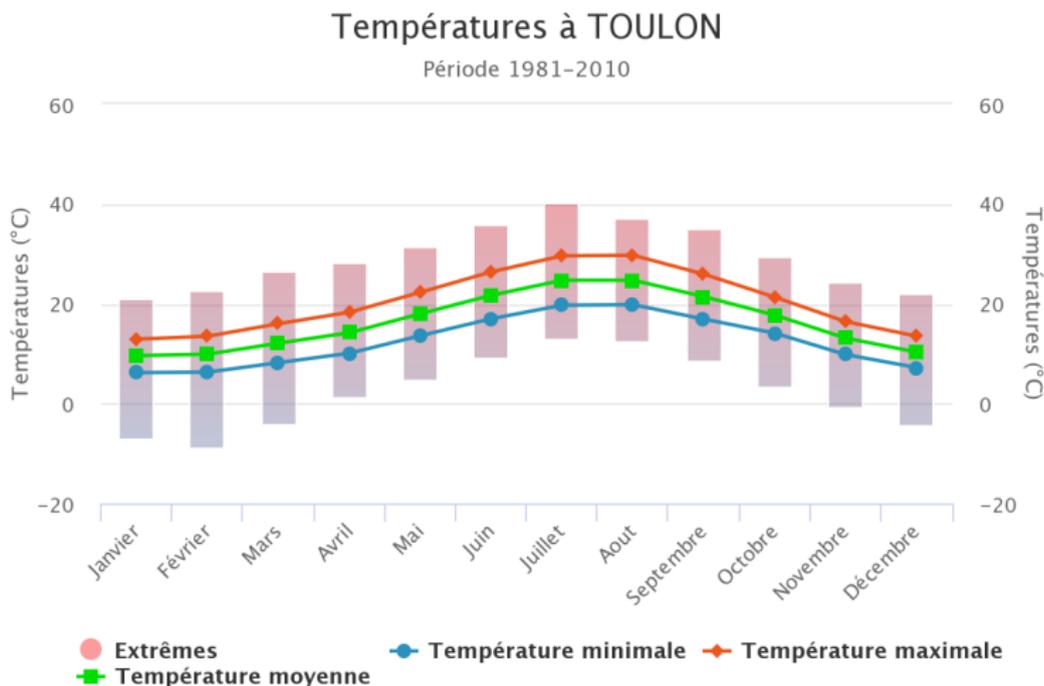
Période 1981-2010



infoclimat.fr

Evolution des précipitations (1981-2010) à Kiev (Ukraine)

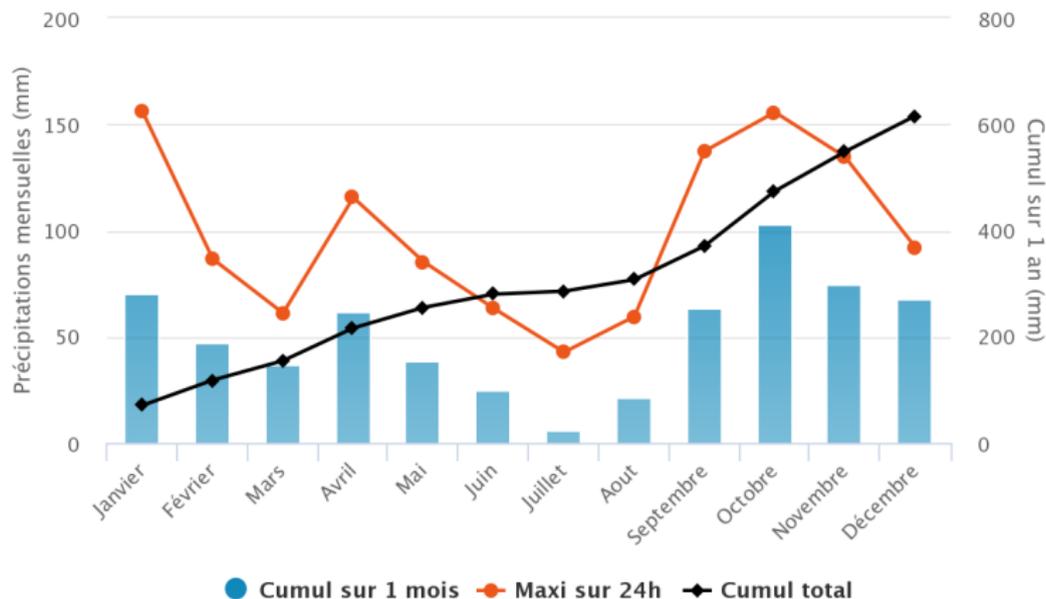
[\[infoclimat.fr\]](http://infoclimat.fr)



Evolution des températures (1981-2010) à Toulon (France)
 (climats méditerranéen) [infoclimat.fr]

Précipitations à TOULON

Période 1981-2010



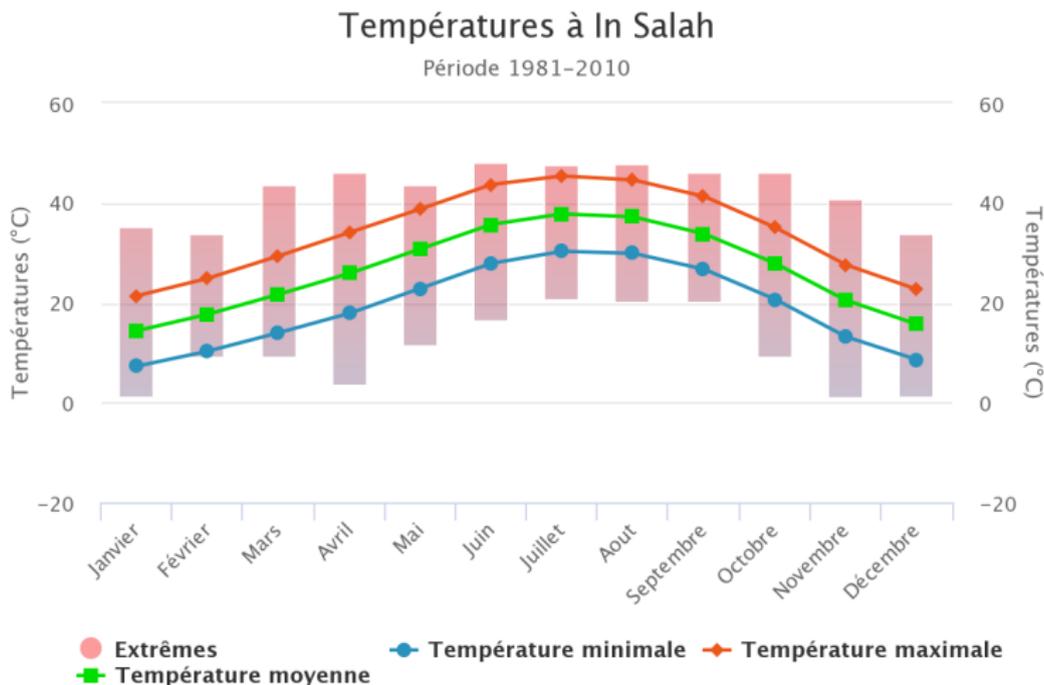
infoclimat.fr

Evolution des précipitations (1981-2010) à Toulon (France)

[\[infoclimat.fr\]](http://infoclimat.fr)



**Localisation de Ain Salah (Algérie) (climat désertique)
[GoogleEarth]**

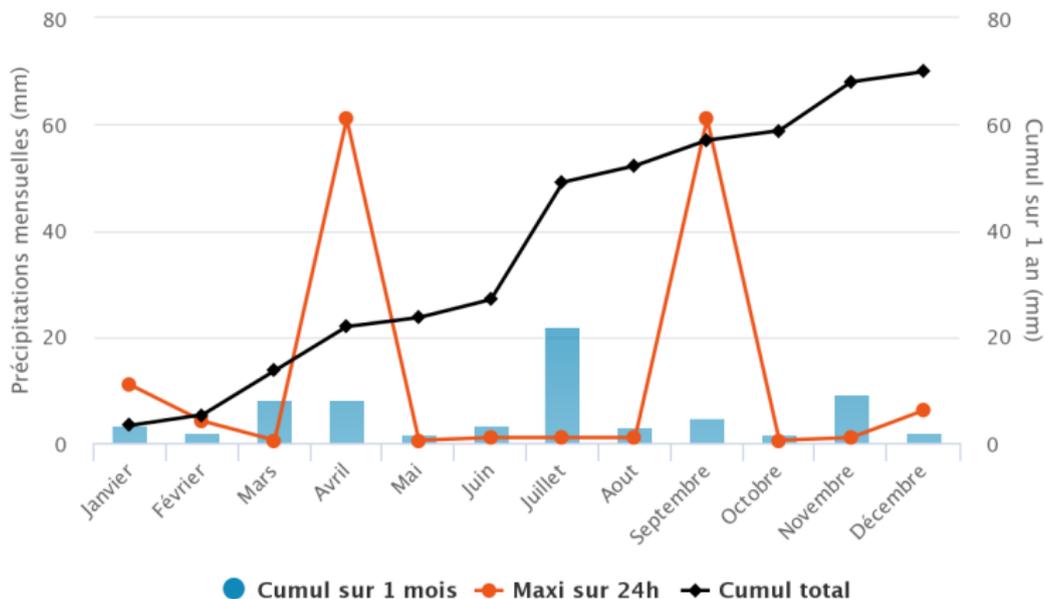


infoclimat.fr

Evolution des températures (1981-2010) à Ain Salah (Algérie)
[\[infoclimat.fr\]](http://infoclimat.fr)

Précipitations à In Salah

Période 1981-2010



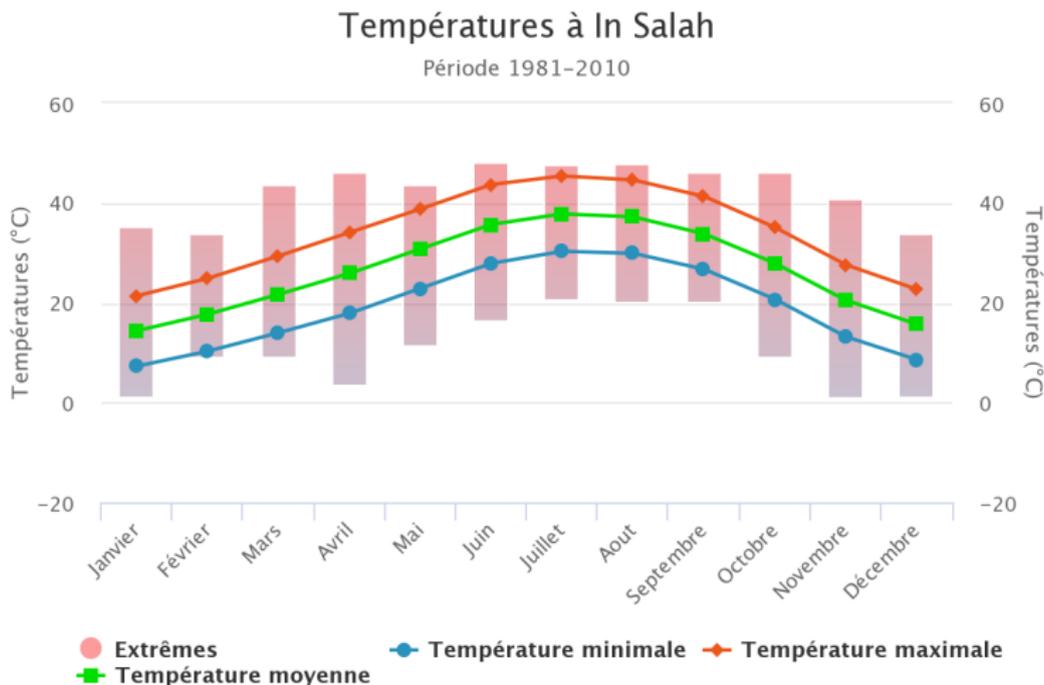
infoclimat.fr

Evolution des précipitations (1981-2010) à Ain Salah (Algérie)

[\[infoclimat.fr\]](http://infoclimat.fr)



**Localisation de Ain Salah (Algérie) (climat désertique)
[GoogleEarth]**

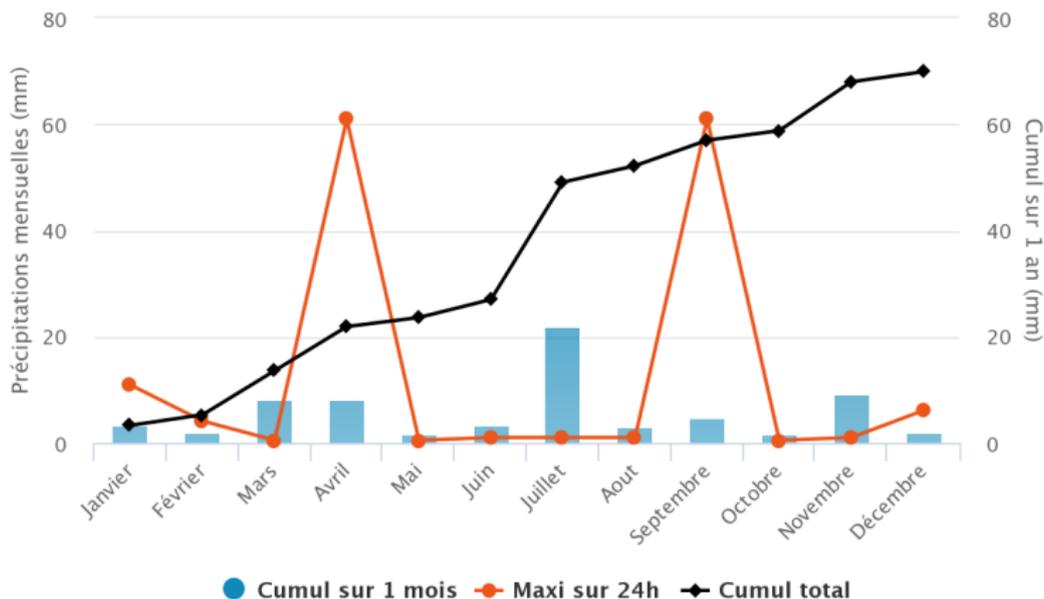


infoclimat.fr

Evolution des températures (1981-2010) à Ain Salah (Algérie)
[\[infoclimat.fr\]](http://infoclimat.fr)

Précipitations à In Salah

Période 1981-2010



infoclimat.fr

Evolution des précipitations (1981-2010) à Ain Salah (Algérie)

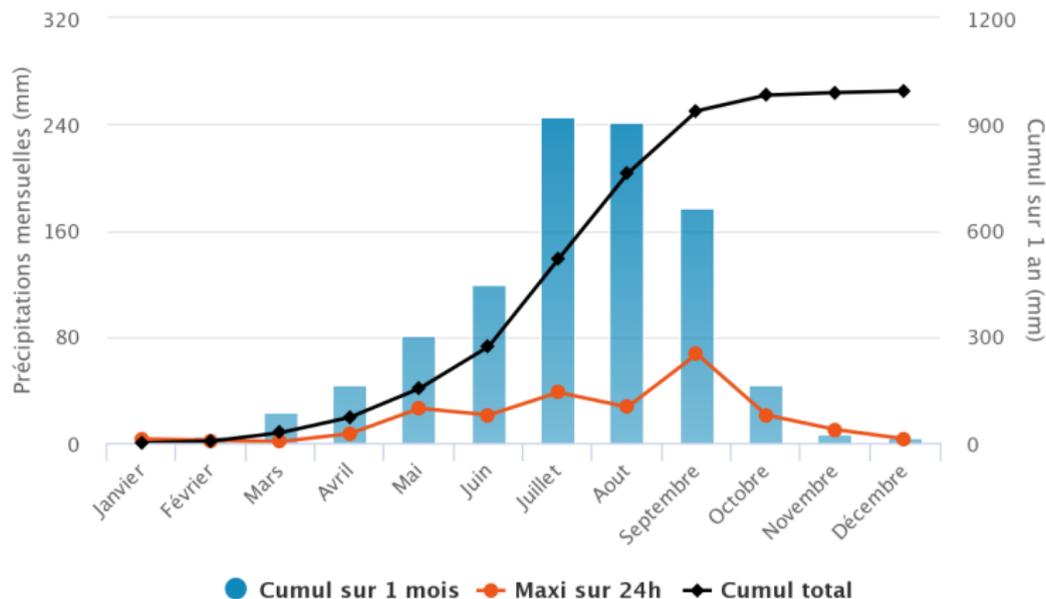
[\[infoclimat.fr\]](http://infoclimat.fr)



Localisation de Ouagadougou (Burkina-Faso), climat équatorial

Précipitations à Ouagadougou

Période 1981-2010

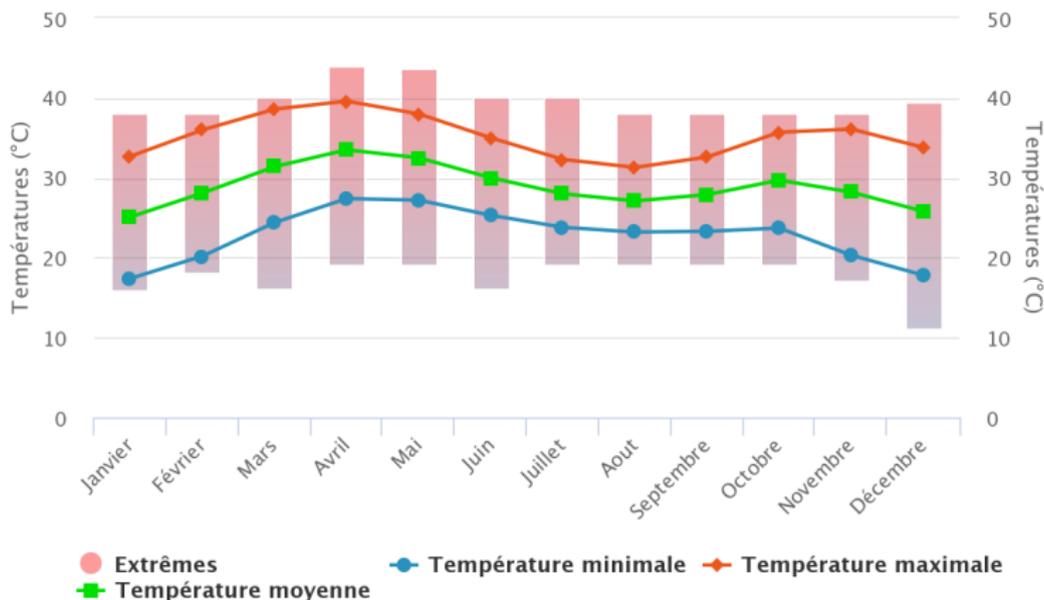


infoclimat.fr

Evolution des températures (1981-2010) à Ouagadougou
(Burkina-Faso) [infoclimat.fr]

Températures à Ouagadougou

Période 1981-2010

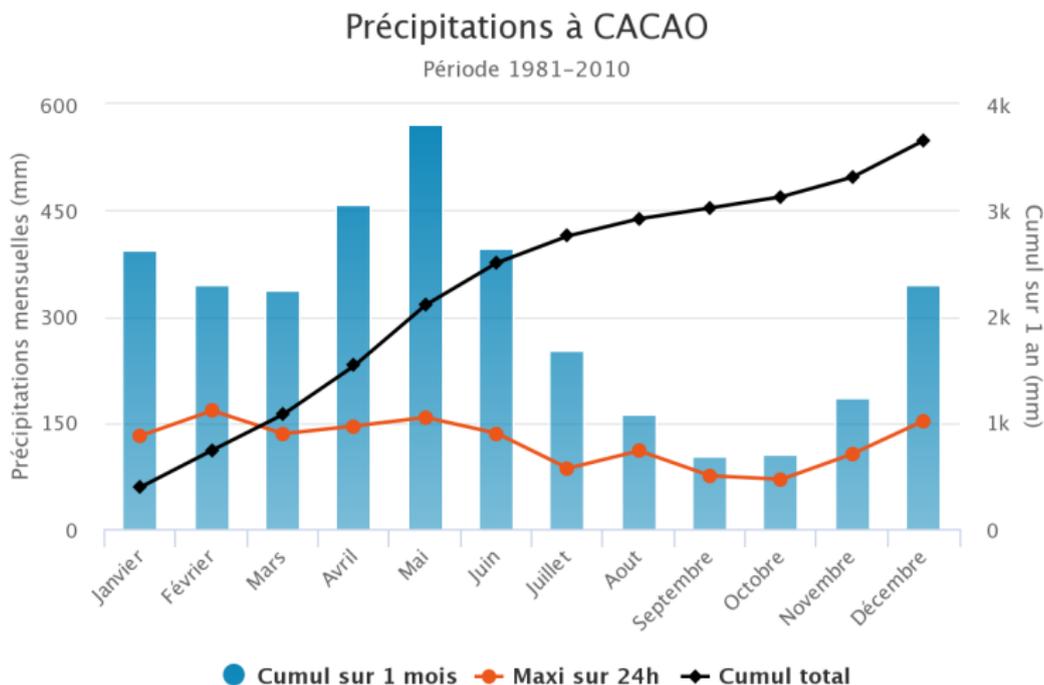


infoclimat.fr

Evolution des précipitations (1981-2010) à Ouagadougou
(Burkina-Faso) [infoclimat.fr]



Localisation de Cacao (Guyane), climat équatorial



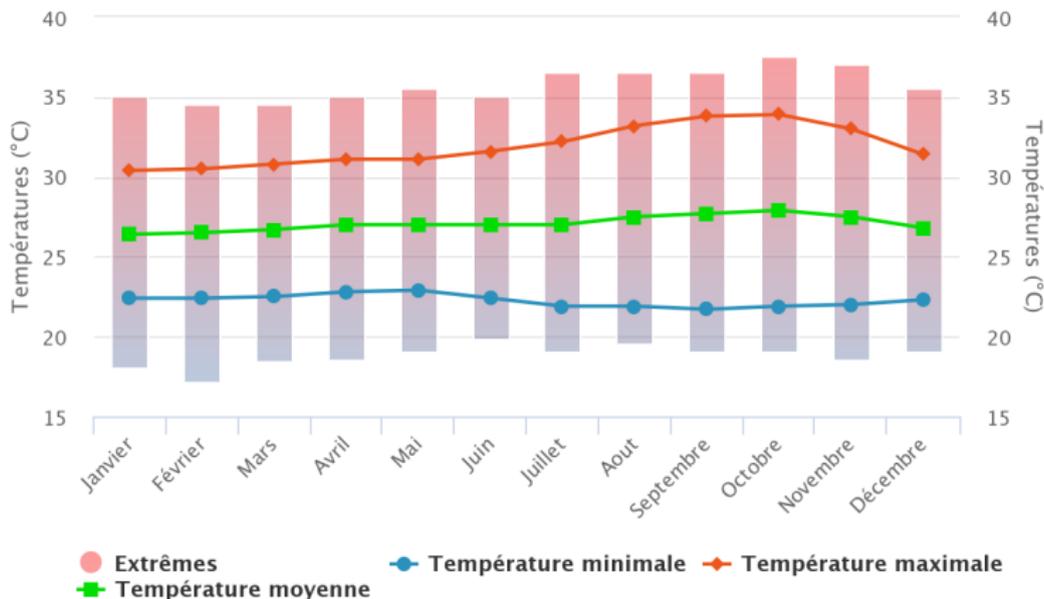
infoclimat.fr

Evolution des températures (1981-2010) à Cacao (Guyane)

[\[infoclimat.fr\]](http://infoclimat.fr)

Températures à CACAO

Période 1981-2010

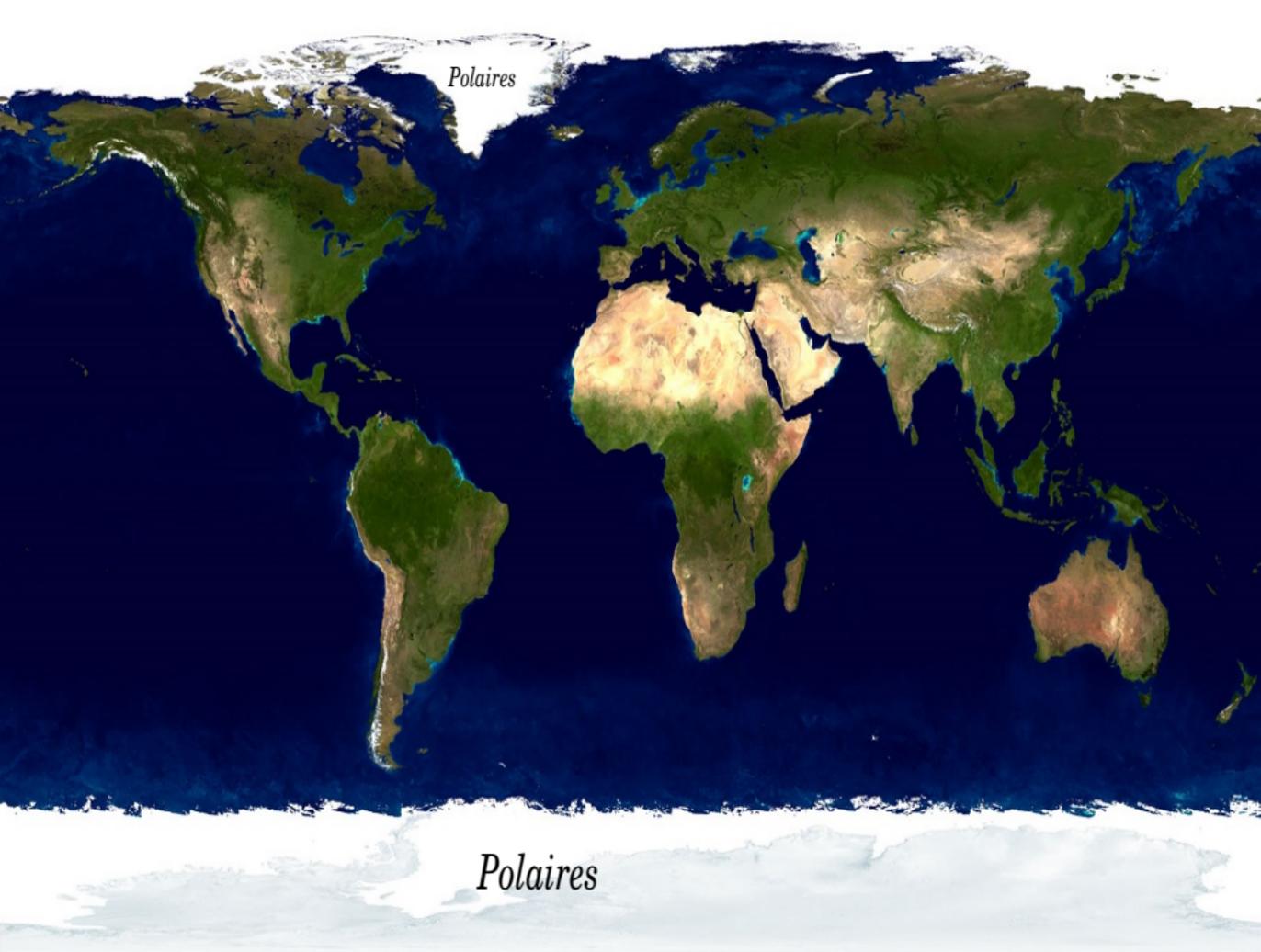


infoclimat.fr

Evolution des précipitations (1981-2010) à Cacao (Guyane)

[\[infoclimat.fr\]](http://infoclimat.fr)

- 1 Les bases de climatologie nécessaires à la compréhension des changements climatiques futures
 - Les différents climats sur Terre
 - Les grands types de climats
 - Caractéristiques des grands types de climats terrestres
 - Les différents écosystèmes associées aux différents climats
 - Paramètres influençant les différents types de climats sur Terre
 - Flux solaire et température d'équilibre de la Terre
 - L'effet de serre
- 2 Les instances internationales dédiées aux changements climatiques
- 3 Modélisation des climats futurs de la Terre
- 4 Effets des changements climatiques
- 5 Changements climatiques et événements extrêmes
- 6 Les changements climatiques sont dû aux activités humaines



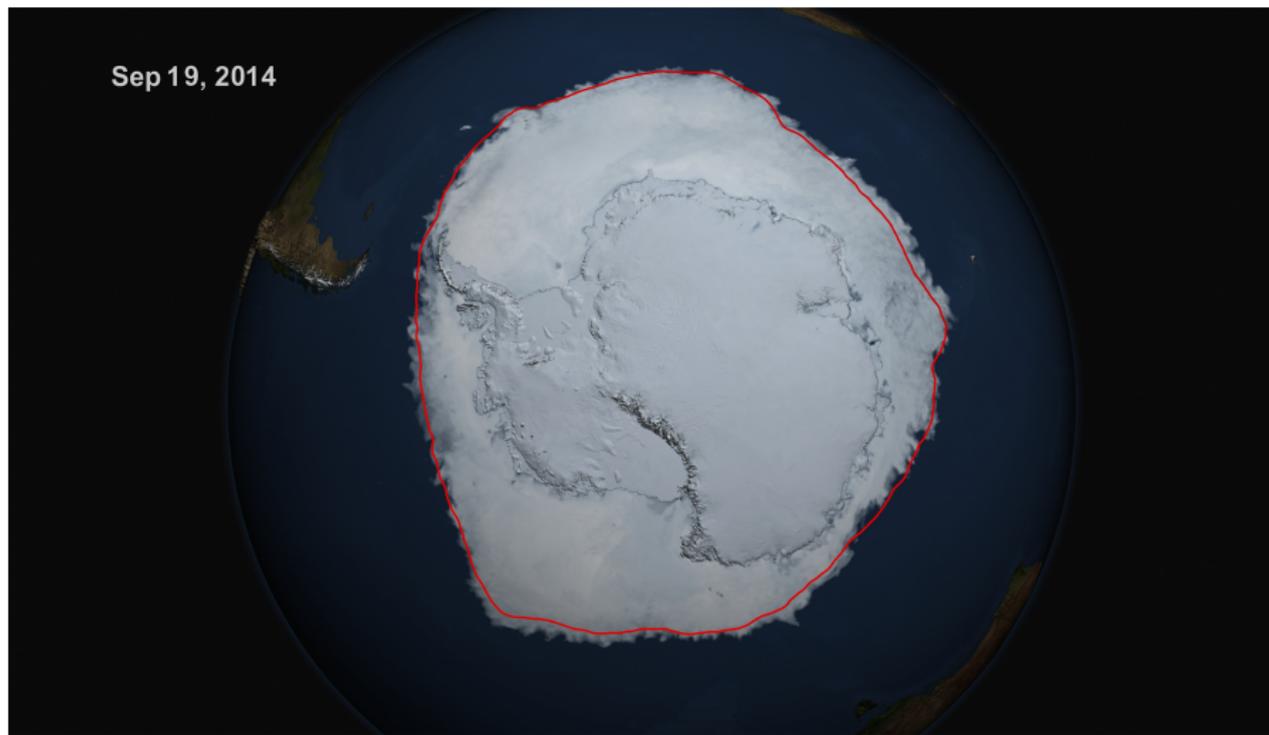
Polaires

Polaires

- └ Les bases de climatologie nécessaires à la compréhension des changements climatiques futures
- └ Les différents climats sur Terre



Photographie d'un paysage Antarctique [[nasa.gov](https://www.nasa.gov)]

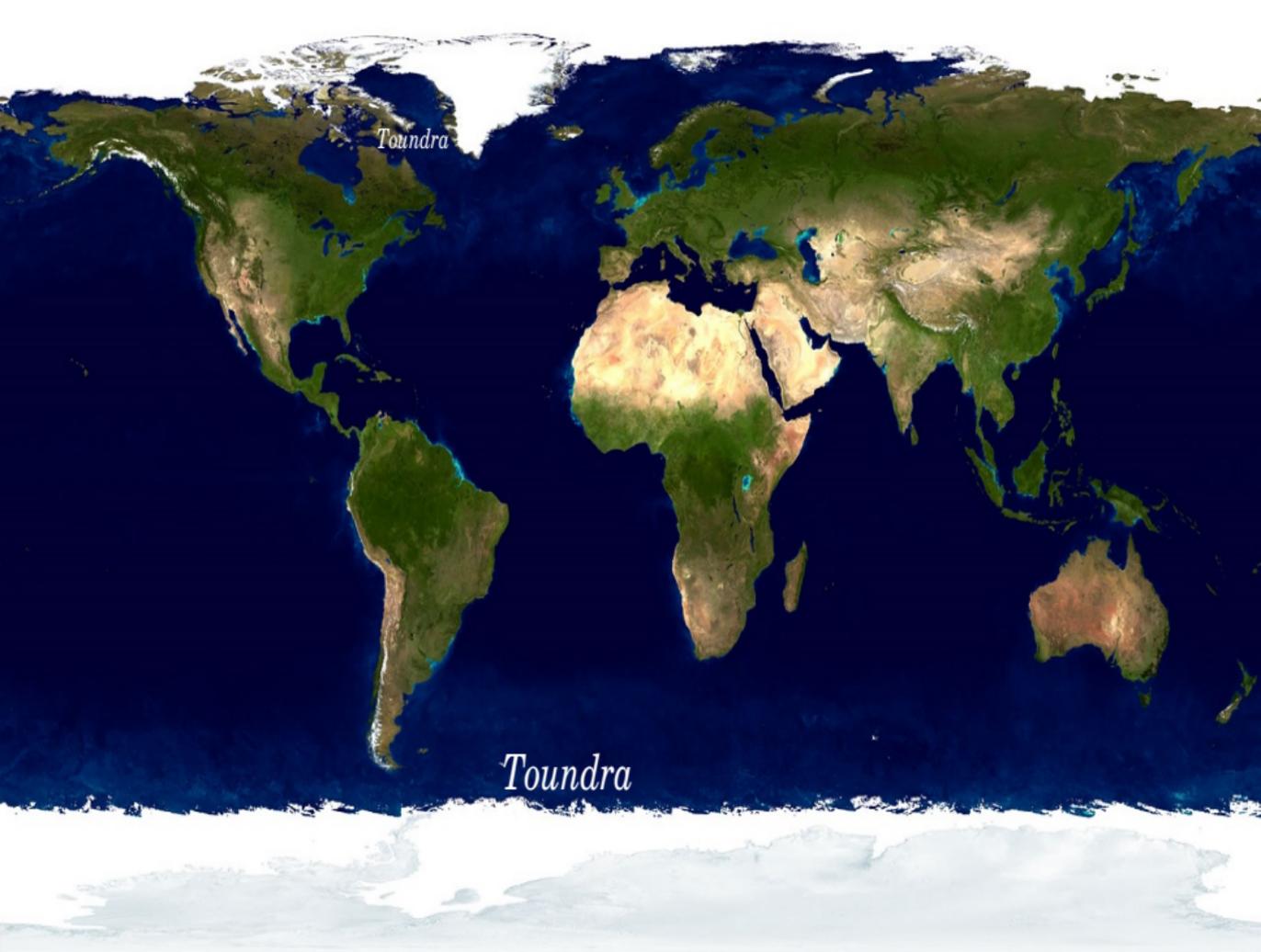


Record d'extension de la banquise Antarctique (2014) [[nasa.gov](https://www.nasa.gov)]

- └ Les bases de climatologie nécessaires à la compréhension des changements climatiques futures
- └ Les différents climats sur Terre

Climats Polaire

- Climats désertiques quasiment pas de faunes et flores

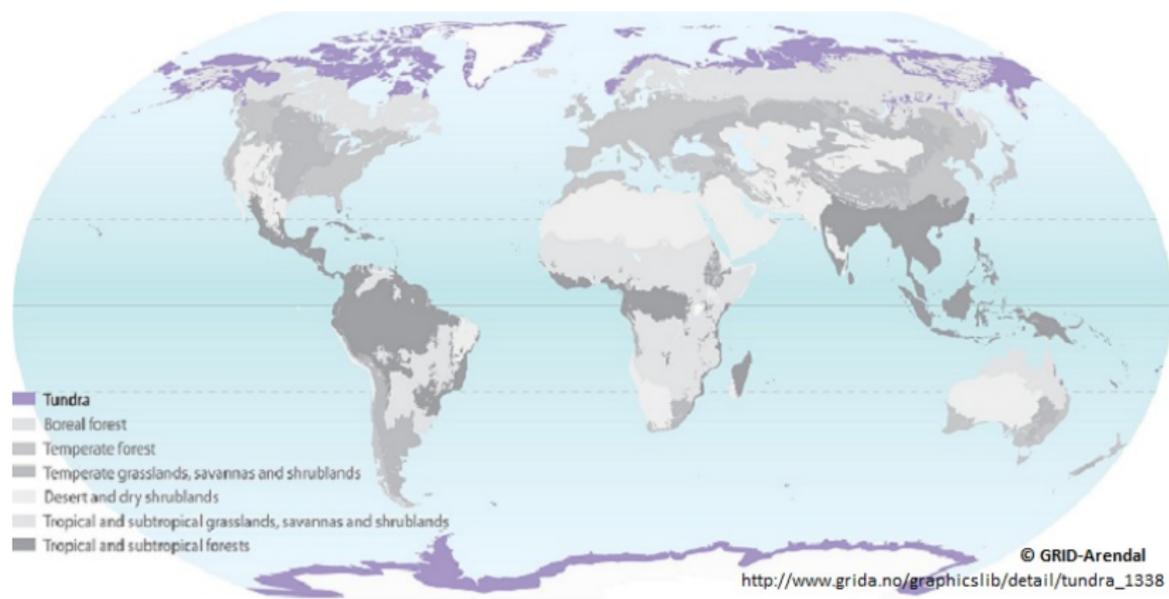


Tundra

Tundra



Photographie de la toundra au Groenland
[\[recherchespolaires.inist.fr\]](http://recherchespolaires.inist.fr)



Extension actuelle environnements de type toundra [hww.ca]

Végétation – Toundra

- Viens des Sami Russes et signifie “Terre stérile” ou “Terre sans arbre”
- Bouleau et Saule (pousse horizontalement)
- Ronces
- Bryophytes et lichens



L'Ours Blanc et faune Toundra (ici au Canada) [hww.ca]

- └ Les bases de climatologie nécessaires à la compréhension des changements climatiques futures
- └ Les différents climats sur Terre



L'Eider à tête grise [hww.ca]

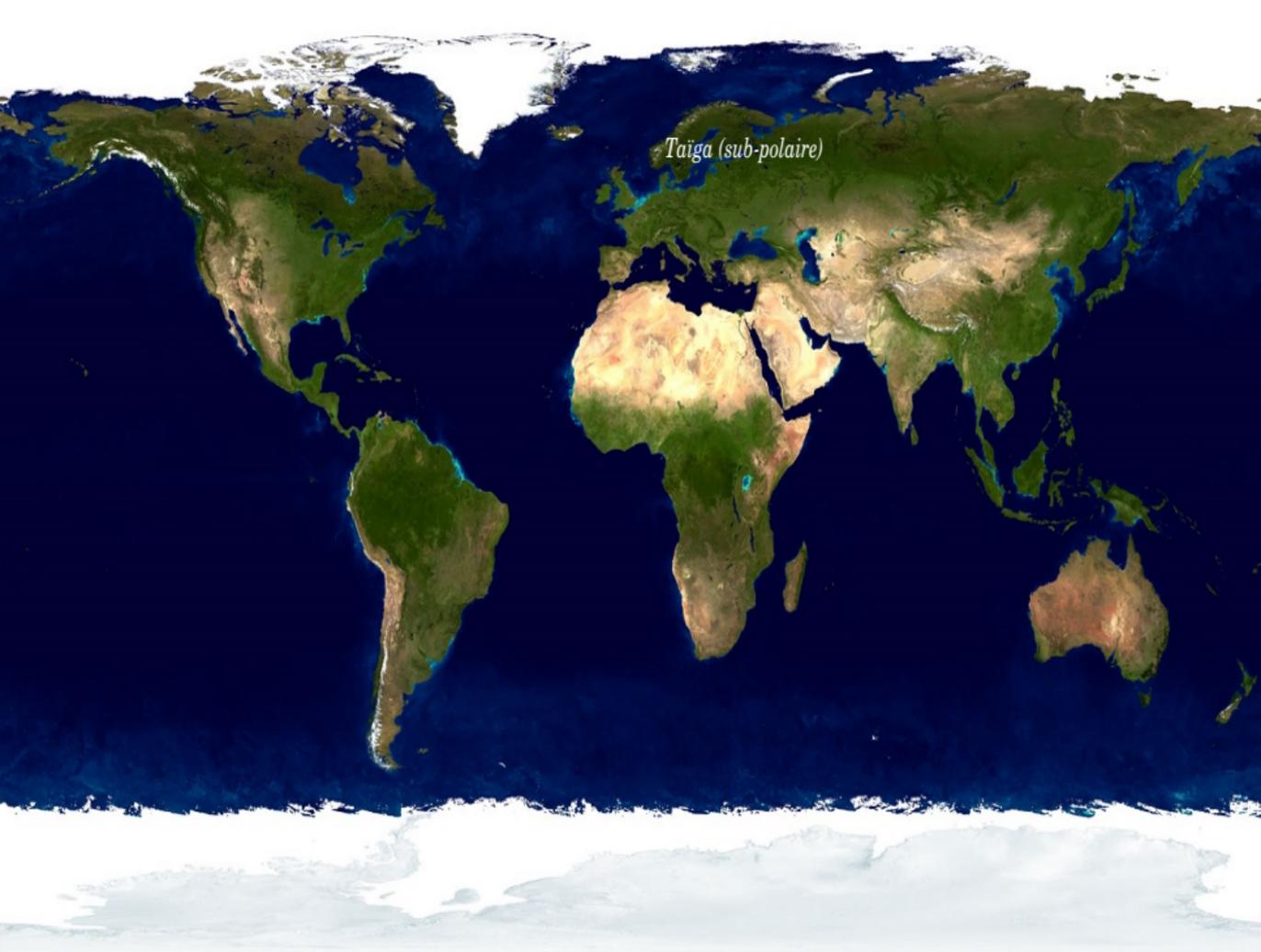
- └ Les bases de climatologie nécessaires à la compréhension des changements climatiques futures
- └ Les différents climats sur Terre



Harfang des neiges [hww.ca]



Caribou [hww.ca]



Taïga (sub-polaire)



Flore de la taïga



Une forêt de type Taïga, Canada [hww.ca]

- └ Les bases de climatologie nécessaires à la compréhension des changements climatiques futures
- └ Les différents climats sur Terre

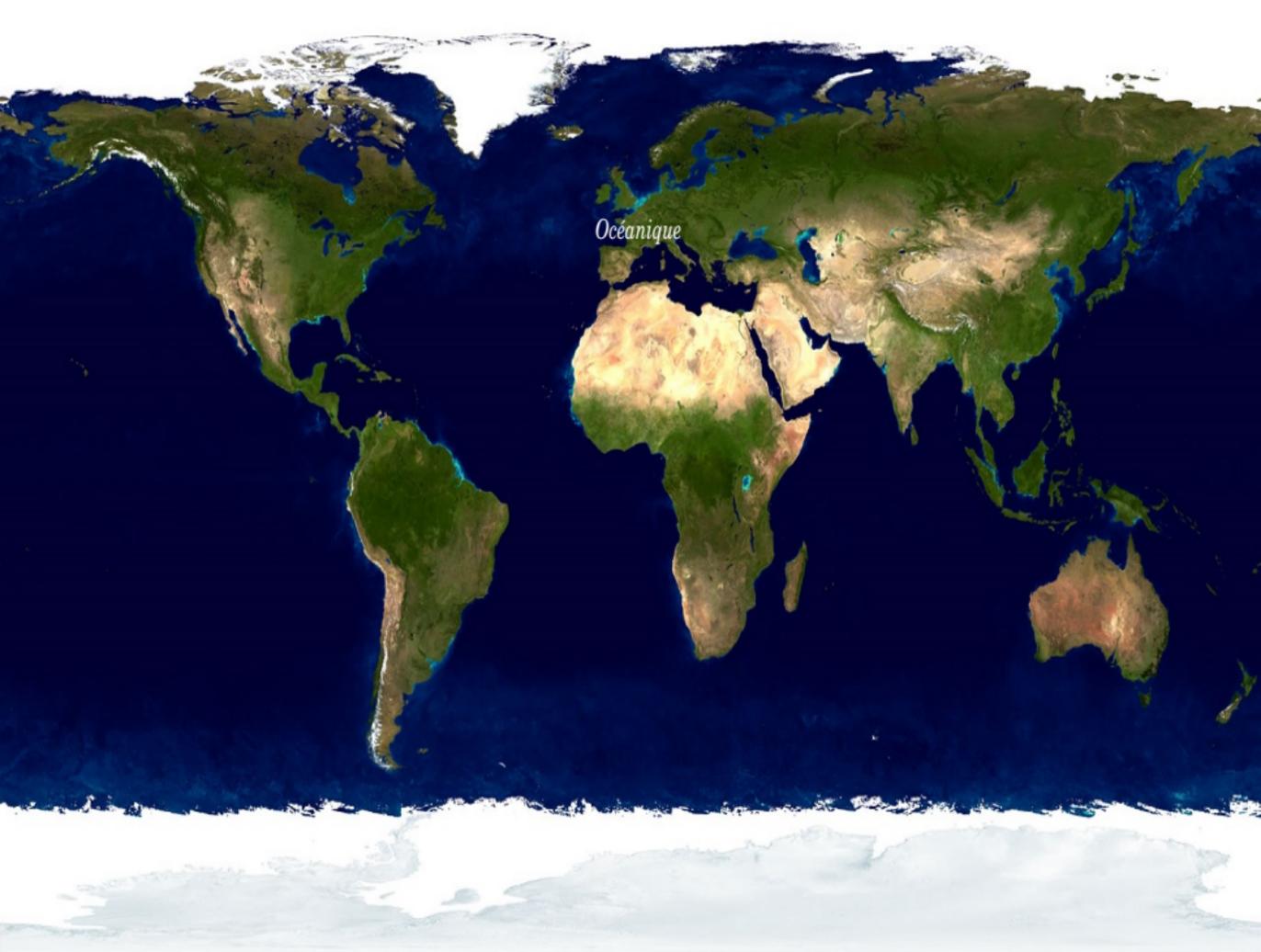


Une forêt de type Taïga, Canada [hww.ca]

- └ Les bases de climatologie nécessaires à la compréhension des changements climatiques futures
- └ Les différents climats sur Terre



Une forêt de type Taïga, Canada [hww.ca]

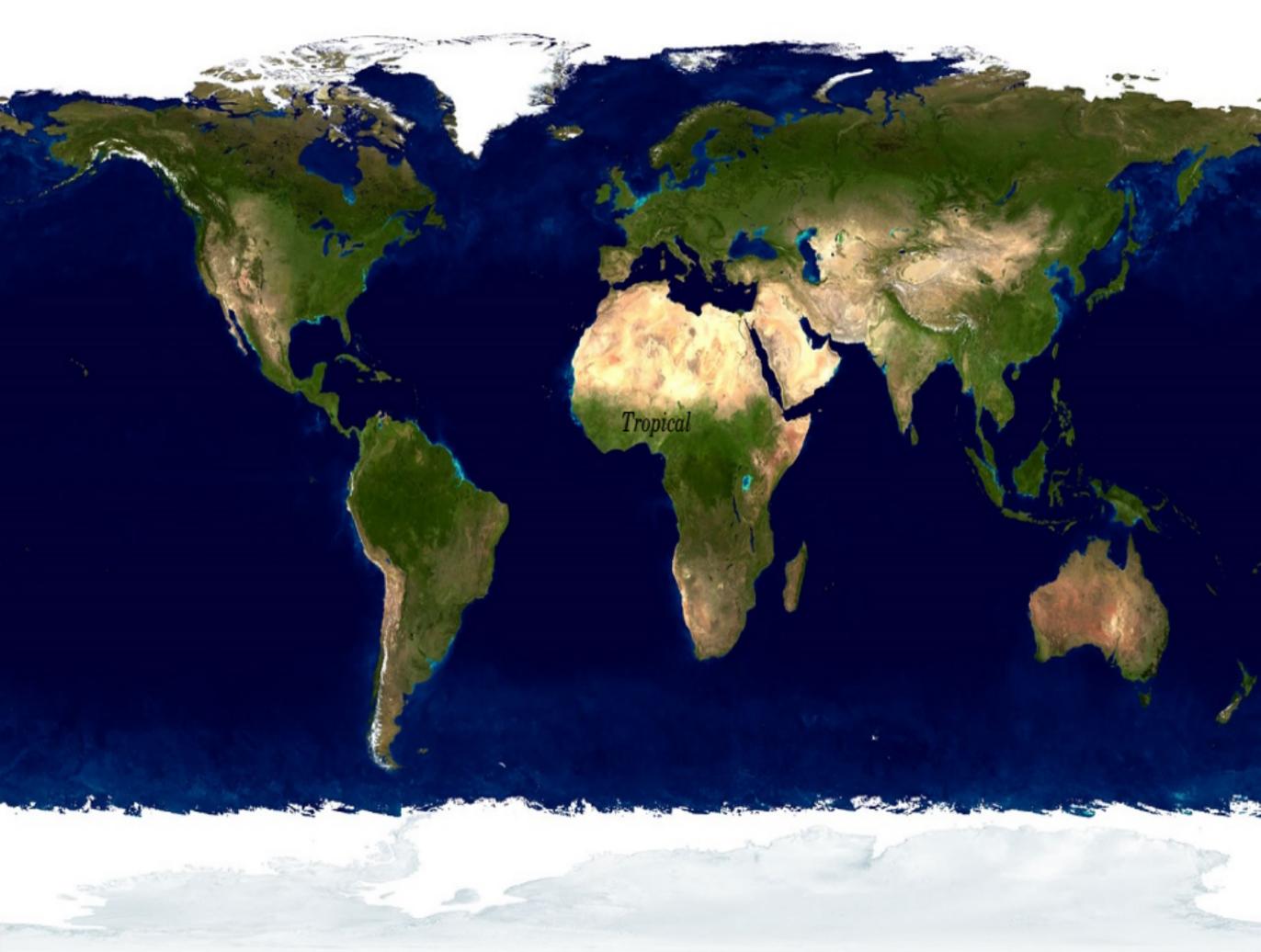


Océanique

- └ Les bases de climatologie nécessaires à la compréhension des changements climatiques futures
- └ Les différents climats sur Terre



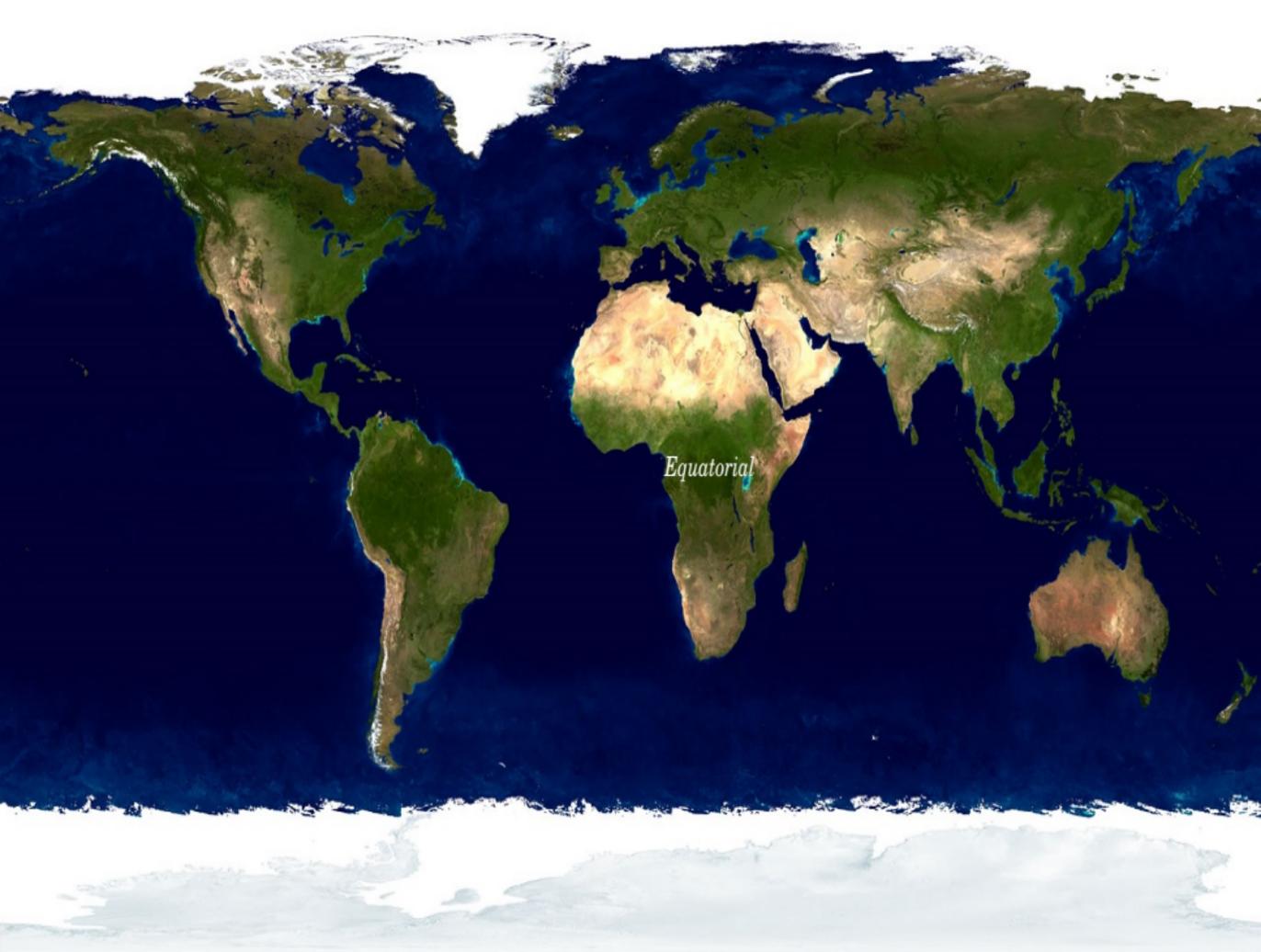
Forêt de Brocéliande, Bretagne.



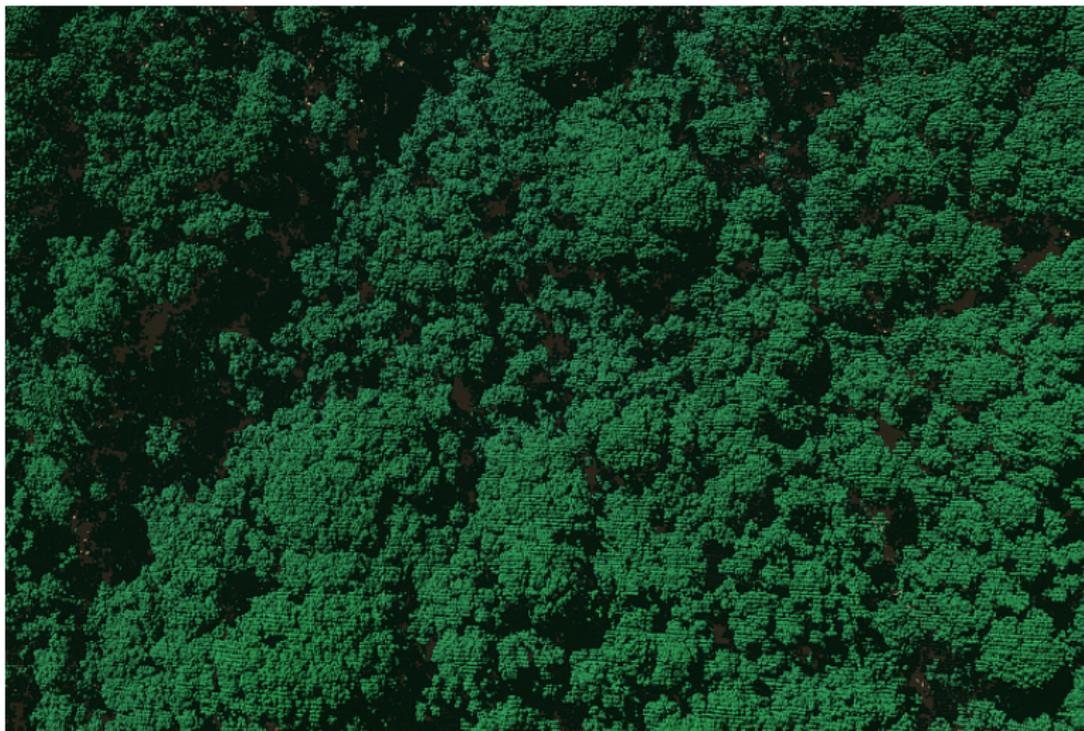
Tropical



Un exemple de paysage de Savane



Equatorial

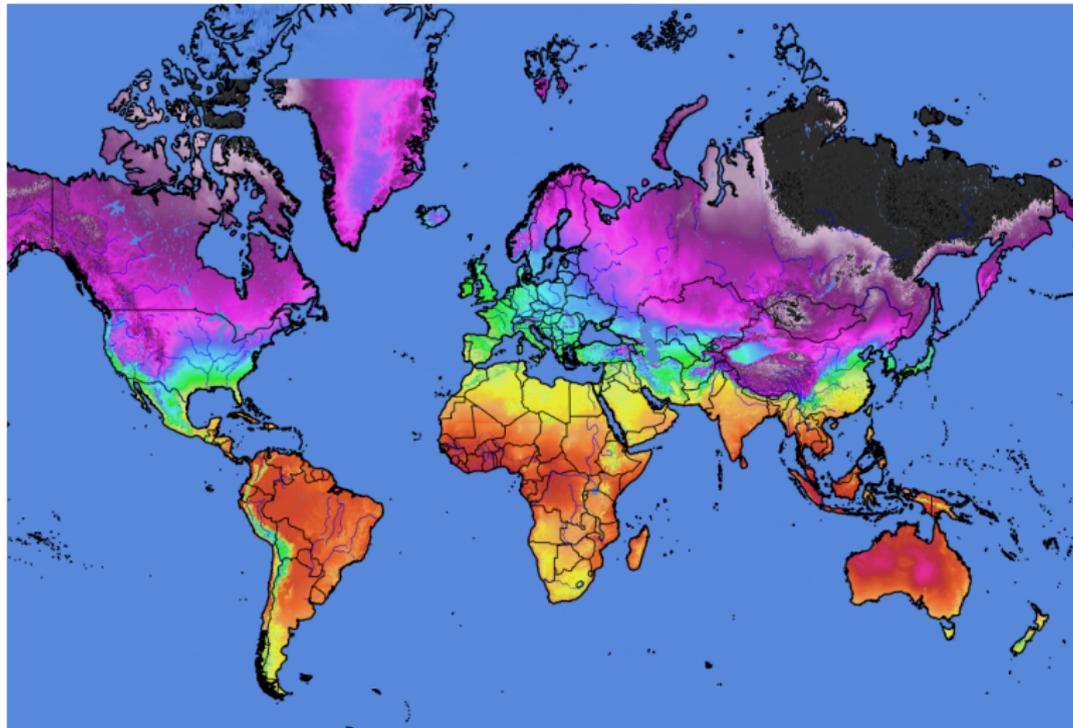


Vue satellite de la forêt de Porto-Rico (climat équatorial) en 2017
[\[earthobservatory.nasa.gov\]](http://earthobservatory.nasa.gov)

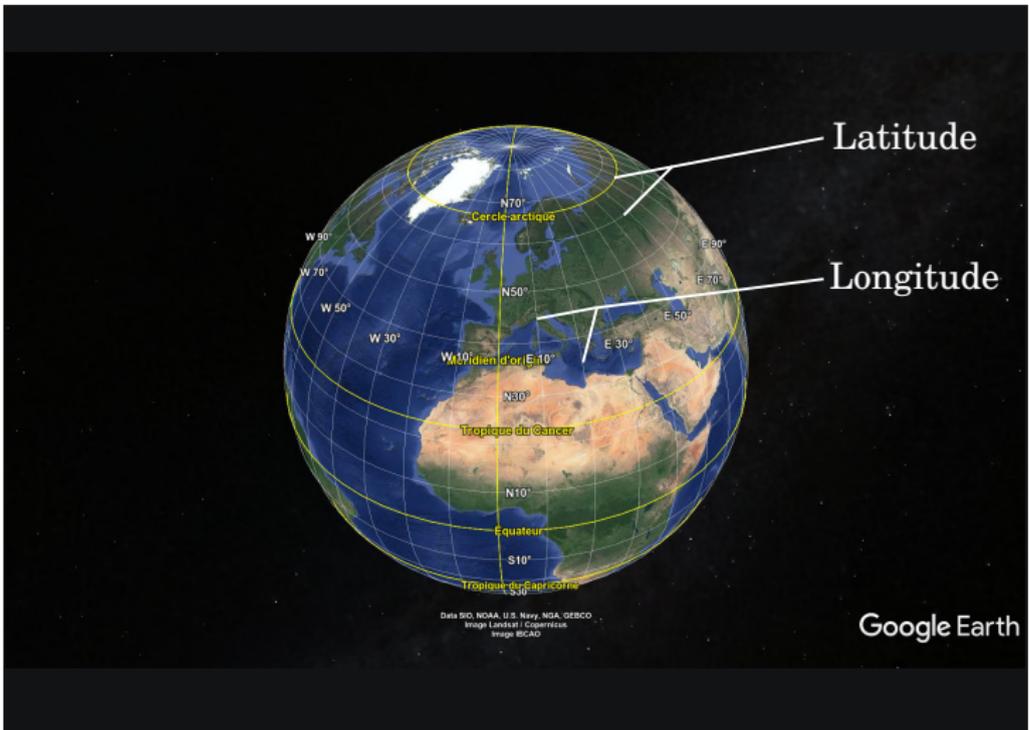


Vue satellite de la forêt de Porto-Rico (climat équatorial) en 2018
[\[earthobservatory.nasa.gov\]](http://earthobservatory.nasa.gov)

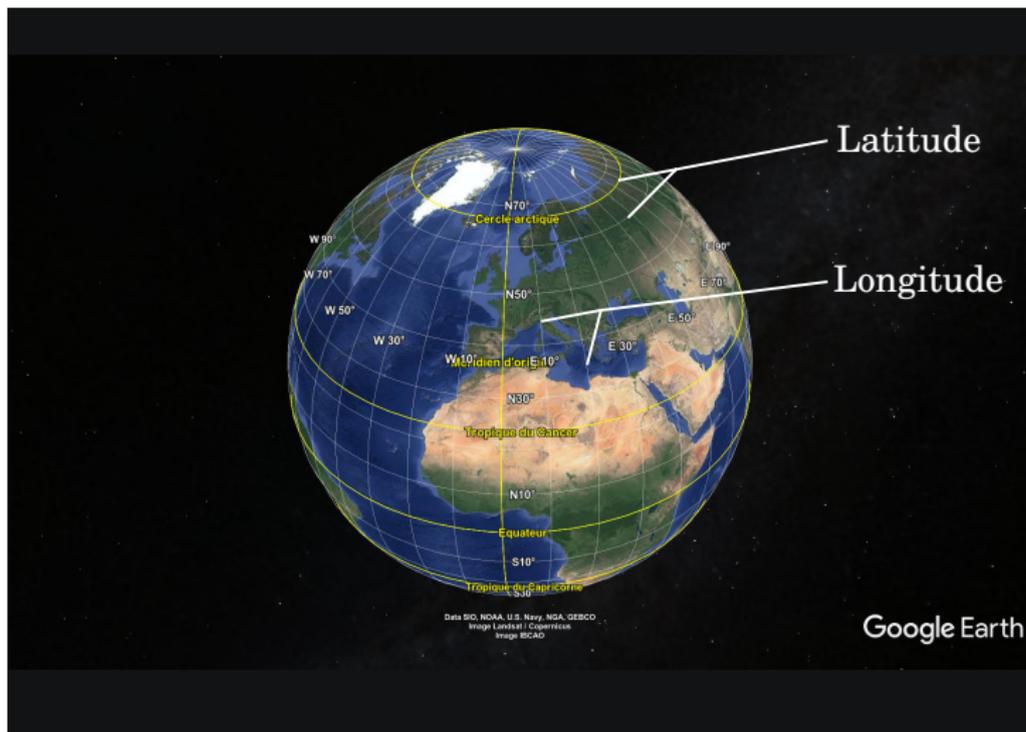
- 1** Les bases de climatologie nécessaires à la compréhension des changements climatiques futures
 - Les différents climats sur Terre
 - Les grands types de climats
 - Caractéristiques des grands types de climats terrestres
 - Les différents écosystèmes associées aux différents climats
 - Paramètres influençant les différents types de climats sur Terre
 - Flux solaire et température d'équilibre de la Terre
 - L'effet de serre
- 2** Les instances internationales dédiées aux changements climatiques
- 3** Modélisation des climats futurs de la Terre
- 4** Effets des changements climatiques
- 5** Changements climatiques et événements extrêmes
- 6** Les changements climatiques sont dû aux activités humaines



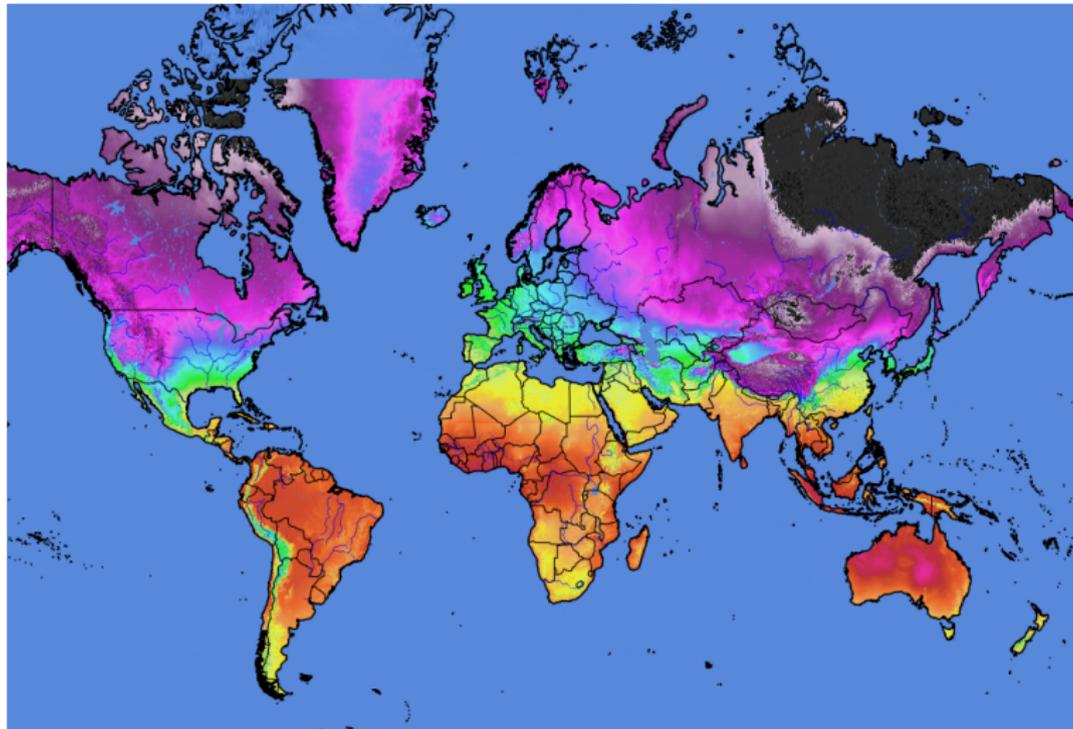
Modèle des températures moyennes mondiales sur la période 1981-2010 [infoclimat.fr]



Modélisation d'une vue satellite de la Terre [Google Earth]



Modélisation d'une vue satellite de Terre [Google Earth]. Le climat dépend directement de la latitude.



Modèle des températures moyennes mondiales sur la période 1981-2010 [infoclimat.fr]

- └ Les bases de climatologie nécessaires à la compréhension des changements climatiques futures
- └ Les différents climats sur Terre

Flux solaire au cours de l'année

[Répartition de l'énergie solaire sur Terre en mois et de la latitude]

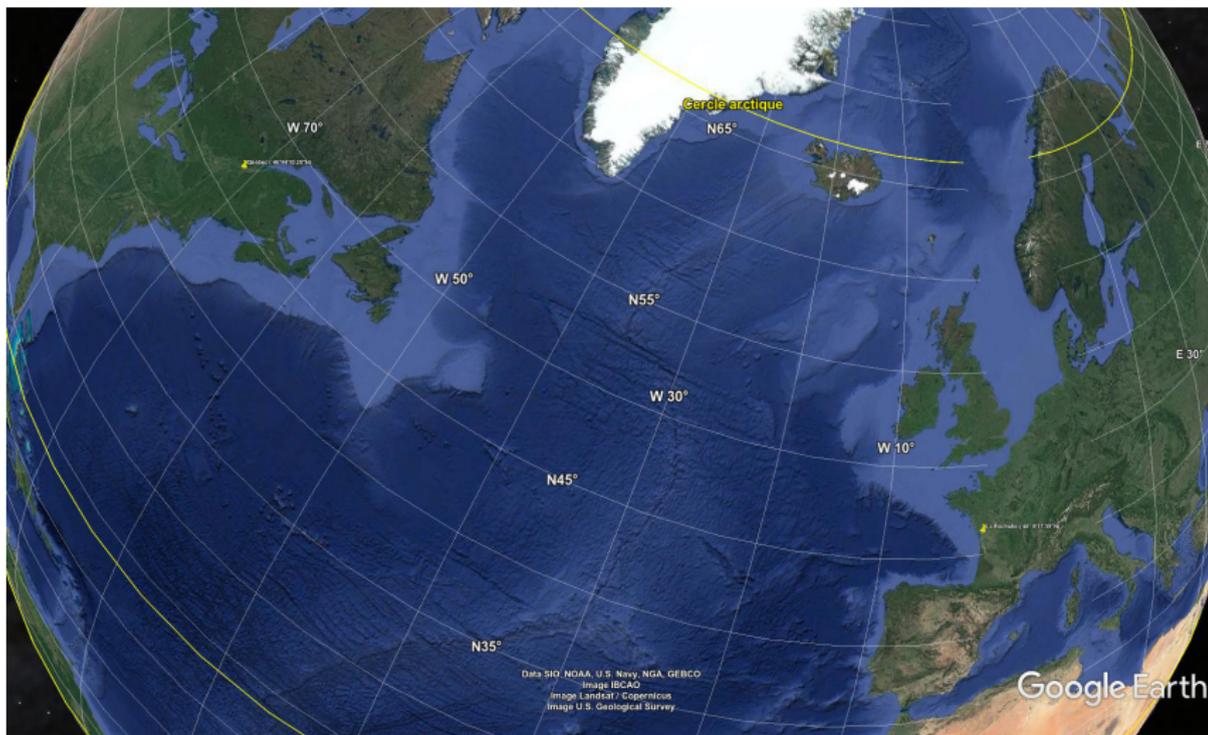
Source : [planet-terre]

- └ Les bases de climatologie nécessaires à la compréhension des changements climatiques futures
- └ Les différents climats sur Terre

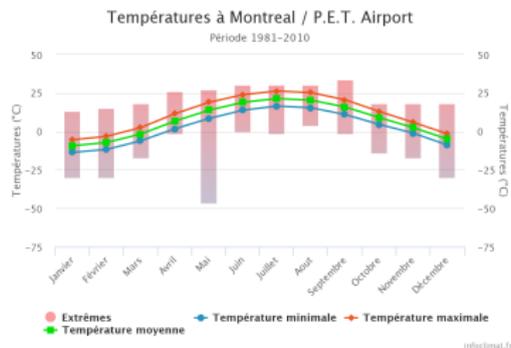
- └ Les bases de climatologie nécessaires à la compréhension des changements climatiques futures
- └ Les différents climats sur Terre

Evolution des températures moyennes en Europe sur l'intervalle
1981-2010

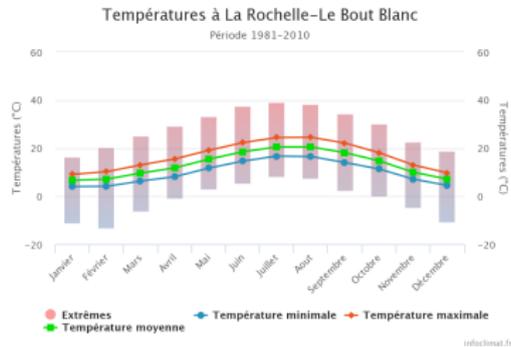
[Evolution Température Europe]



Latitude de La Rochelle et de Quebec [GoogleEarth]



Température moyenne à Montréal sur la période 1981-2010 [infoclimat.fr]



Température moyenne à La Rochelle sur la période 1981-2010 [infoclimat.fr]

Paramètres influant les différents types de climats

- La latitude
- La distance à l'océan
- D'autres paramètres ???

- 1 Les bases de climatologie nécessaires à la compréhension des changements climatiques futures
 - Les différents climats sur Terre
 - Flux solaire et température d'équilibre de la Terre
 - Paramètres influençant la température de surface de la Terre
 - L'effet de serre
- 2 Les instances internationales dédiées aux changements climatiques
- 3 Modélisation des climats futurs de la Terre
- 4 Effets des changements climatiques
- 5 Changements climatiques et événements extrêmes
- 6 Les changements climatiques sont dû aux activités humaines

- 1 Les bases de climatologie nécessaires à la compréhension des changements climatiques futures
 - Les différents climats sur Terre
 - Flux solaire et température d'équilibre de la Terre
 - Paramètres influençant la température de surface de la Terre
 - L'effet de serre
- 2 Les instances internationales dédiées aux changements climatiques
- 3 Modélisation des climats futurs de la Terre
- 4 Effets des changements climatiques
- 5 Changements climatiques et événements extrêmes
- 6 Les changements climatiques sont dû aux activités humaines



$$T_{Terre} = \sqrt{\frac{R_{soleil}}{d_{terre-soleil}}} T_{soleil} \frac{1}{\sqrt{2}} \quad (1)$$

Avec

- R_{soleil} : le rayon du soleil
- $d_{terre-soleil}$: la distance terre-soleil
- T_{soleil} : la température du soleil

$$T_{Terre} = \sqrt{\frac{R_{soleil}}{d_{terre-soleil}}} T_{soleil} \frac{1}{\sqrt{2}} \quad (1)$$

Avec

- R_{soleil} : le rayon du soleil
- $d_{terre-soleil}$: la distance terre-soleil
- T_{soleil} : la température du soleil

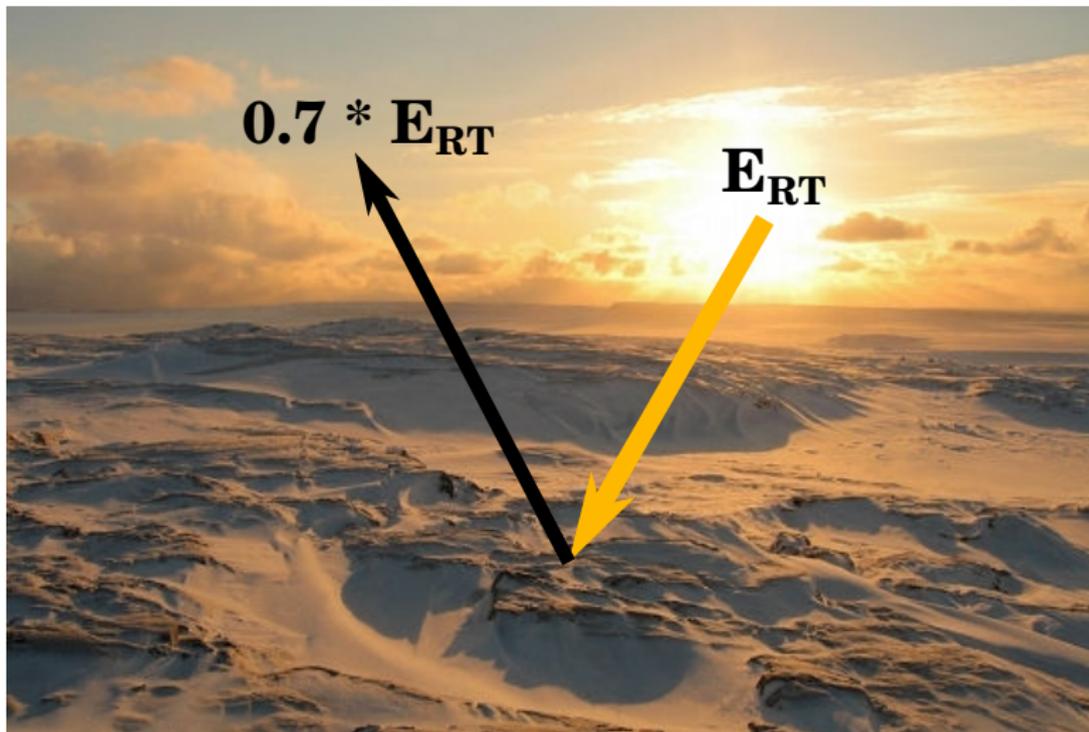
Conclusion

La température d'un astre dépend uniquement du rayon, de la température du soleil, et de la distance astre soleil

An aerial photograph of a vast, snow-covered landscape, likely a tundra or a high-altitude plain. The terrain is undulating with numerous small depressions and ridges. The sun is low on the horizon, creating a warm, golden glow across the sky and casting long, soft shadows on the snow. A blue rectangular box with white text is overlaid on the middle of the image.

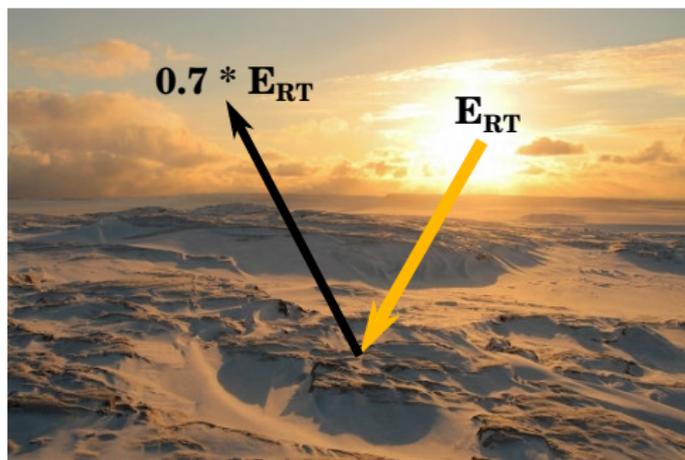
Il faut considérer l'effet de l'albédo!

- └ Les bases de climatologie nécessaires à la compréhension des changements climatiques futures
- └ Flux solaire et température d'équilibre de la Terre



Calcul de l'albédo

- └ Les bases de climatologie nécessaires à la compréhension des changements climatiques futures
- └ Flux solaire et température d'équilibre de la Terre



Calcul de l'albédo

Albédo

$$A = \frac{E_{reflechi}}{E_{recu}} \quad (2)$$

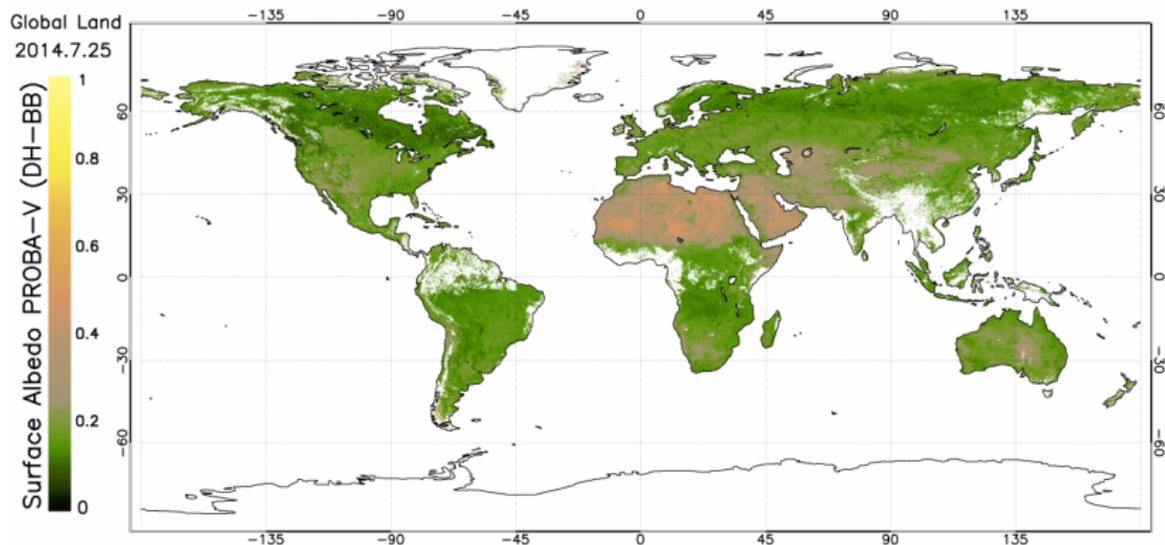
(Dans cet exemple $A = 0.7$)

Surface	$E_{reflechie}$	Albedo
Neige fraiche	276.8	
Glace	207.6	
Calcaire	138.4	
Surface de lac	10.38	
Surface de la mer	34.6	
Forêt de conifères	34.6	
Forêt de feuillus	62.28	
Cultures	69.2	
Sables	103.8	

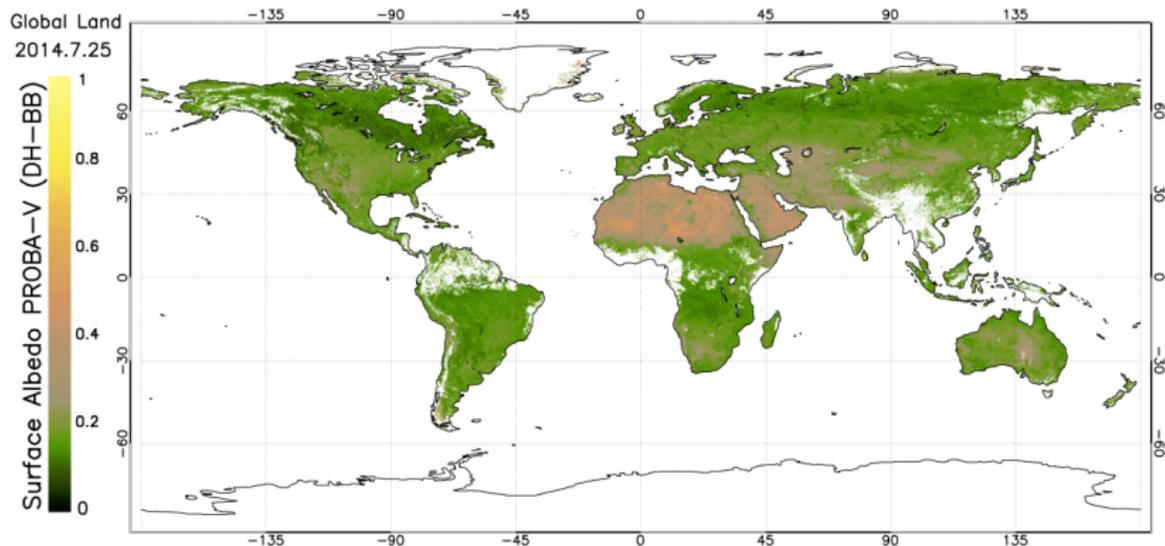
Table: Calcul de quelques valeurs d'albédo (les données sont issues de [\[land.copernicus.eu\]](http://land.copernicus.eu))

Surface	$E_{reflechie}$	Albedo
Neige fraiche	276.8	0.8
Glace	207.6	0.6
Calcaire	138.4	0.4
Surface de lac	10.38	0.03
Surface de la mer	34.6	0.1
Forêt de conifères	34.6	0.1
Forêt de feuillus	62.28	0.18
Cultures	69.2	0.2
Sables	103.8	0.3

Table: Calcul de quelques valeurs d'albédo (les données sont issues de [\[land.copernicus.eu\]](http://land.copernicus.eu))



Mesure de l'abédo de surface moyen par la mission Européenne Copernicus [land.copernicus.eu]



Mesure de l'abédo de surface moyen par la mission Européenne Copernicus [land.copernicus.eu]. L'albédo moyen est considéré comme étant égale à 0.3

- └ Les bases de climatologie nécessaires à la compréhension des changements climatiques futures
 - └ Flux solaire et température d'équilibre de la Terre

Energie efficace sur Terre

C'est l'énergie reçue moins l'énergie réfléchie

Albédo moyen sur Terre

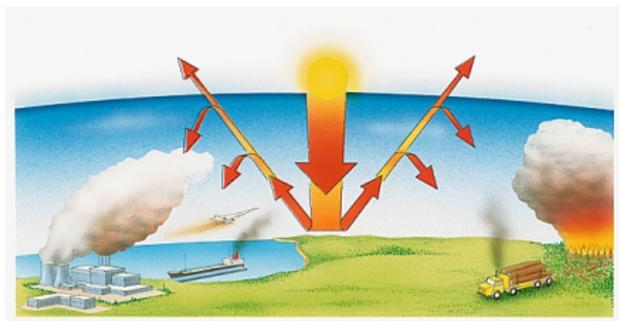
0.3

- └ Les bases de climatologie nécessaires à la compréhension des changements climatiques futures
- └ Flux solaire et température d'équilibre de la Terre

Albédo

Des surfaces avec un albédo fort (neige) ont un effet refroidissant sur le système terre

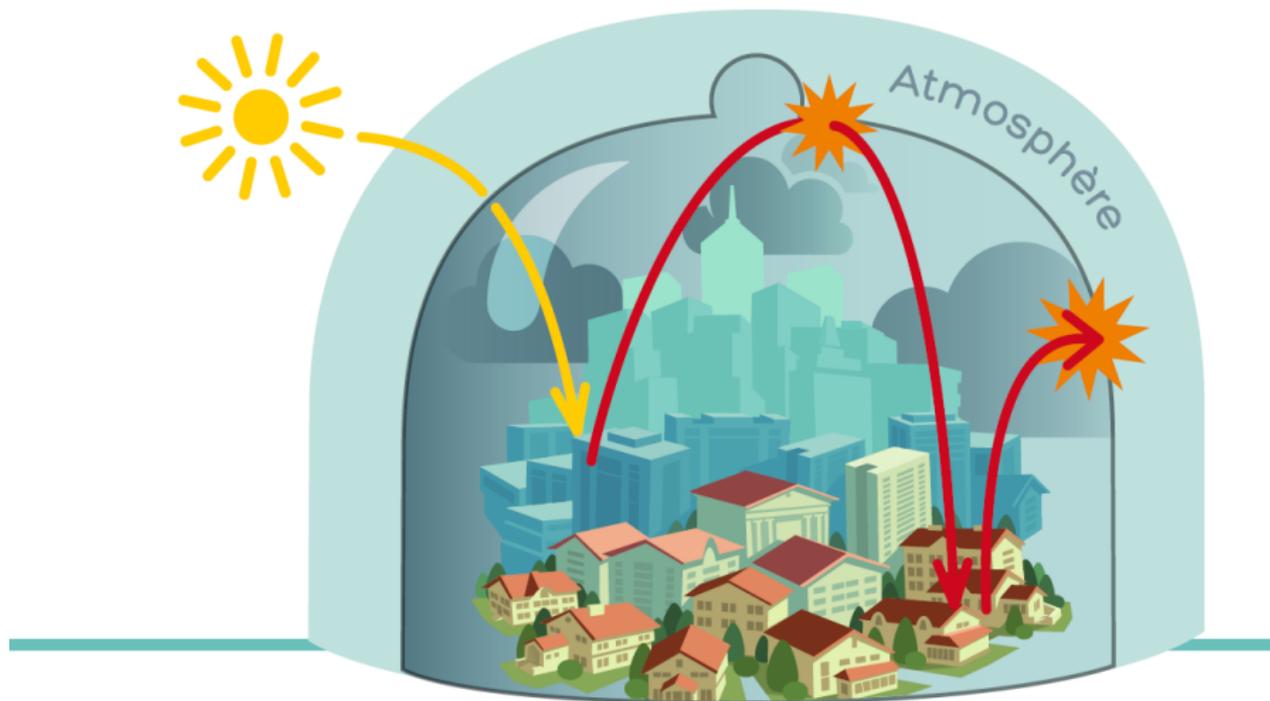
- 1 Les bases de climatologie nécessaires à la compréhension des changements climatiques futures
 - Les différents climats sur Terre
 - Flux solaire et température d'équilibre de la Terre
 - L'effet de serre
- 2 Les instances internationales dédiées aux changements climatiques
- 3 Modélisation des climats futurs de la Terre
- 4 Effets des changements climatiques
- 5 Changements climatiques et événements extrêmes
- 6 Les changements climatiques sont dû aux activités humaines



Représentation classique de l'effet de serre [Larousse.fr]

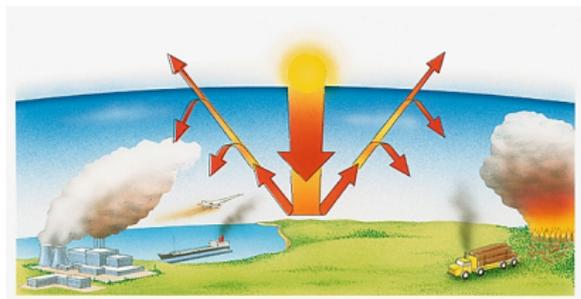
Définition Effet de serre – Larousse.fr

“L’atmosphère terrestre agit comme les vitres d’une serre : elle piège le rayonnement infrarouge réfléchi par la Terre (la Terre renvoie dans l’atmosphère, sous forme d’infrarouges, une grande partie du rayonnement solaire qu’elle reçoit), et donc la chaleur. Or, lorsque la concentration dans l’atmosphère des gaz à effet de serre, en particulier le gaz carbonique (issu principalement de l’utilisation des combustibles fossiles), augmente, l’effet de serre augmente à son tour. L’importance du rayonnement infrarouge réfléchi en retour vers la surface terrestre par les gaz à effet de serre est donc accrue.”



Représentation schématique de l'effet de serre [breakingscience.be]

- └ Les bases de climatologie nécessaires à la compréhension des changements climatiques futures
- └ L'effet de serre

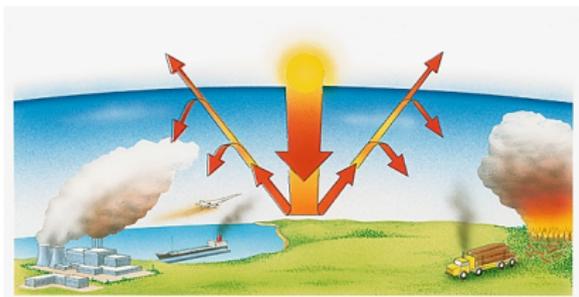


Représentation classique de l'effet de serre [Larrousse.fr]

Admettons que $x\%$ de l'Energie reçue par la Terre soit "piégée" par an au sol

Calculons alors l'augmentation annuelle de température

$$T_{aug} = \sqrt[4]{\frac{x \times E_R}{4\sigma}} = 6.53 \sqrt[4]{x} \quad (3)$$



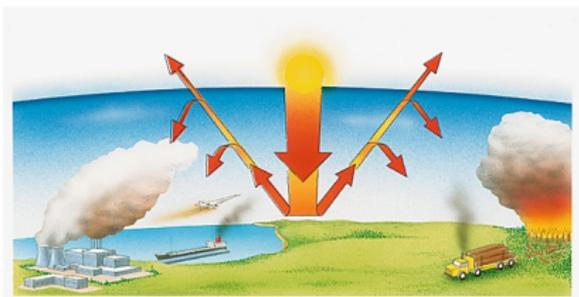
Représentation classique de l'effet de serre [Larousse.fr]

Admettons que $x\%$ de l'Énergie reçue par la Terre soit "piégée" par an au sol

Calculons alors l'augmentation annuelle de température

$$T_{aug} = \sqrt[4]{\frac{x \times E_R}{4\sigma}} = 6.53 \sqrt[4]{x} \quad (4)$$

Prenons $x = 0.1\%$ ($x = 0.001$), dans ce cas l'augmentation annuelle est de 1°C



Représentation classique de l'effet de serre [Larrousse.fr]

Admettons que $x\%$ de l'Énergie reçue par la Terre soit "piégée" par an au sol

Calculons alors l'augmentation annuelle de température

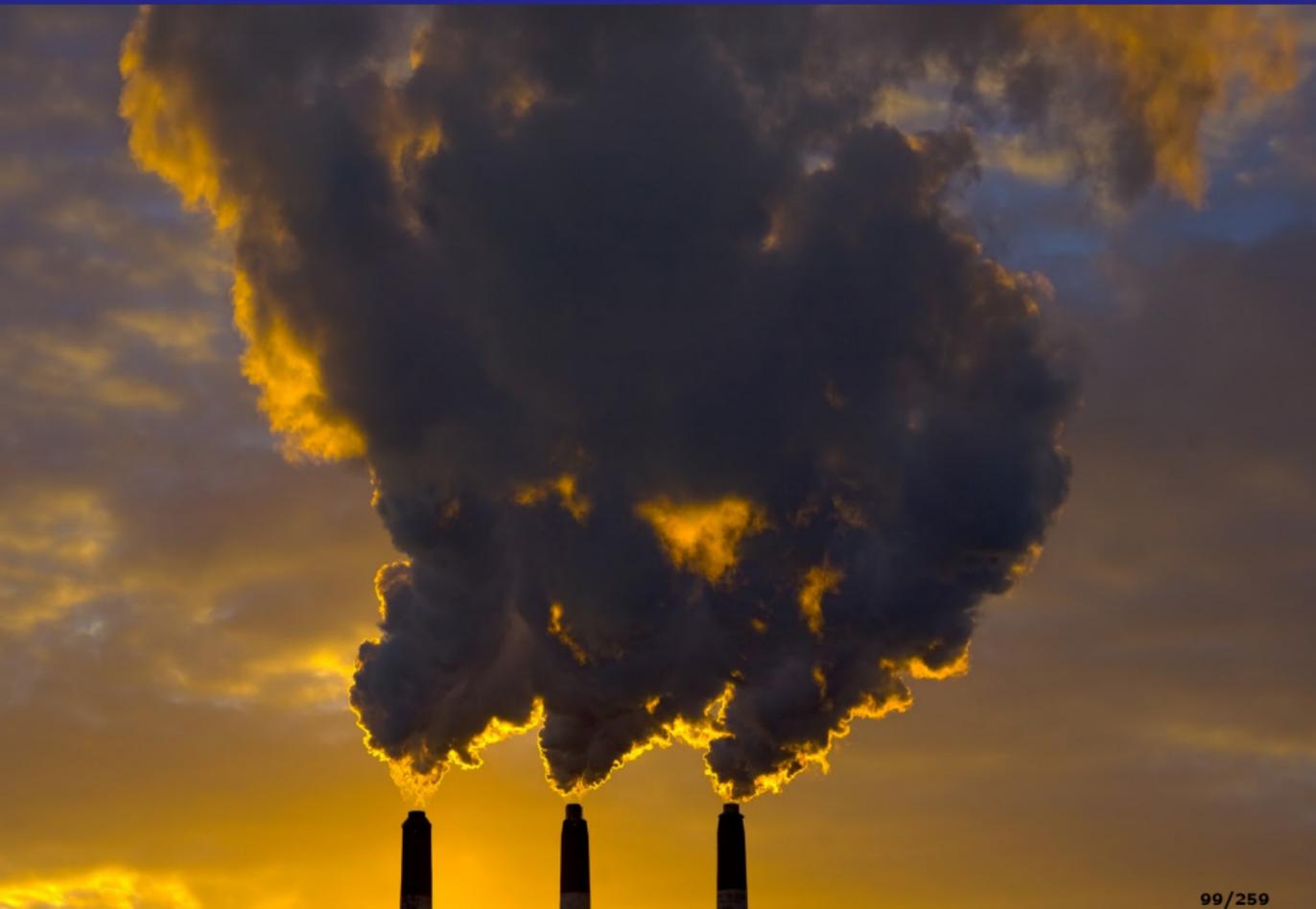
$$T_{aug} = \sqrt[4]{\frac{x \times E_R}{4\sigma}} = 6.53 \sqrt[4]{x} \quad (5)$$

Prenons $x = 0.1\%$ ($x = 0.001$), dans ce cas l'augmentation annuelle est de 1°C

Les océans auraient une température de 100°C en 90 ans...



- └ Les bases de climatologie nécessaires à la compréhension des changements climatiques futures
- └ L'effet de serre



- └ Les bases de climatologie nécessaires à la compréhension des changements climatiques futures
- └ L'effet de serre

Ce qu'est vraiment l'effet de serre

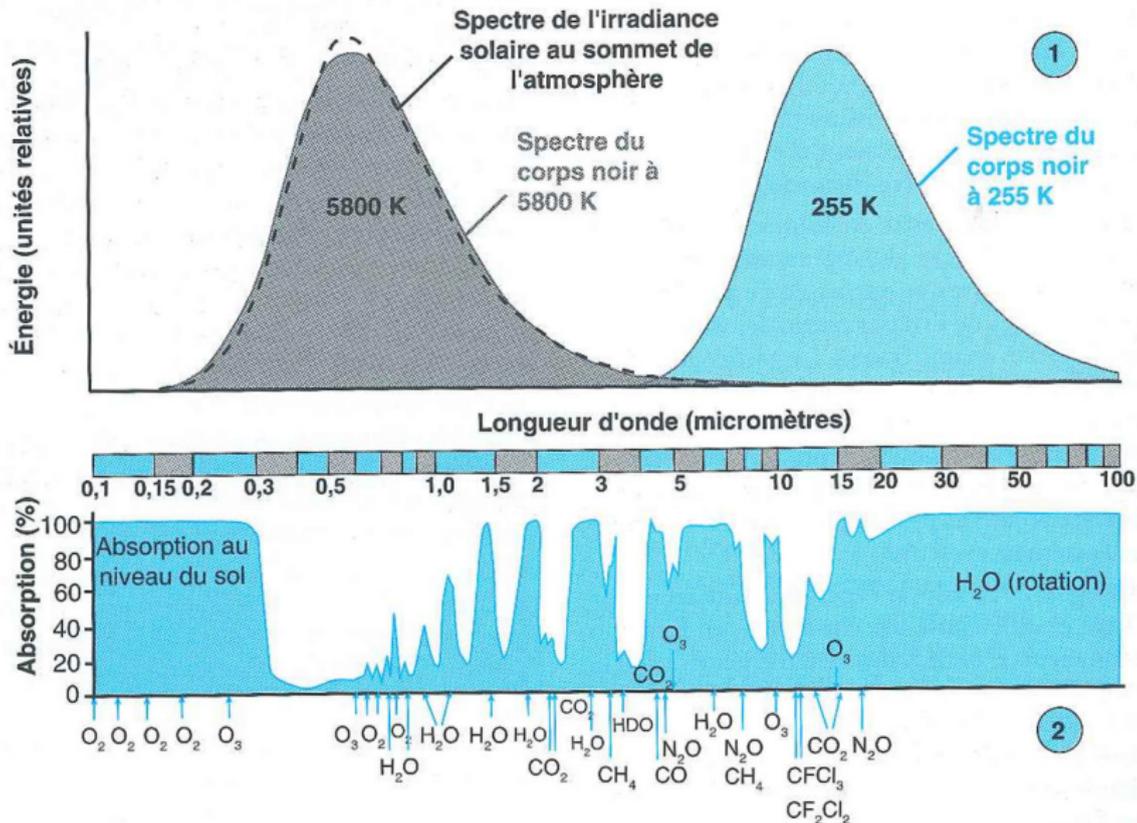


Figure: Spectre d'absorption des différentes molécules de l'atmosphère
 [Géologie : objets et méthodes]

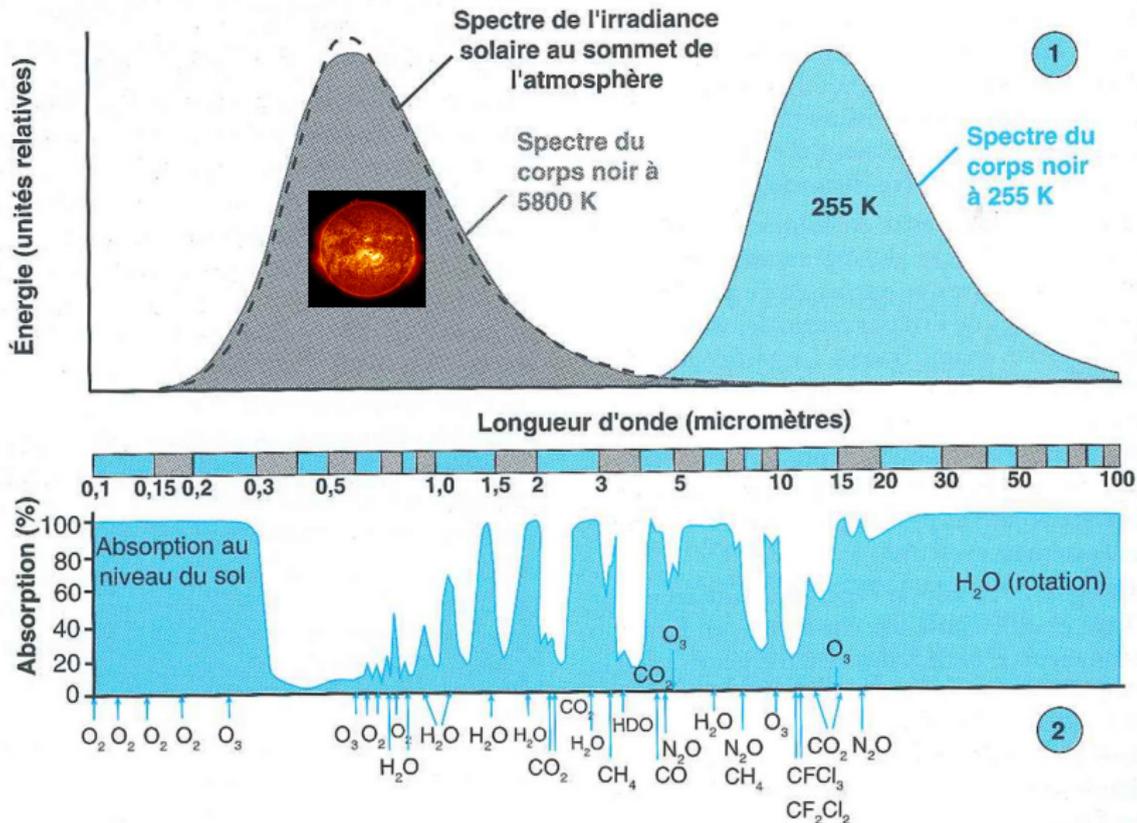


Figure: Spectre d'absorption des différentes molécules de l'atmosphère
 [Géologie : objets et méthodes]

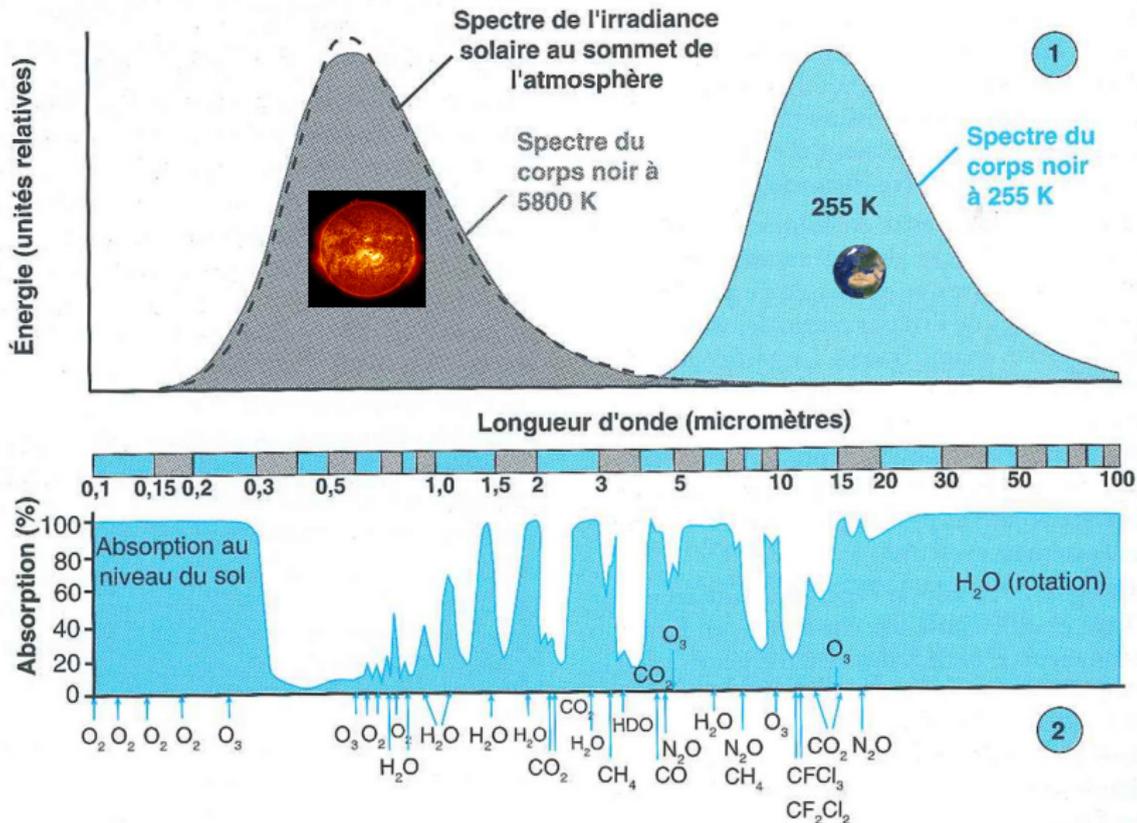


Figure: Spectre d'absorption des différentes molécules de l'atmosphère [Géologie : objets et méthodes]

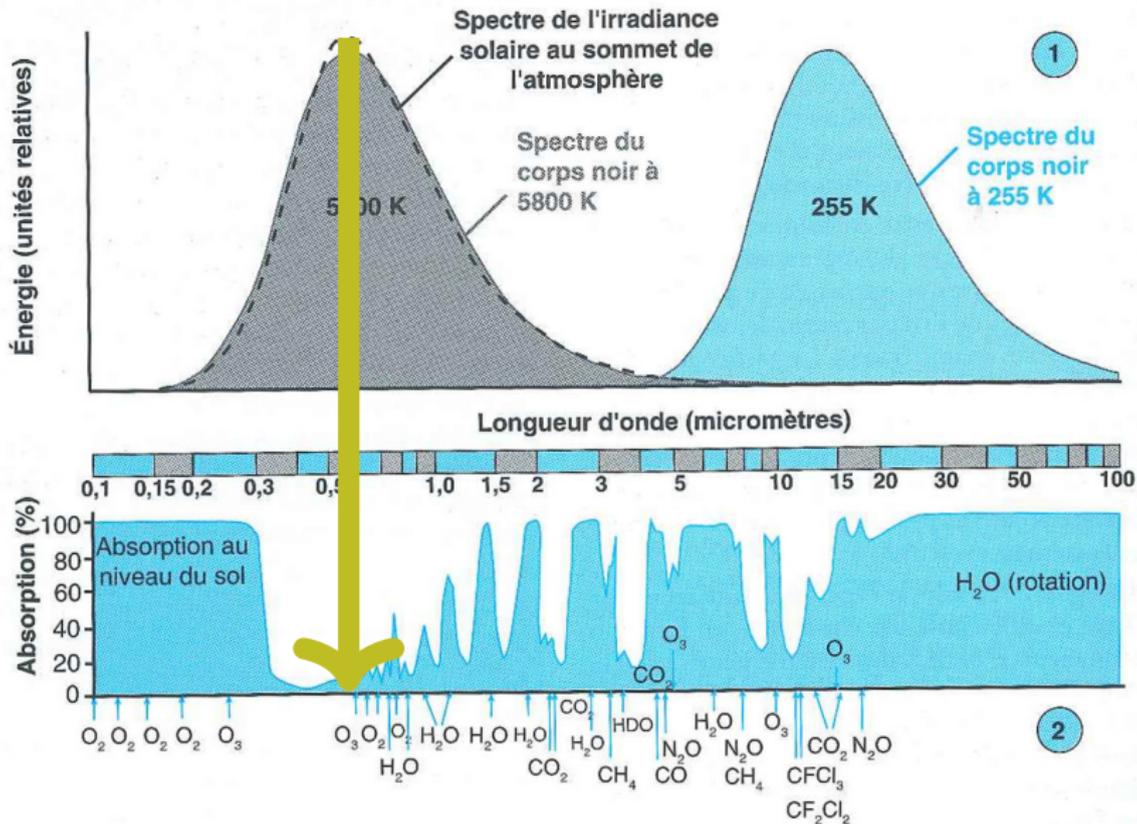
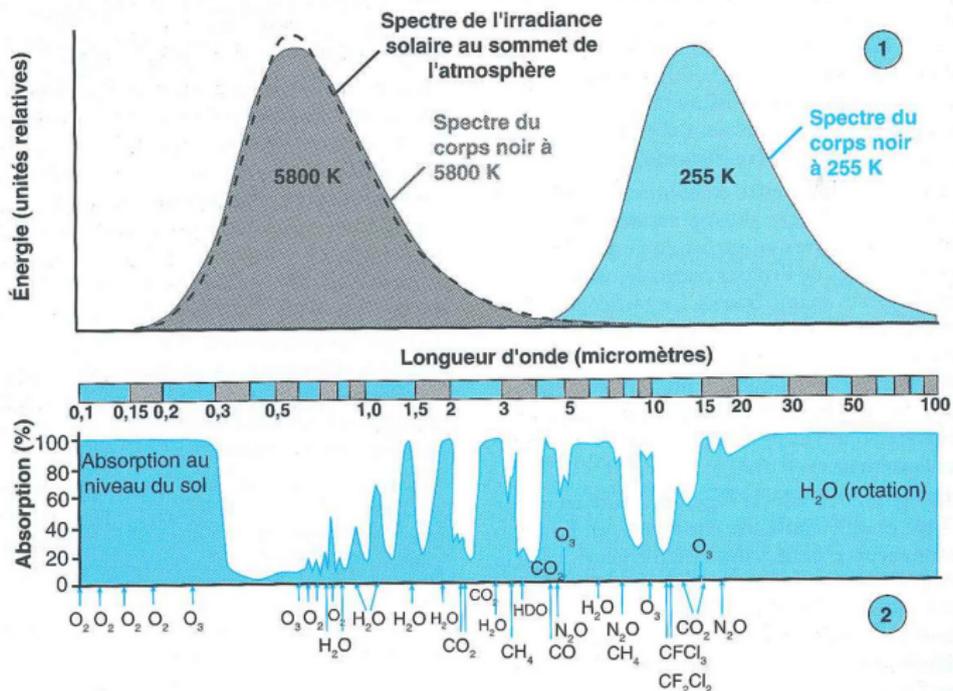
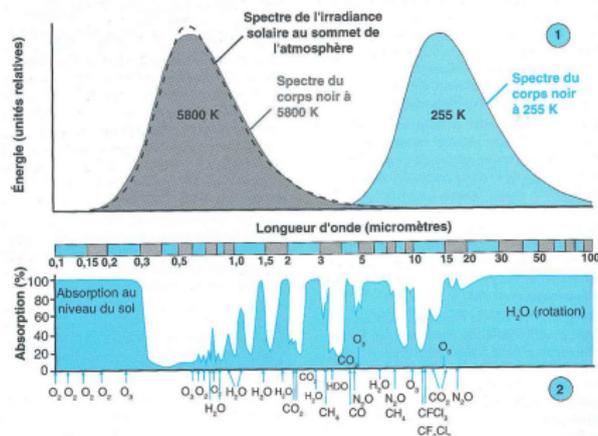


Figure: Spectre d'absorption des différentes molécules de l'atmosphère [Géologie : objets et méthodes]

- └ Les bases de climatologie nécessaires à la compréhension des changements climatiques futures
- └ L'effet de serre



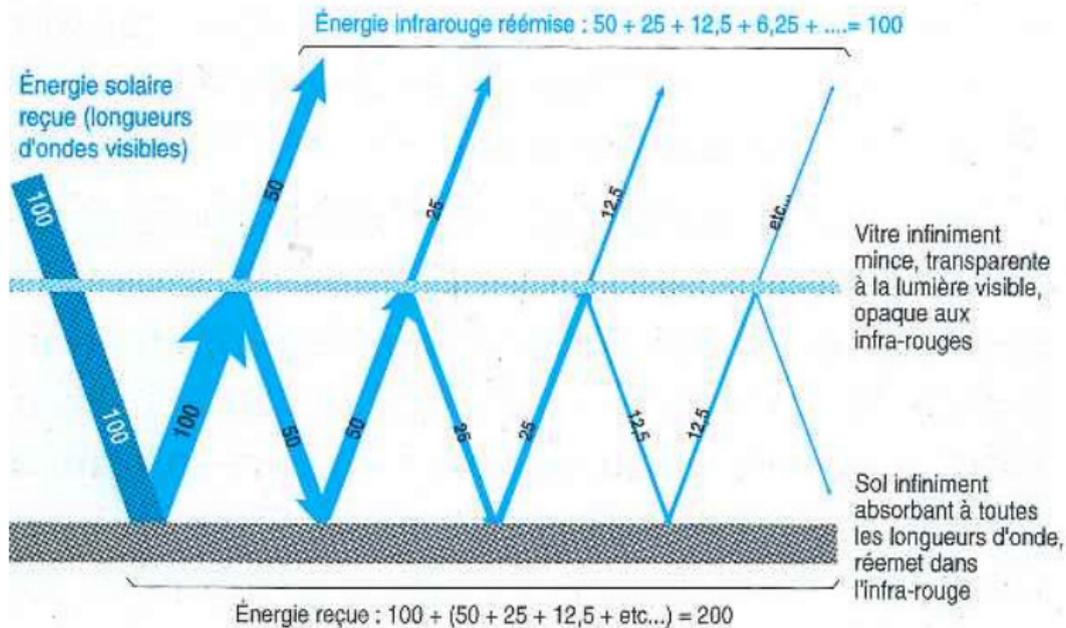
Grosso modo, 50% du rayonnement émis par la Terre est réfléchi par la surface



Grosso modo, 50% du rayonnement émis par la Terre est réfléchi par la surface

Molécules responsables de l'effet de serre

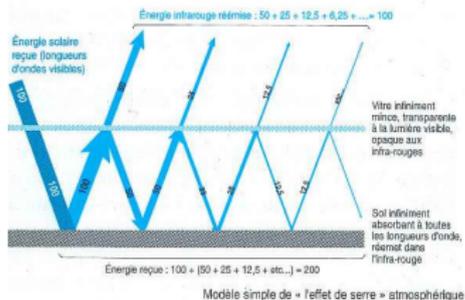
N_2O , CH_4 , O_3 , $CFCl_3$, CF_2Cl_2 , CO_2 , H_2O



Modèle simple de « l'effet de serre » atmosphérique

Modèle simple (trop?) de l'effet de serre [Géologie : objets et méthodes]

- └ Les bases de climatologie nécessaires à la compréhension des changements climatiques futures
- └ L'effet de serre



Fonctionnement de l'effet de serre

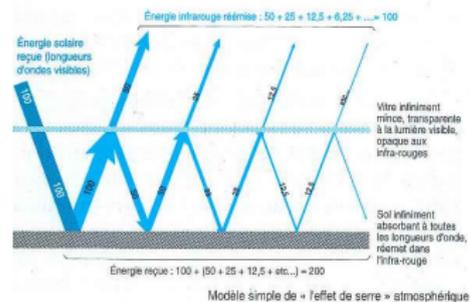
La moitié du rayonnement émis par la Terre est ré-émis vers la Terre par l'atmosphère

Modèle simple (trop?) de l'effet de serre [Géologie : objets et méthodes]

Fonctionnement de l'effet de serre

La moitié du rayonnement émis par la Terre est ré-émis vers la Terre par l'atmosphère

Calcul de l'énergie absorbé par la Terre (E_{ES}) due à l'effet de serre



Modèle simple (trop?) de l'effet de serre [Géologie : objets et méthodes]

$$E_{ES} = \frac{342}{2} \cdot \sum_0^{n=\infty} \left(\frac{1}{2}\right)^n \rightarrow \frac{1}{1 - 0,5} = 2 \quad (6)$$

D'où $E_{ES} = 342 \times 2 = 684 W.m^{-2}$

- └ Les bases de climatologie nécessaires à la compréhension des changements climatiques futures
- └ L'effet de serre



Calcul de la T d'équilibre de la Terre avec effet de serre (dans ce cas

$E_{Re-T} = E_{ES} = 2 \times E_R$ et sans albédo

Dans ce cas,



Calcul de la T d'équilibre de la Terre avec effet de serre (dans ce cas $E_{Re-T} = E_{ES} = 2 \times E_R$ et sans albédo

$$4\sigma\pi R_T^2 T_{Te}^4 = \pi R_T^2 \times 2 \times (1 - A) \times E_{ES} \quad (7)$$

D'où

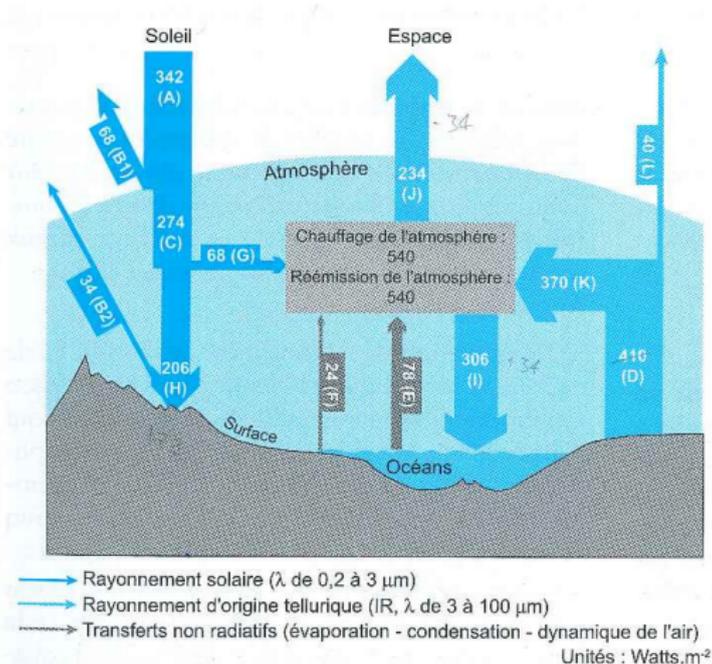
$$T_{Te} = \sqrt[4]{\frac{2(1 - A) \times E_{ES}}{4\sigma}} = 31.07 \text{ deg C} \quad (8)$$



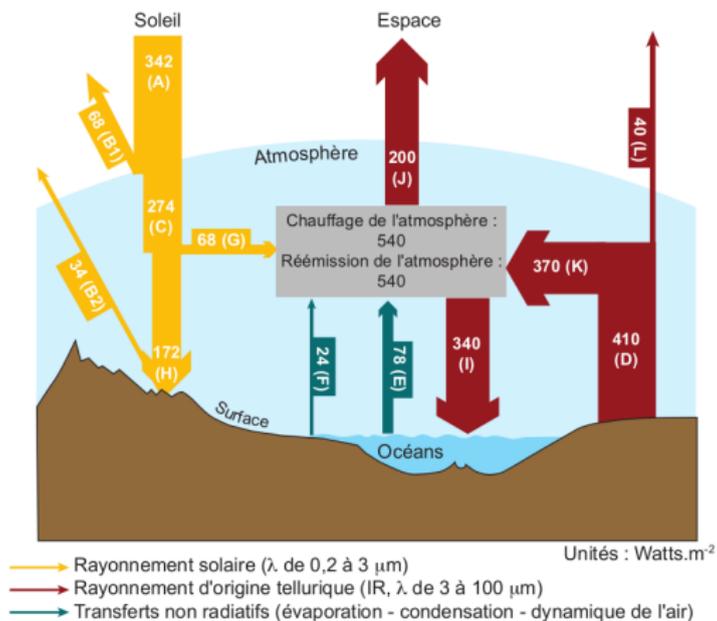
Validation du modèle

- ♣ Température calculée différente de la température mesurée
- ♣ Le modèle d'effet de serre ne permet pas de modéliser correctement les températures terrestres

- └ Les bases de climatologie nécessaires à la compréhension des changements climatiques futures
 - └ L'effet de serre

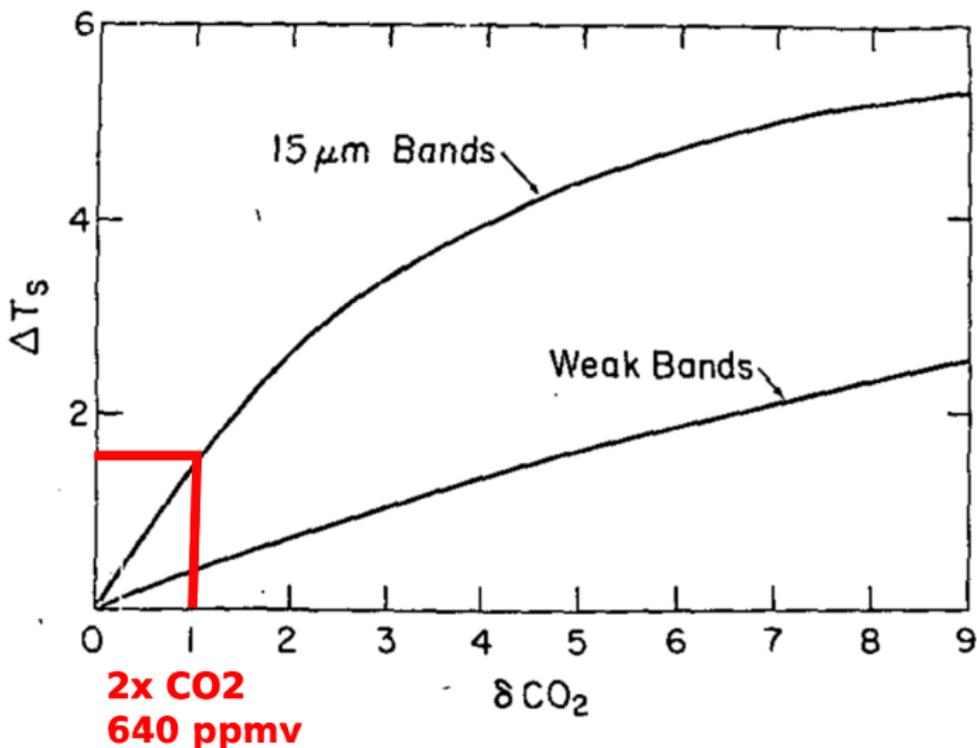


Modèle du bilan énergétique de la Terre (Attention les flux atm-espace et atm océan sont faux) [Géologie : objets et méthodes]



(a) Bilan énergétique de l'atmosphère à l'équilibre.

La même chose mais corrigé [C.Langlois]



Première prédiction de l'effet d'un doublement de la concentration en GES [Augustsson 1977]

- 1 Les bases de climatologie nécessaires à la compréhension des changements climatiques futures
- 2 Les instances internationales dédiées aux changements climatiques**
- 3 Modélisation des climats futurs de la Terre
- 4 Effets des changements climatiques
- 5 Changements climatiques et événements extrêmes
- 6 Les changements climatiques sont dû aux activités humaines

- 1 Les bases de climatologie nécessaires à la compréhension des changements climatiques futures
- 2 Les instances internationales dédiées aux changements climatiques
 - Le GIEC en quelques mots
- 3 Modélisation des climats futurs de la Terre
- 4 Effets des changements climatiques
- 5 Changements climatiques et événements extrêmes
- 6 Les changements climatiques sont dû aux activités humaines

- └ Les instances internationales dédiées aux changements climatiques
 - └ Le GIEC en quelques mots

ipcc

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON
climate change



**Intergovernmental Panel on Climate Change ou Groupement
Intergouvernemental d'Etudes Climatiques**



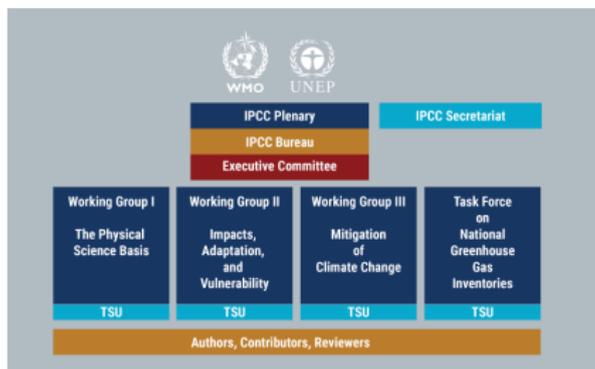
Intergovernmental Panel on Climate Change ou Groupement Intergouvernemental d'Etudes Climatiques

IPCC – Histoire

- Création : Novembre 1988
- Un rapport (plus de 2000 pages ...) tout les 6 ans
- 2007 : Prix Nobel de la Paix



Intergovernmental Panel on Climate Change ou Groupement Intergouvernemental d'Etudes Climatiques



Structure de l'organisation du GIEC (195 Experts intergouvernementaux)



Fonctionnement du GIEC

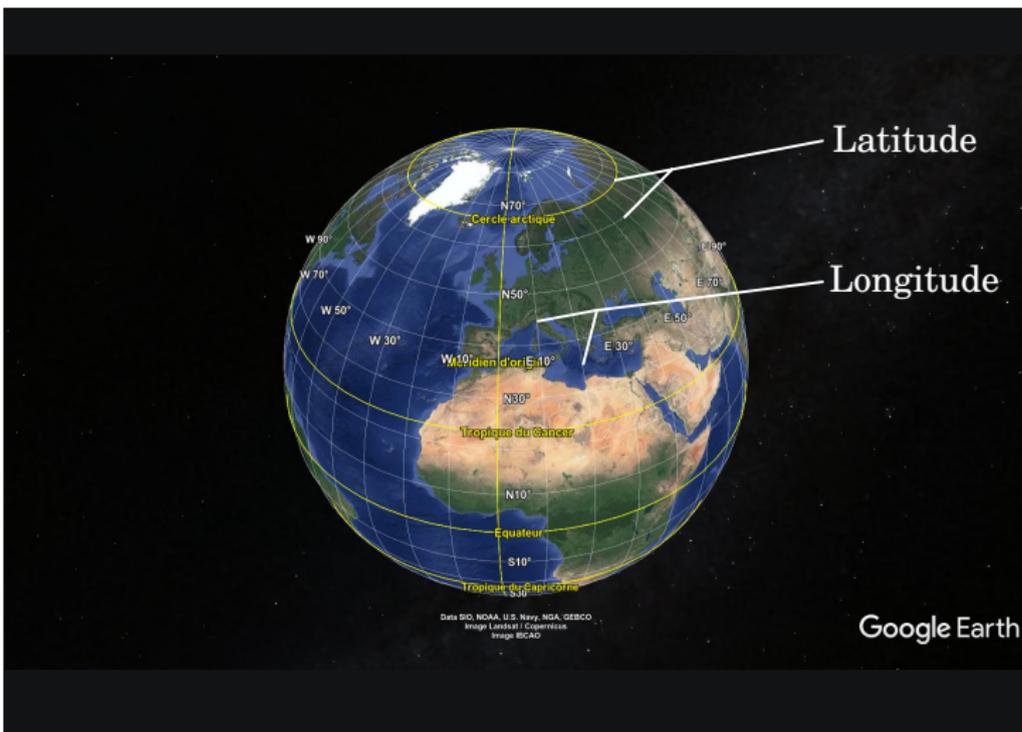
- 195 membres gouvernementaux défendant un “point” d’intérêt de l’état représenté (la liste est présente [\[ici\]](#) (En France nommé par le ministère de la transition écologique)
- Des experts non gouvernementaux représentant des ONG ou des agences reconnues par l’ONU (ex: UNESCO, Greenpeace, ... détail : [\[ici\]](#))
- Les auteurs-trices des rapports scientifiques sont nommés par le GIEC et doivent être spécialistes de leur domaine (liste disponible [\[ici\]](#)).

Rapports du GIEC (IPCC)

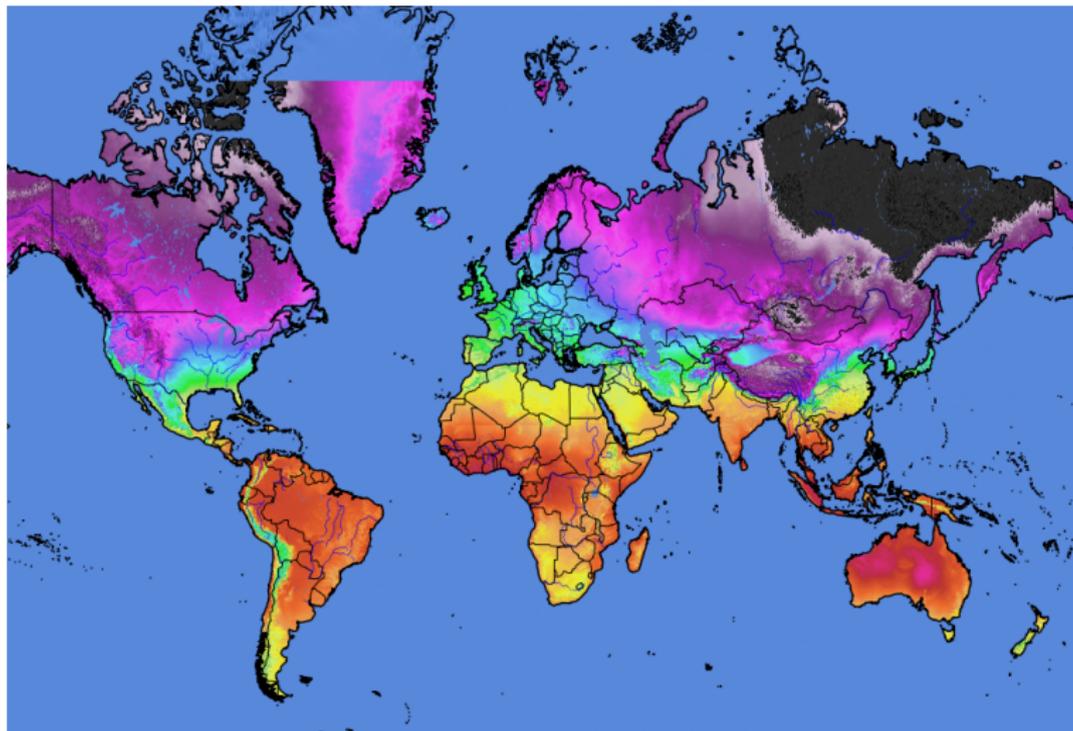
Ces rapports (et les futurs) sont tous disponible gratuitement et librement sur le site de l'IPCC [ipcc.ch]

- 📄 Climate Change 2022
- 📄 Global Warming of 1.5°C
- 📄 Climate Change 2014
- 📄 Climate Change 2007
- 📄 Climate Change 2001
- 📄 Climate Change 1996
- 📄 Climate Change 1990

- 1 Les bases de climatologie nécessaires à la compréhension des changements climatiques futures
- 2 Les instances internationales dédiées aux changements climatiques
- 3 Modélisation des climats futurs de la Terre
- 4 Effets des changements climatiques
- 5 Changements climatiques et événements extrêmes
- 6 Les changements climatiques sont dû aux activités humaines



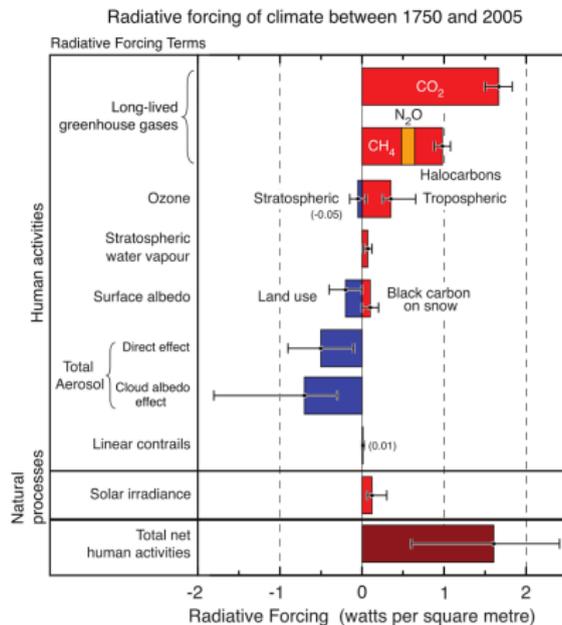
Modélisation d'une vue satellite de la Terre [Google Earth]. Le climat dépend directement de la latitude.



Modèle des températures moyennes mondiales sur la période
1981-2010 [infoclimat.fr]

Flux solaire au cours de l'année

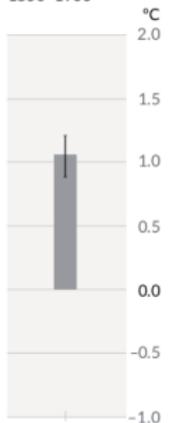
[Répartition de l'énergie solaire sur Terre en fonction du mois et de la latitude] Source : [planet-terre]



Forçage radiatif dû à l'augmentation anthropique de certains paramètres climatique [IPCC 2017, chap 2]

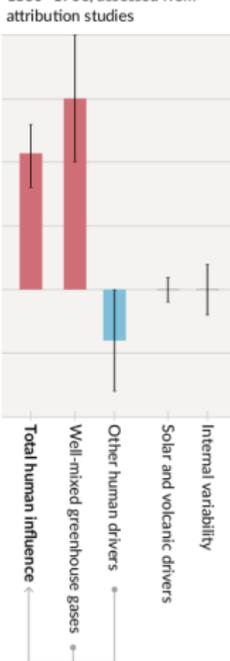
Observed warming

(a) Observed warming 2010–2019 relative to 1850–1900

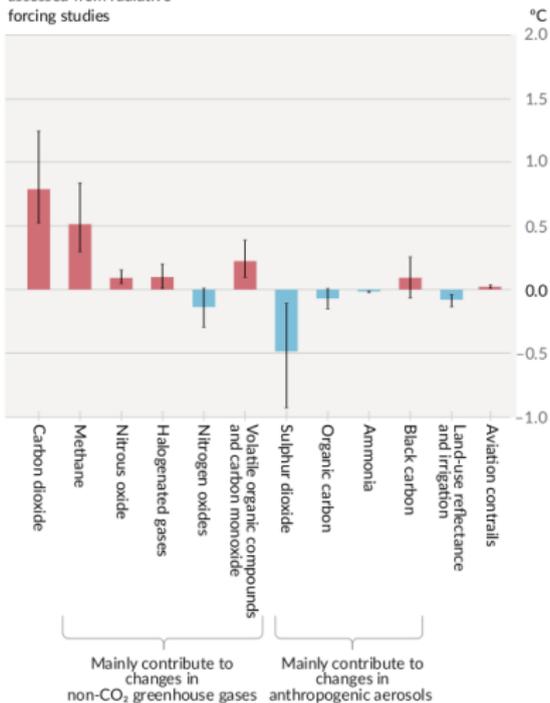


Contributions to warming based on two complementary approaches

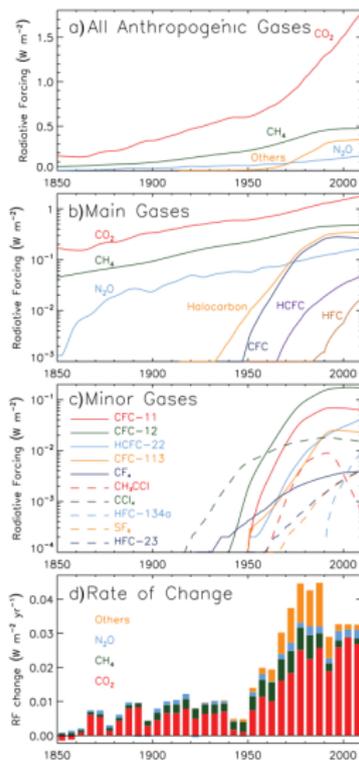
(b) Aggregated contributions to 2010–2019 warming relative to 1850–1900, assessed from attribution studies



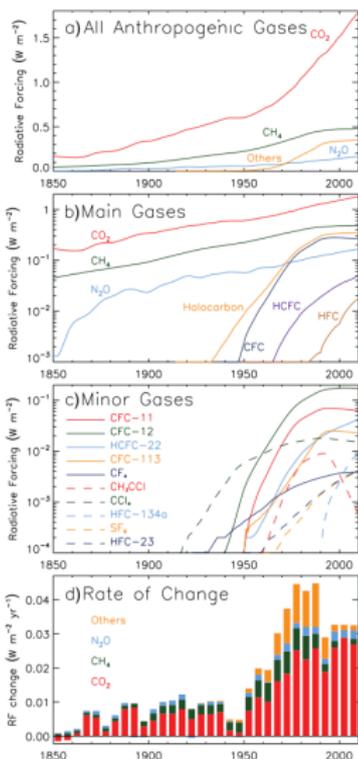
(c) Contributions to 2010–2019 warming relative to 1850–1900, assessed from radiative forcing studies



Principales causes du réchauffement climatique de 1° sur la période 2000-2019 par rapport à 1850-1900 (Masson-Delmotte 129/259



Évolution de la teneur en gaz à effet de serre au cours des deux derniers siècles [IPCC 2017, chap 8]



Comment modéliser l'effet de ce forçage sur le climat

En modélisant l'évolution de ce forçage au cours des prochaines décennies (*un peu hors programme mais c'est important de comprendre comment ça fonctionne*)

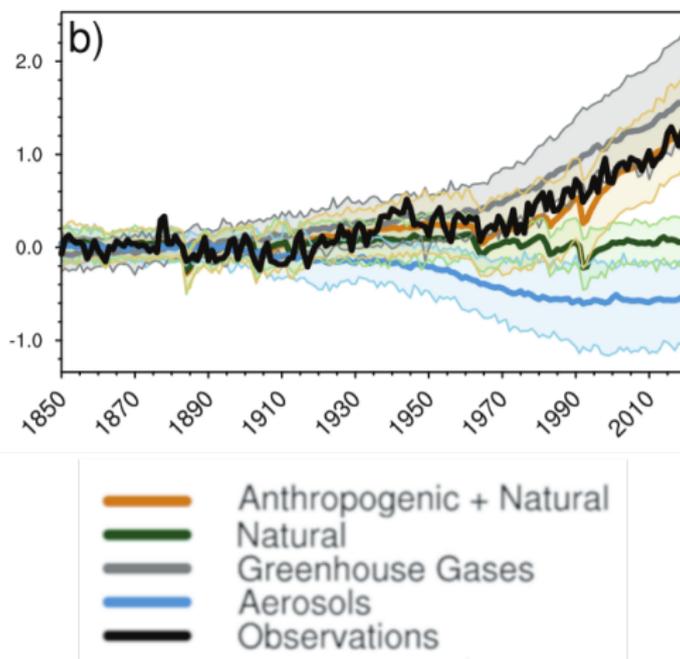
En modélisant l'effet de ce forçage sur le climat

Évolution de la teneur en gaz à effet de serre au cours des deux derniers siècles [IPCC 2017, chap 8]

- 1 Les bases de climatologie nécessaires à la compréhension des changements climatiques futures
- 2 Les instances internationales dédiées aux changements climatiques
- 3 Modélisation des climats futurs de la Terre
 - Observation du réchauffement climatique 1850-2022
 - Une augmentation globale des températures dû à l'activité humaine
 - Une fonte de la calotte arctique dû aux activités humaines
 - Une augmentation du niveau de l'océan dû aux activités humaines
 - Modélisation des paramètres d'entrées des modèles
 - Vérification de la qualité des modèles
 - Modélisation des paramètres climatiques futurs
 - Modélisation des climats régionaux futurs
 - Vers une augmentation de la température inédite à l'échelle des temps géologiques
- 4 Effets des changements climatiques
- 5 Changements climatiques et événements extrêmes
- 6 Les changements climatiques sont dû aux activités humaines

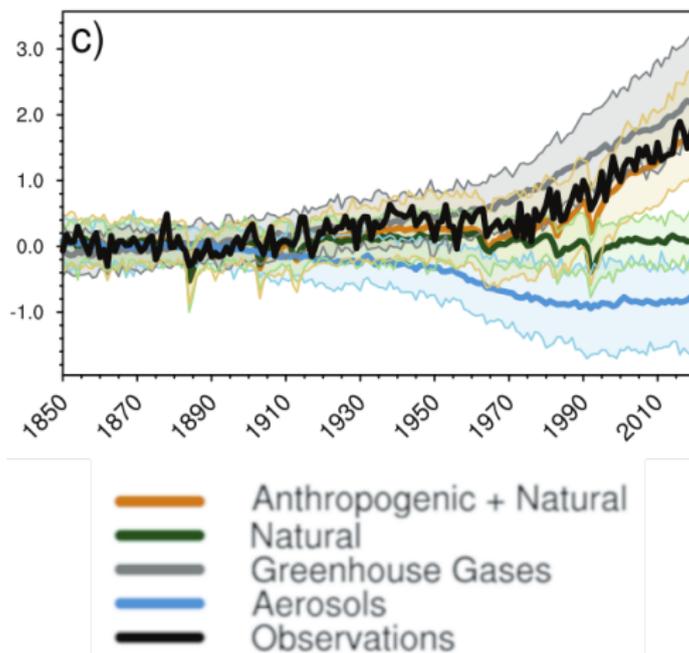
- 1 Les bases de climatologie nécessaires à la compréhension des changements climatiques futures
- 2 Les instances internationales dédiées aux changements climatiques
- 3 Modélisation des climats futurs de la Terre
 - Observation du réchauffement climatique 1850-2022
 - Une augmentation globale des températures dû à l'activité humaine
 - Une fonte de la calotte arctique dû aux activités humaines
 - Une augmentation du niveau de l'océan dû aux activités humaines
 - Modélisation des paramètres d'entrées des modèles
 - Vérification de la qualité des modèles
 - Modélisation des paramètres climatiques futurs
 - Modélisation des climats régionaux futurs
 - Vers une augmentation de la température inédite à l'échelle des temps géologiques
- 4 Effets des changements climatiques
- 5 Changements climatiques et événements extrêmes
- 6 Les changements climatiques sont dû aux activités humaines

Global



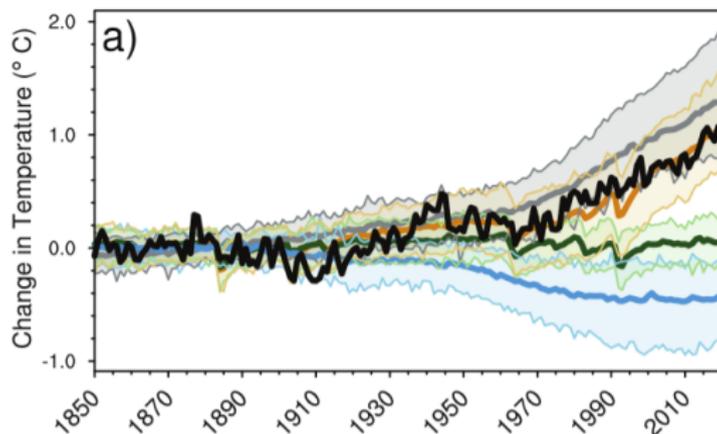
Evolution des températures mondiale comparée à différents modèles numériques (Masson-Delmotte et al., 2021(©))

Global Land



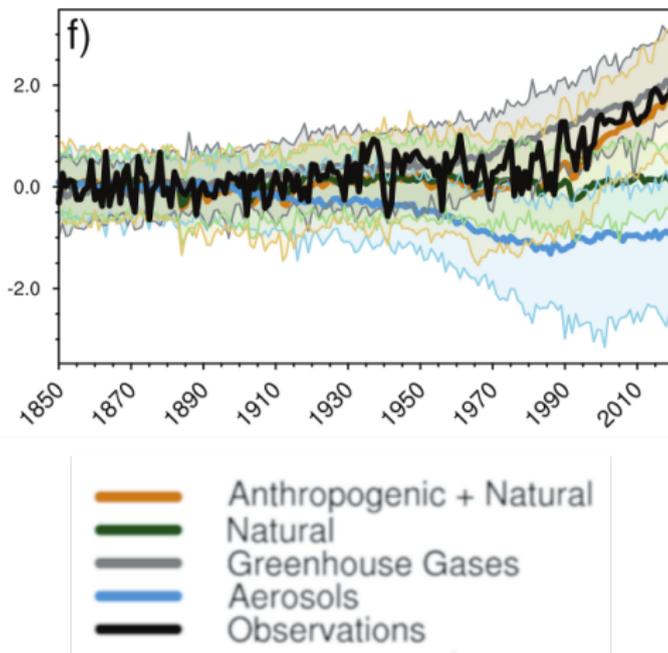
Evolution des températures mondiales sur les continents globale comparée à différents modèles numériques (Masson-Delmotte et al., 2021(@))

Global Ocean



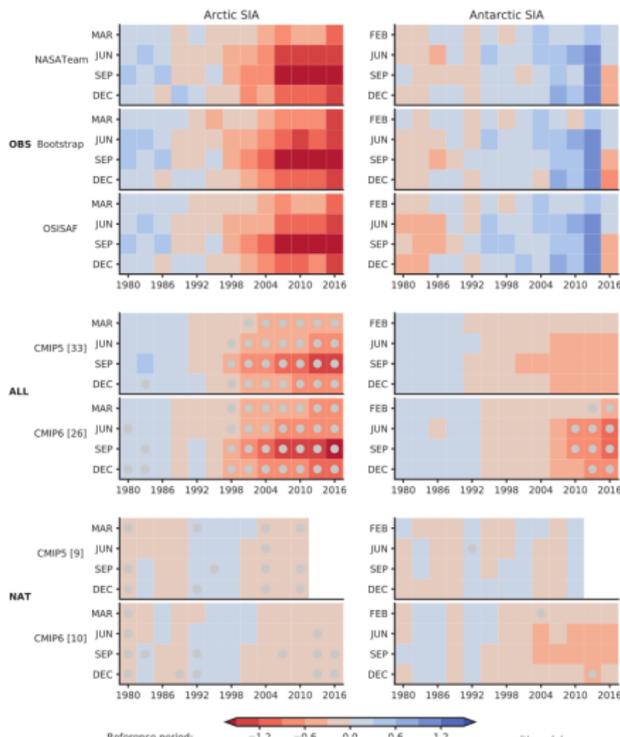
Evolution des températures mondiales sur les océans globale comparée à différents modèles numériques (Masson-Delmotte et al., 2021(@))

Europe and North Africa



Evolution des températures Européenne comparée à différents modèles numériques (Masson-Delmotte et al., 2021(©))

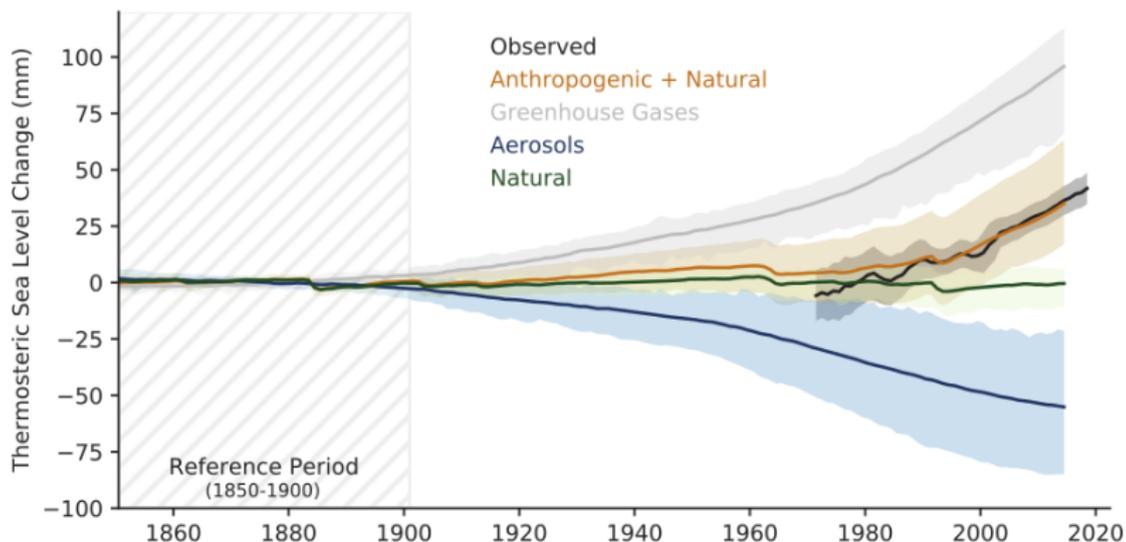
- 1 Les bases de climatologie nécessaires à la compréhension des changements climatiques futures
- 2 Les instances internationales dédiées aux changements climatiques
- 3 Modélisation des climats futurs de la Terre
 - Observation du réchauffement climatique 1850-2022
 - Une augmentation globales des températures dû à l'activité humaine
 - Une fonte de la calotte arctique dû aux activités humaines
 - Une augmentation du niveau de l'océan dû aux activités humaines
 - Modélisation des paramètres d'entrées des modèles
 - Vérification de la qualité des modèles
 - Modélisation des paramètres climatiques futurs
 - Modélisation des climats régionaux futurs
 - Vers une augmentation de la température inédite à l'échelle des temps géologiques
- 4 Effets des changements climatiques
- 5 Changements climatiques et événements extrêmes
- 6 Les changements climatiques sont dû aux activités humaines



(OBS) Observation de l'évolution de la taille de la calotte Arctique (gauche) et antarctique (droite) comparée à un modèle prenant en compte l'origine naturelle de la fonte (NAT) et prenant en compte tout les paramètres.

- 1 Les bases de climatologie nécessaires à la compréhension des changements climatiques futures
- 2 Les instances internationales dédiées aux changements climatiques
- 3 Modélisation des climats futurs de la Terre
 - Observation du réchauffement climatique 1850-2022
 - Une augmentation globale des températures dû à l'activité humaine
 - Une fonte de la calotte arctique dû aux activités humaines
 - Une augmentation du niveau de l'océan dû aux activités humaines
 - Modélisation des paramètres d'entrées des modèles
 - Vérification de la qualité des modèles
 - Modélisation des paramètres climatiques futurs
 - Modélisation des climats régionaux futurs
 - Vers une augmentation de la température inédite à l'échelle des temps géologiques
- 4 Effets des changements climatiques
- 5 Changements climatiques et événements extrêmes
- 6 Les changements climatiques sont dû aux activités humaines

Simulated and observed global mean sea level change due to thermal expansion



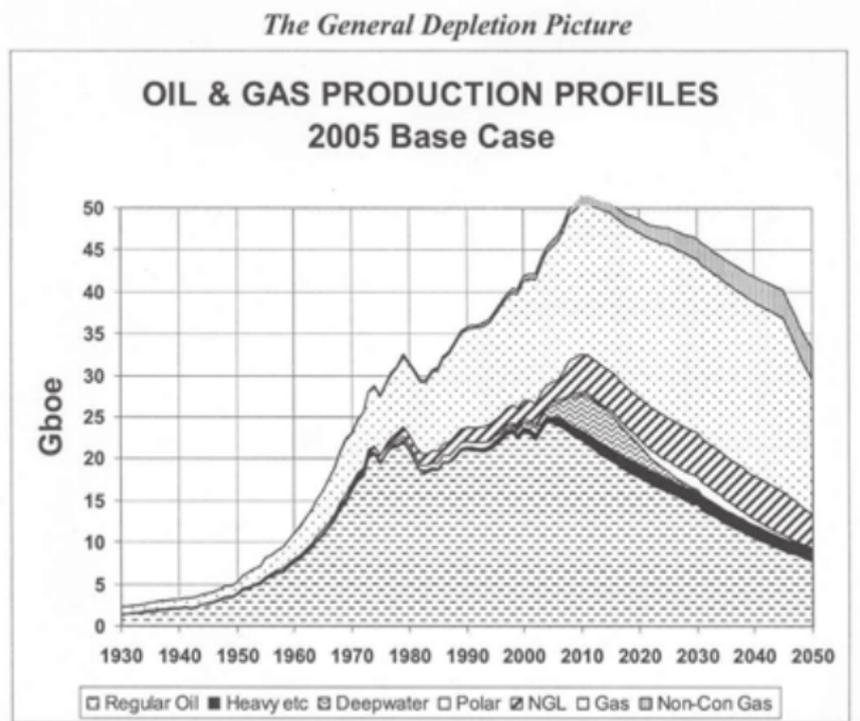
Observation de l'augmentation du niveau des océans depuis 1850 (noir) comparée à des modèles où seules les paramètres naturels (Vert), où seul l'effet des aérosols (bleu), où seul l'effet des GES (gris) et où l'ensemble des paramètres (orange) sont pris en compte

- 1 Les bases de climatologie nécessaires à la compréhension des changements climatiques futures
- 2 Les instances internationales dédiées aux changements climatiques
- 3 Modélisation des climats futurs de la Terre
 - Observation du réchauffement climatique 1850-2022
 - **Modélisation des paramètres d'entrées des modèles**
 - Modélisation des réserves de la taille des réservoirs d'énergies non renouvelables
 - Etat actuelle de la consommation d'énergie dans le monde (rapport BP 2017)
 - Modélisations de l'émission de gaz à effet de serre
 - Gaz à effet de serre et forçage radiatif
 - Les différents scénarios climatiques possibles
 - Vérification de la qualité des modèles
 - Modélisation des paramètres climatiques futurs
 - Modélisation des climats régionaux futurs
 - Vers une augmentation de la température inédite à l'échelle des temps géologiques
- 4 Effets des changements climatiques
- 5 Changements climatiques et événements extrêmes

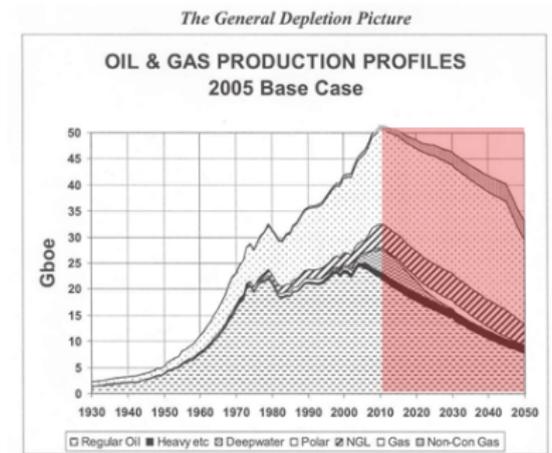
- 1 Les bases de climatologie nécessaires à la compréhension des changements climatiques futures
- 2 Les instances internationales dédiées aux changements climatiques
- 3 Modélisation des climats futurs de la Terre
 - Observation du réchauffement climatique 1850-2022
 - Modélisation des paramètres d'entrées des modèles
 - Modélisation des réserves de la taille des réservoirs d'énergies non renouvelables
 - Etat actuelle de la consommation d'énergie dans le monde (rapport BP 2017)
 - Modélisations de l'émission de gaz à effet de serre
 - Gaz à effet de serre et forçage radiatif
 - Les différents scénarios climatiques possibles
 - Vérification de la qualité des modèles
 - Modélisation des paramètres climatiques futurs
 - Modélisation des climats régionaux futurs
 - Vers une augmentation de la température inédite à l'échelle des temps géologiques
- 4 Effets des changements climatiques
- 5 Changements climatiques et événements extrêmes

A silhouette of an oil pumpjack is centered in the frame against a dramatic sunset sky. The sun is a large, bright orange orb partially obscured by the pumpjack's structure. The sky is filled with soft, orange and yellow clouds. The pumpjack's legs and walking beam are clearly visible in dark silhouette. A utility pole is visible in the distance to the right.

Évaluons d'abord la taille des reservoirs de pétrole



**Modélisation de la modélisation de la production mondiale
d'énergie non renouvelable [Green (2008)]**



Modélisation de la modélisation de la production mondiale d'énergie non renouvelable [Green (2008)]

A quand le peak oil?

Peak oil : date à partir de laquelle la disponibilité en énergie non renouvelable ne pourra plus suivre la demande

ATTENTION

Ce modèle ne prend pas assez en compte les réserves non conventionnelles

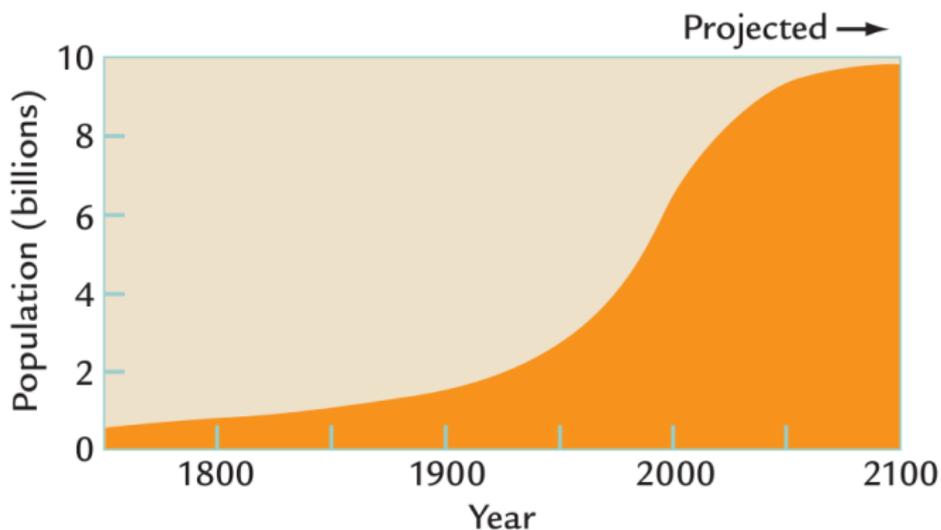
The image shows a silhouette of an oil pumpjack against a bright, orange sunset sky. The sun is low on the horizon, partially obscured by the pumpjack's structure. The sky is filled with soft, orange clouds. In the foreground, there are dark silhouettes of trees and a utility pole.

Comment prévoir la consommation future de pétrole ?

The background of the slide is a photograph of an oil pumpjack (jack-o'-lantern) in silhouette against a bright, orange sunset sky. The sun is a large, glowing orb partially obscured by the top of the pumpjack's structure. The sky is filled with soft, orange-tinted clouds. The overall mood is dramatic and industrial.

Comment prévoir la consommation future de pétrole ?

—> En estimant la consommation de GES qui est fonction de la population mondiale, de ses habitudes, ...



Modélisation de l'évolution de la population mondiale [Earth's climate]

Vers une augmentation de la population mondiale

Intensification de la déforestation

Intensification de la libération de matière fossiles

11. Prévisions de consommation pétrolière mondiale

Projection	2010	2015	2020	2025	2030
AEO2008 (<i>reference case</i>)	75,97	61,41	61,26	66,17	72,29
AEO2008 (<i>high price case</i>)	81,08	92,77	104,74	112,10	121,75
AEO2009 (<i>reference case</i>)	80,16	110,49	115,45	121,94	130,43
Deutsche Bank	47,43	72,20	66,09	68,27	70,31
IHS Global Insight	101,99	97,60	75,18	71,33	68,14
IEA (<i>reference</i>)	100,00	100,00	110,00	116,00	122,00
IER ^(*)	65,24	67,03	70,21	72,37	74,61
Energie Ventures Analysis	57,09	74,61	95,33	105,25	116,21
SEER ^(**)	54,82	98,40	89,88	82,10	75,00

Différentes modélisations de la consommation future de pétrole dans le monde [Artus]

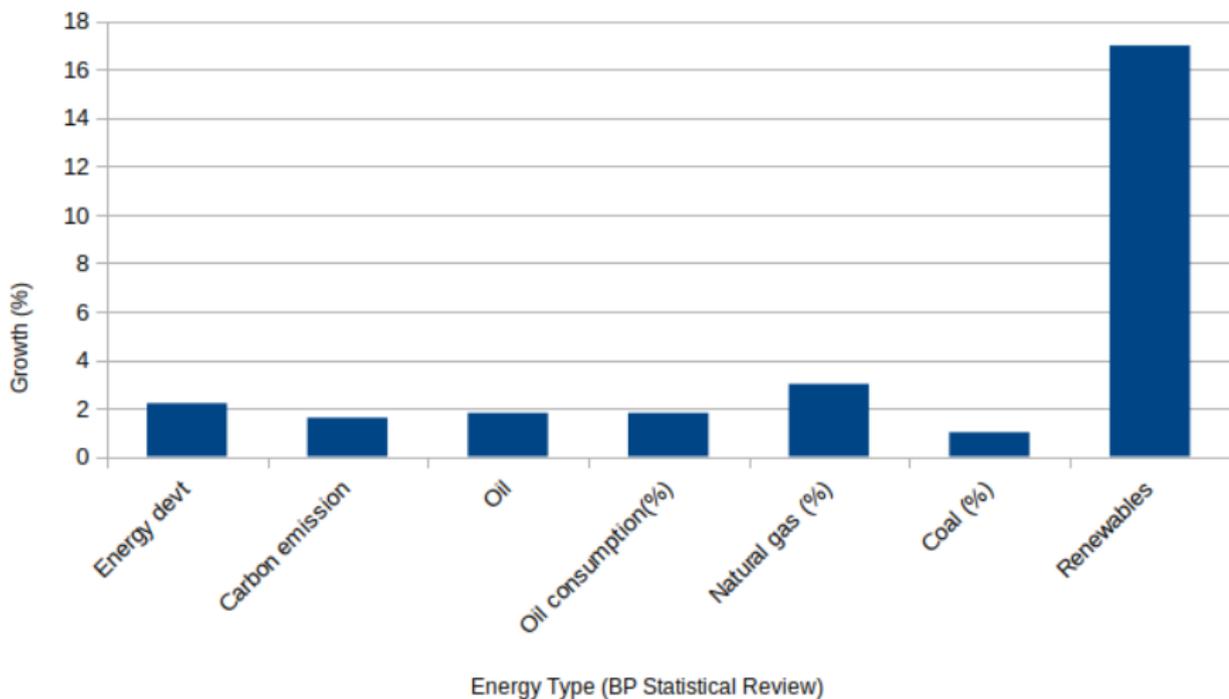
Donc :

Quel que soit le modèle, une tendance à l'augmentation de la production de GES

- 1 Les bases de climatologie nécessaires à la compréhension des changements climatiques futures
- 2 Les instances internationales dédiées aux changements climatiques
- 3 Modélisation des climats futurs de la Terre
 - Observation du réchauffement climatique 1850-2022
 - **Modélisation des paramètres d'entrées des modèles**
 - Modélisation des réserves de la taille des réservoirs d'énergies non renouvelables
 - **Etat actuelle de la consommation d'énergie dans le monde (rapport BP 2017)**
 - Modélisations de l'émission de gaz à effet de serre
 - Gaz à effet de serre et forçage radiatif
 - Les différents scénario climatiques possibles
 - Vérification de la qualité des modèles
 - Modélisation des paramètres climatiques futurs
 - Modélisation des climats régionaux futurs
 - Vers une augmentation de la température inédite à l'échelle des temps géologiques
- 4 Effets des changements climatiques
- 5 Changements climatiques et événements extrêmes

The image shows a silhouette of an oil pumpjack (jack-o'-lantern) against a bright, orange sunset sky. The sun is a large, glowing orb partially obscured by the pumpjack's structure. The sky is filled with soft, orange and yellow clouds. In the foreground, there are dark silhouettes of trees and a utility pole. A black horizontal bar with white text is overlaid across the middle of the image.

Sous quelle forme l'énergie est-elle consommée actuellement?

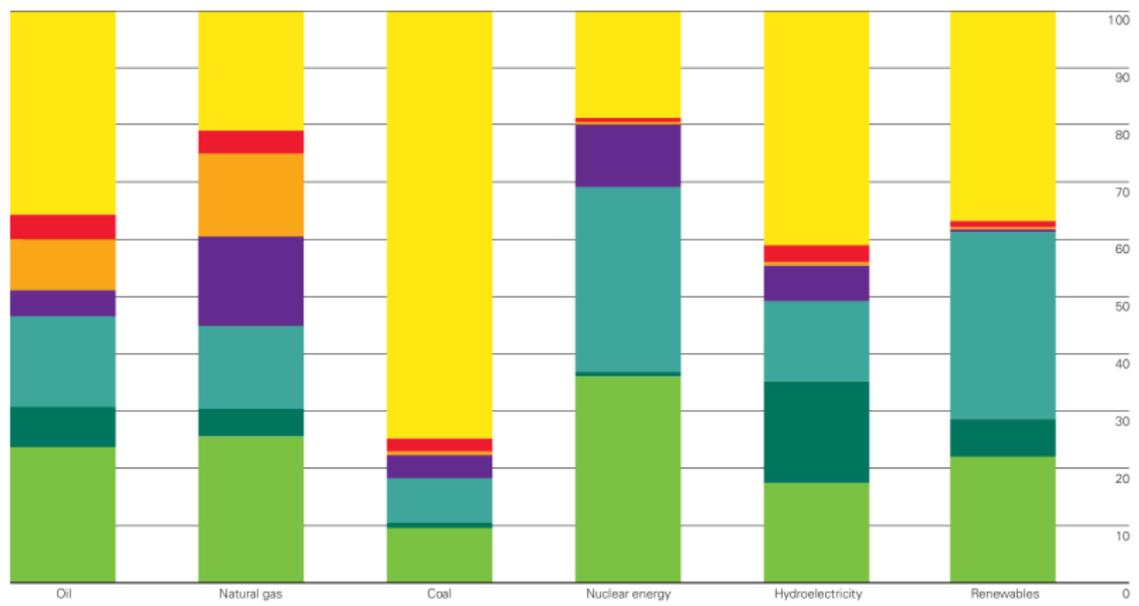


Pourcentage de croissance des différents secteurs de l'énergie (BP 2017)

Fuel consumption by region 2017

Percentage

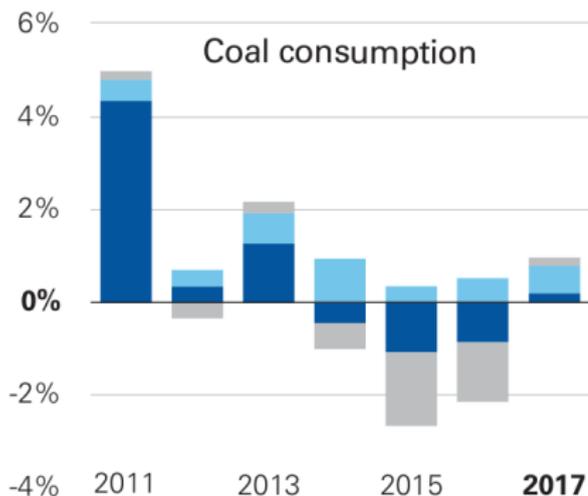
- Asia Pacific
- Africa
- Middle East
- Europe
- CIS
- S. & Cent. America
- North America



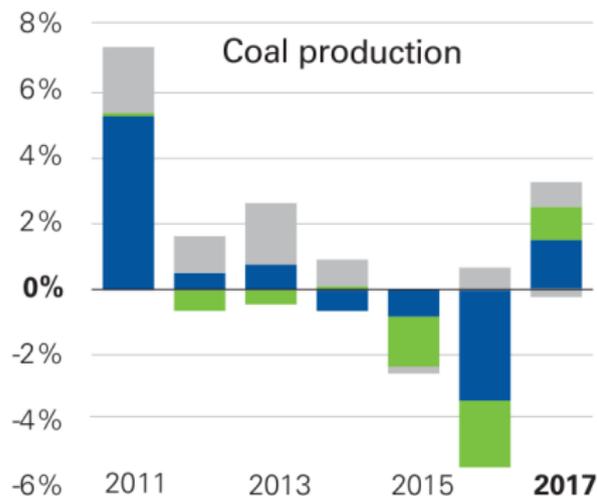
Consommation annuelle de fuel (BP 2017)

Global coal consumption and production

Contributions to annual growth



● Other ● India ● China



● Other ● US ● China

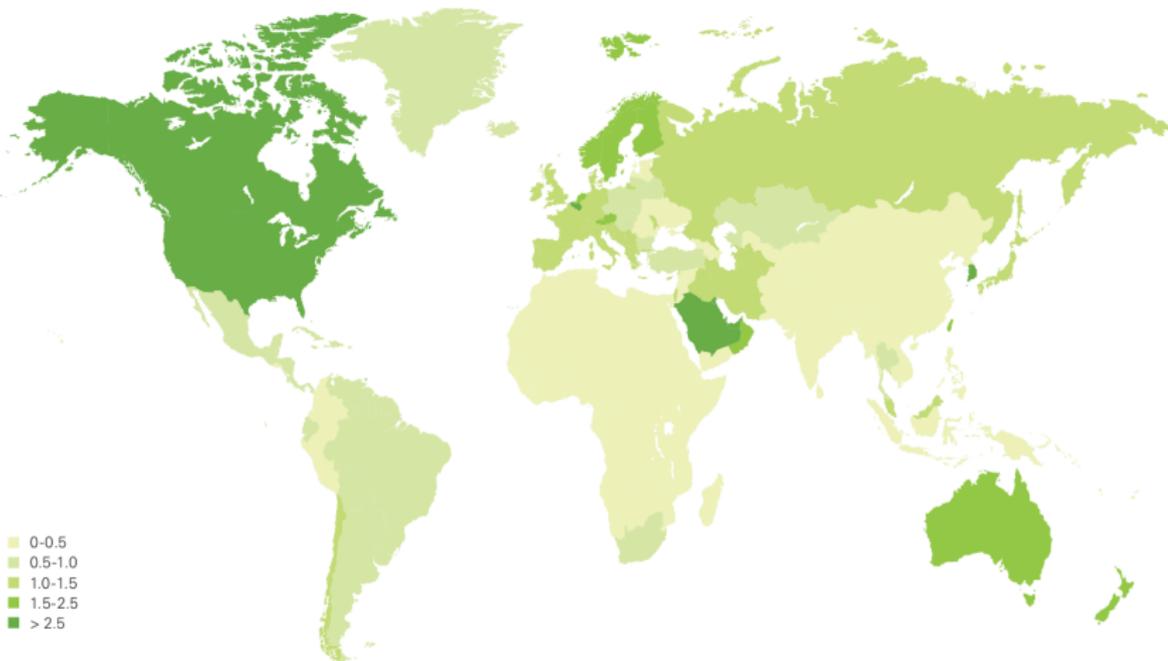
Consommation annuelle de charbon (coal) (BP 2017)

A silhouette of an oil pumpjack is centered against a bright, orange sunset sky. The sun is a large, glowing orb partially obscured by the pumpjack's structure. The sky is filled with soft, orange-tinted clouds. In the foreground, the dark silhouette of a tree is visible on the left, and a utility pole stands on the right. A black horizontal bar with a white border is positioned across the middle of the image, containing the text.

Qui consomme quoi?

Oil: Consumption per capita 2017

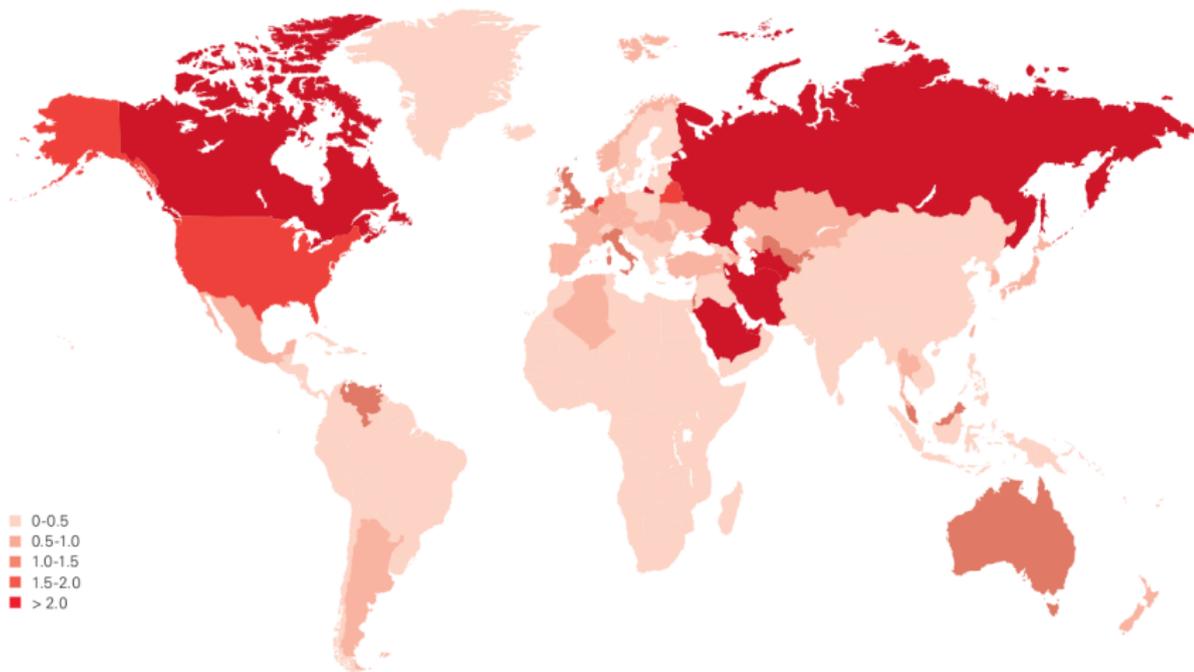
Tonnes



Consommation annuelle de pétrole par pays (BP 2017)

Natural gas: Consumption per capita 2017

Million tonnes of equivalent

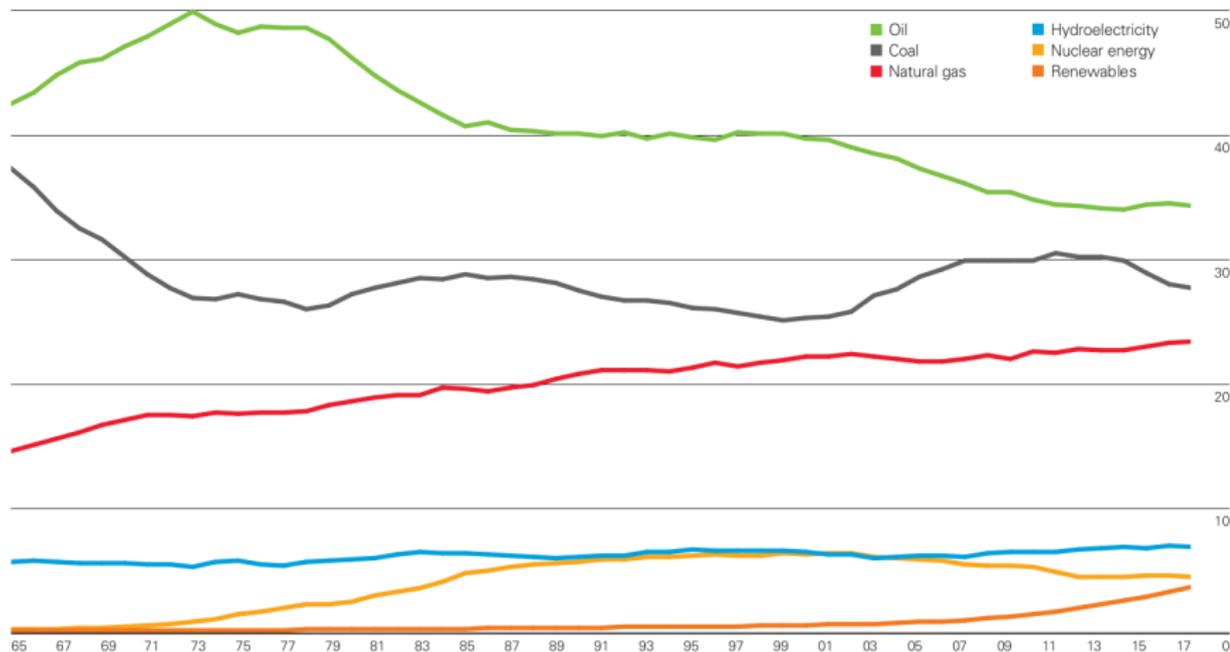
**Consommation annuelle de charbon par pays (BP 2017)**

The image shows a silhouette of an oil pumpjack (jack-o'-lantern) against a bright, orange sunset sky. The sun is a large, glowing orb partially obscured by the pumpjack's structure. The sky is filled with soft, orange and yellow clouds. In the foreground, there are dark silhouettes of trees and a utility pole. A black horizontal bar with a white border is overlaid across the middle of the image, containing the text.

Comment a évolué la consommation mondiale d'énergie

Shares of global primary energy consumption by fuel

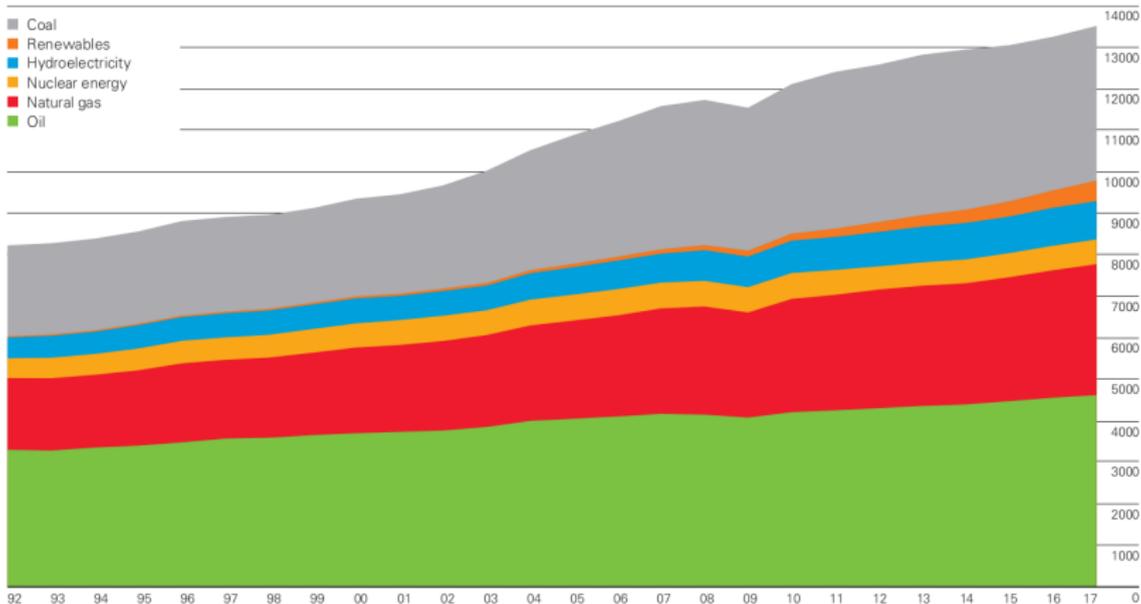
Percentage



Evolution des sources d'énergie mondiales depuis 1965 (BP 2017)

World consumption

Million tonnes oil equivalent



World primary energy consumption grew by 2.2% in 2017, up from 1.2% in 2016 and the highest since 2013. Growth was below average in Asia Pacific, the Middle East and S. & Cent. America but above average in other regions. All fuels except coal and hydroelectricity grew at above-average rates. Natural gas provided the largest increment to energy consumption at 83 million tonnes of oil equivalent (mtoe), followed by renewable power (69 mtoe) and oil (65 mtoe).

Evolution de la quantité d'énergie utilisée depuis 1965 (BP 2017)

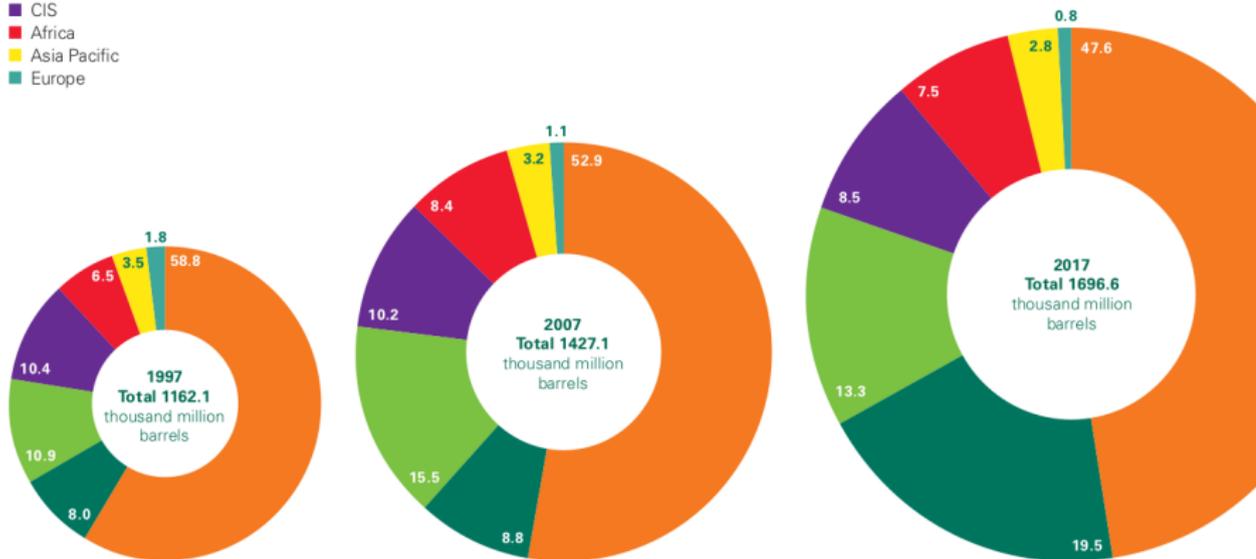
The image shows a silhouette of an oil pumpjack against a bright, orange sunset sky. The sun is a large, glowing orb positioned behind the pumpjack's walking beam. The sky is filled with soft, wispy clouds, and the overall color palette is dominated by warm tones of orange, yellow, and red. The pumpjack's structure, including its legs, walking beam, and counterweight, is clearly visible in dark silhouette against the bright background.

Quelles sont les stocks en énergies non renouvelables

Distribution of proved reserves in 1997, 2007 and 2017

Percentage

- Middle East
- S. & Cent. America
- North America
- CIS
- Africa
- Asia Pacific
- Europe

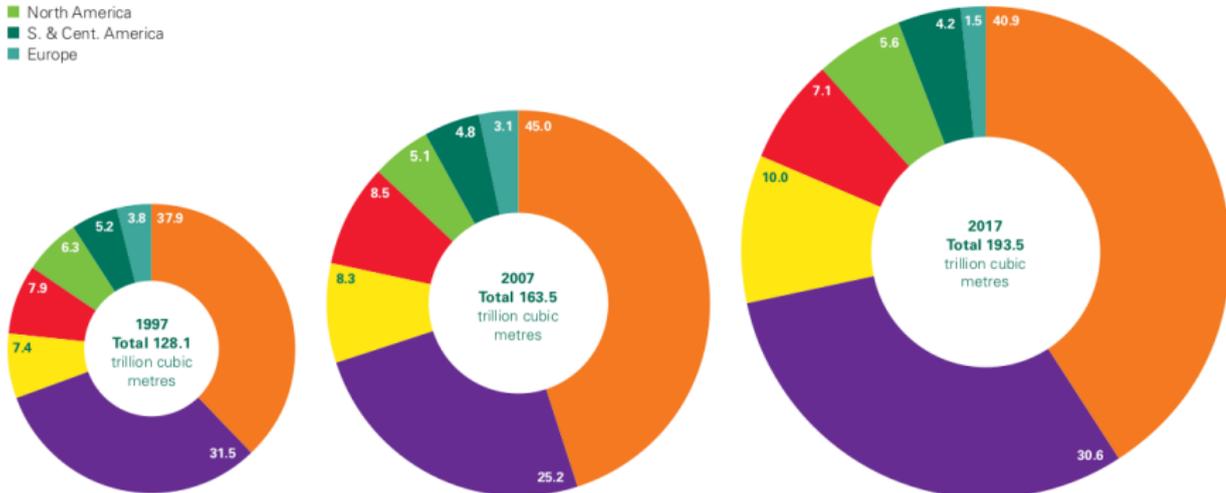


Réserve de pétrole mondiale estimée (BP 2017)

Distribution of proved reserves in 1997, 2007 and 2017

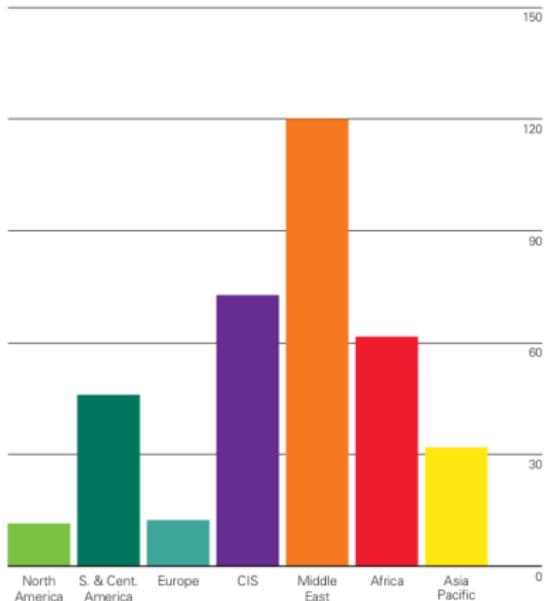
Percentage

- Middle East
- CIS
- Asia Pacific
- Africa
- North America
- S. & Cent. America
- Europe

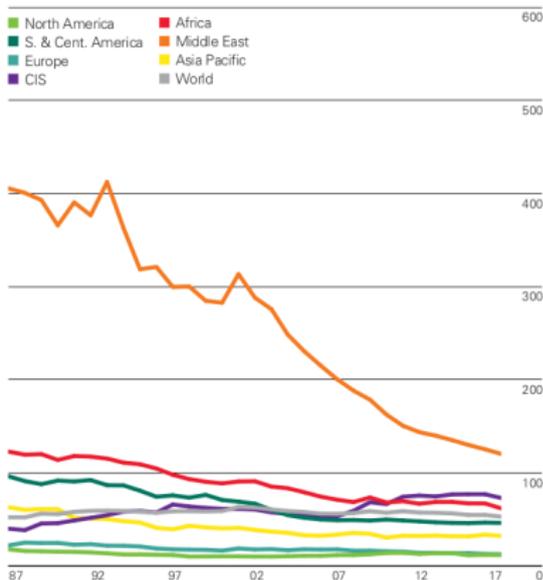


Réserve de gaz mondiale estimée (BP 2017)

2017 by region



History



Global proved gas reserves in 2017 rose slightly by 0.4 trillion cubic metres (tcm) or 0.2% to 193.5 tcm. This is sufficient to meet 52.6 years of global production at 2017 levels. Israel was the largest single contributor to growth (0.3 tcm), while the CIS region also added 0.2 tcm to reserves. By region, the Middle East holds the largest proved reserves (79.1 tcm, 40.9% of the global total), followed by CIS (59.2 tcm, a 30.6% share).

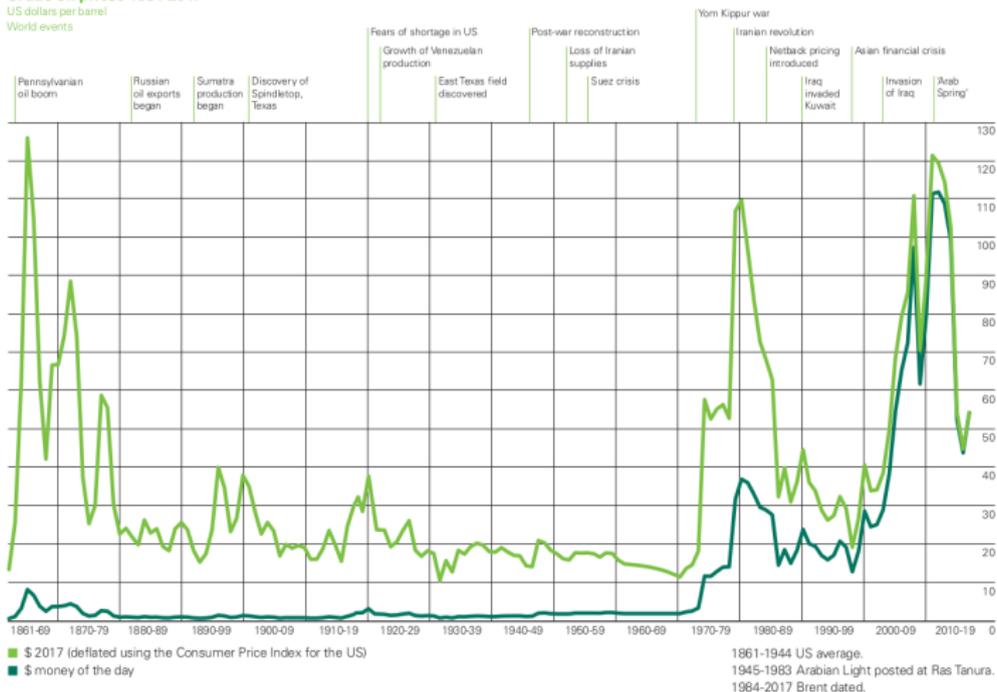
Note: Lags in reporting official data mean that 2017 figures for many countries are not yet available.

Evolution de la production de gaz au cours du temps (BP 2017)

Crude oil prices 1861-2017

US dollars per barrel

World events



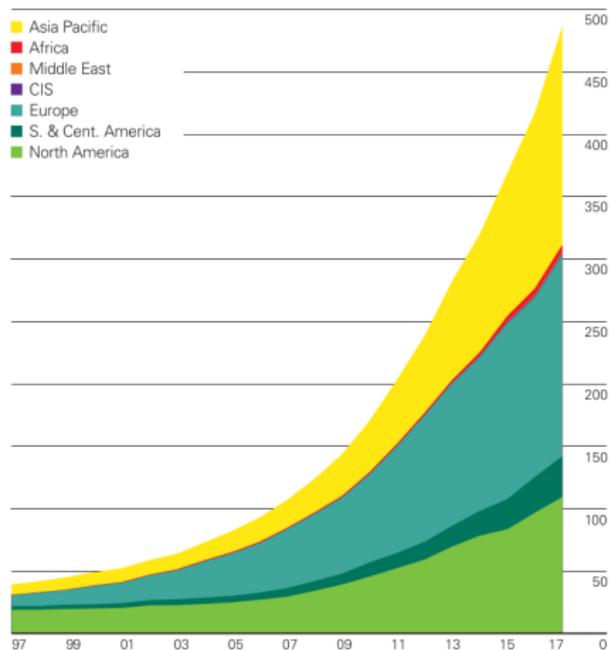
Evolution du prix du baril (BP 2017)

The image shows a silhouette of an oil pumpjack against a bright, orange sunset sky. The sun is a large, glowing orb positioned behind the top of the pumpjack's structure. The sky is filled with soft, wispy clouds, and the overall color palette is dominated by warm tones of orange, yellow, and red. The pumpjack's complex mechanical structure, including its walking beam and counterweights, is clearly visible in dark silhouette against the bright background.

Comment évolue la production d'énergie "propre"

Other renewables consumption by region

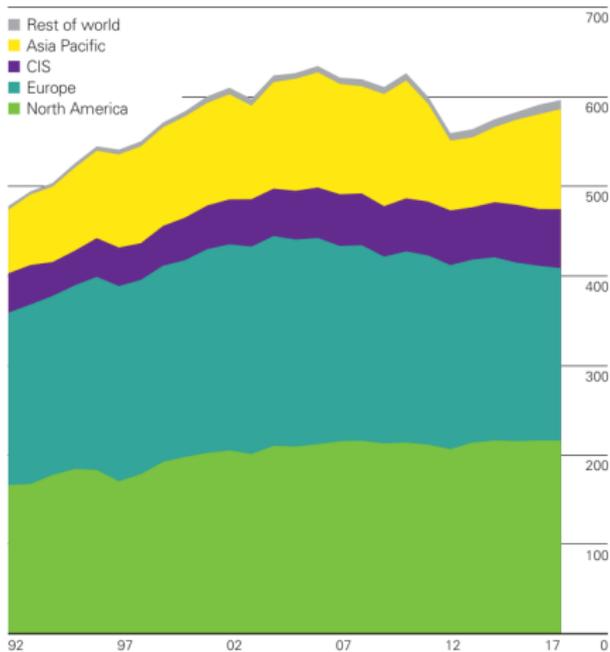
Million tonnes oil equivalent



Evolution de la production d'énergie renouvelable (BP 2017)

Nuclear energy consumption by region

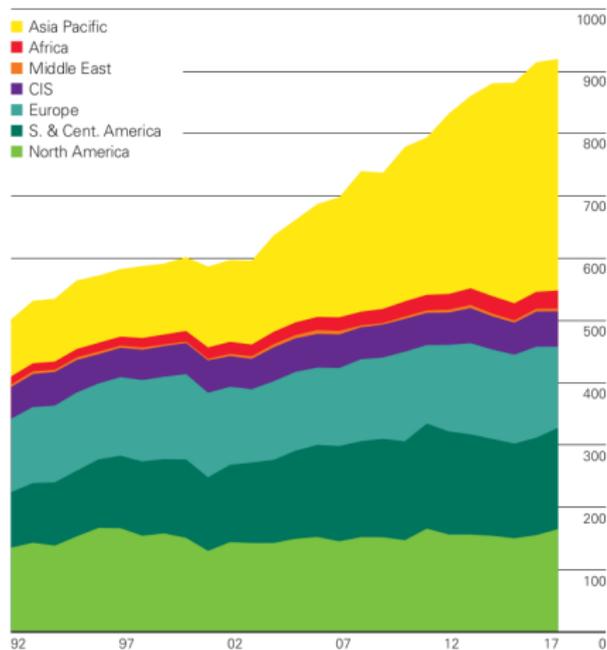
Million tonnes oil equivalent



Evolution de la production d'énergie nucléaire (BP 2017)

Hydroelectricity consumption by region

Million tonnes oil equivalent

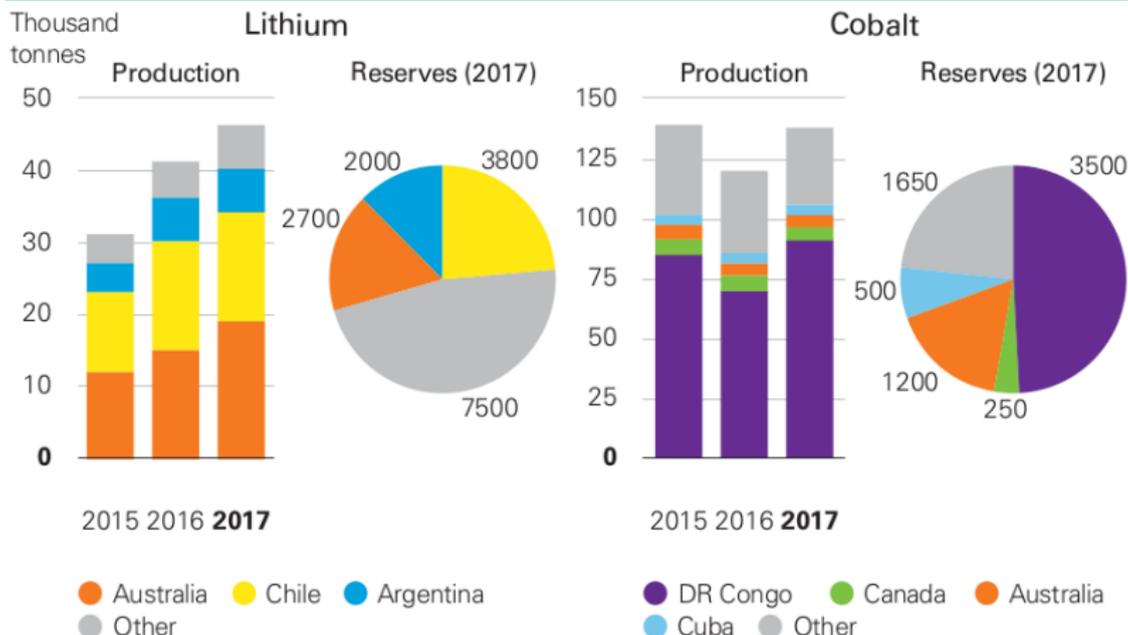


Evolution de la production d'hydroélectricité (BP 2017)



Electricité et batteries

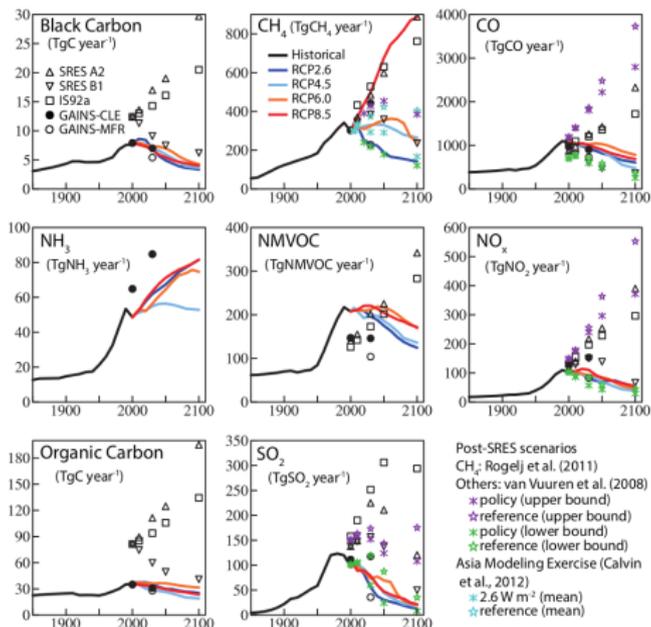
Lithium and cobalt: reserves and production



Evolution de la production de cobalt et de lithium

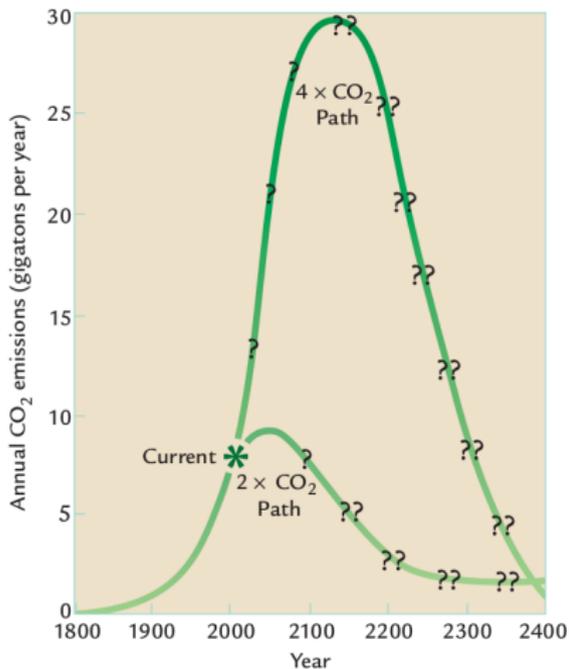
- 1 Les bases de climatologie nécessaires à la compréhension des changements climatiques futures
- 2 Les instances internationales dédiées aux changements climatiques
- 3 Modélisation des climats futurs de la Terre
 - Observation du réchauffement climatique 1850-2022
 - **Modélisation des paramètres d'entrées des modèles**
 - Modélisation des réserves de la taille des réservoirs d'énergies non renouvelables
 - Etat actuelle de la consommation d'énergie dans le monde (rapport BP 2017)
 - **Modélisations de l'émission de gaz à effet de serre**
 - Gaz à effet de serre et forçage radiatif
 - Les différents scénario climatiques possibles
 - Vérification de la qualité des modèles
 - Modélisation des paramètres climatiques futurs
 - Modélisation des climats régionaux futurs
 - Vers une augmentation de la température inédite à l'échelle des temps géologiques
- 4 Effets des changements climatiques
- 5 Changements climatiques et événements extrêmes

- └ Modélisation des climats futurs de la Terre
 - └ Modélisation des paramètres d'entrées des modèles



Différentes modélisations de l'évolution du taux de gaz à effet de serre [IPCC 2017, chap 5]

- └ Modélisation des climats futurs de la Terre
 - └ Modélisation des paramètres d'entrées des modèles



Des résultats différents

Modélisation complexe

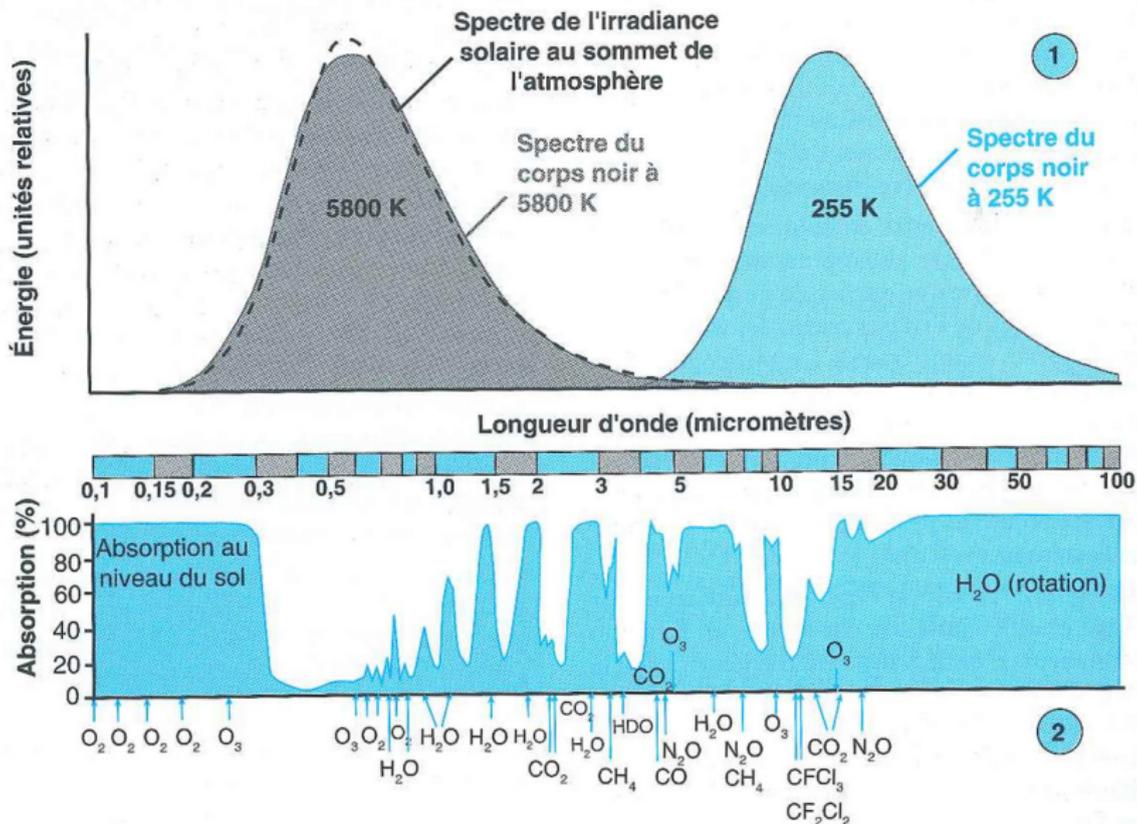
Grandes incertitudes sur la quantité de gaz à effet de serre qui sera émise

Quel effet sur l'effet de serre ?

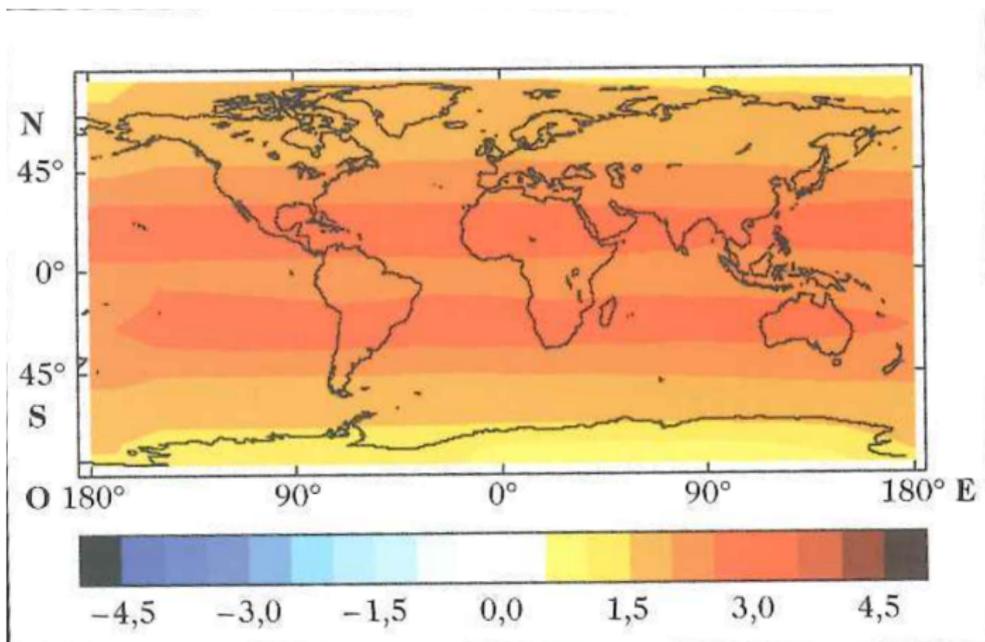
Deux exemples de modélisations de l'évolution du taux de CO₂ au cours des prochains siècles [Earth's climate]

- 1 Les bases de climatologie nécessaires à la compréhension des changements climatiques futures
- 2 Les instances internationales dédiées aux changements climatiques
- 3 Modélisation des climats futurs de la Terre
 - Observation du réchauffement climatique 1850-2022
 - **Modélisation des paramètres d'entrées des modèles**
 - Modélisation des réserves de la taille des réservoirs d'énergies non renouvelables
 - Etat actuelle de la consommation d'énergie dans le monde (rapport BP 2017)
 - Modélisations de l'émission de gaz à effet de serre
 - **Gaz à effet de serre et forçage radiatif**
 - Les différents scénarios climatiques possibles
 - Vérification de la qualité des modèles
 - Modélisation des paramètres climatiques futurs
 - Modélisation des climats régionaux futurs
 - Vers une augmentation de la température inédite à l'échelle des temps géologiques
- 4 Effets des changements climatiques
- 5 Changements climatiques et événements extrêmes

- └ Modélisation des climats futurs de la Terre
 - └ Modélisation des paramètres d'entrées des modèles



Pour rappel ;)

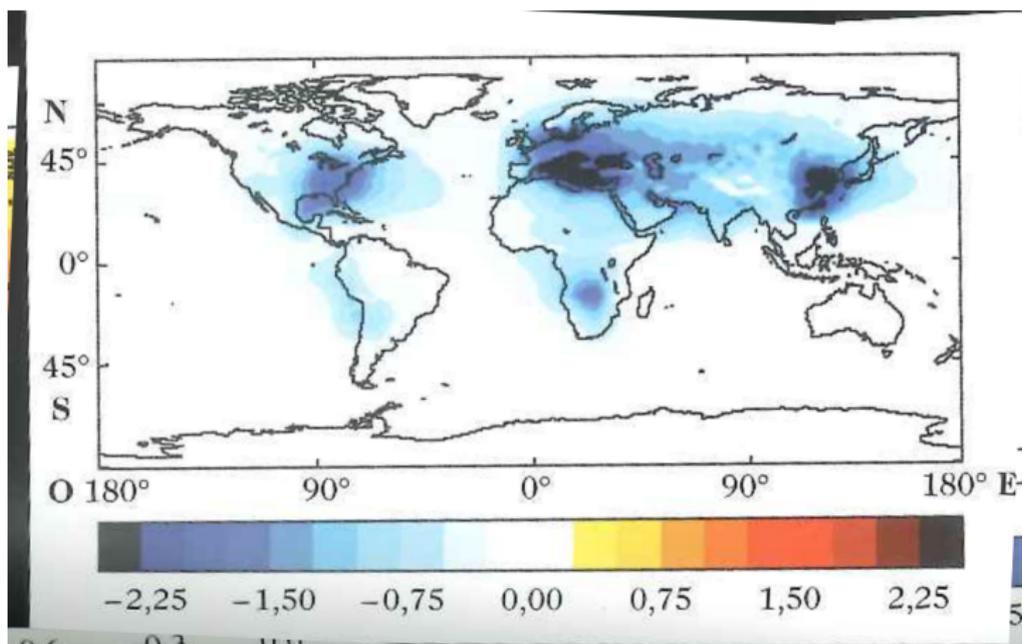


Forçage radiatif depuis le début de l'ère industriel dû au CO_2 , au CH_4 et aux halogènes [Physique-Chimie de l'atmosphère].

Effet du CO_2 , au CH_4 et aux halogène

Augmentation de l'effet de serre!

- └ Modélisation des climats futurs de la Terre
 - └ Modélisation des paramètres d'entrées des modèles

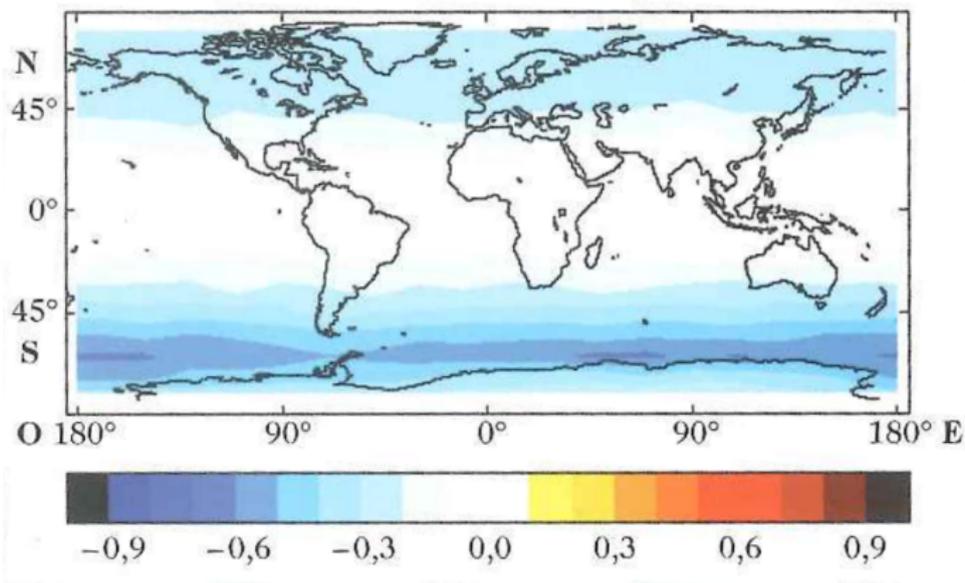


Forçage radiatif depuis le début de l'ère industriel dû aux sulfates.

Effet des sulfates

Diminution de l'effet de serre

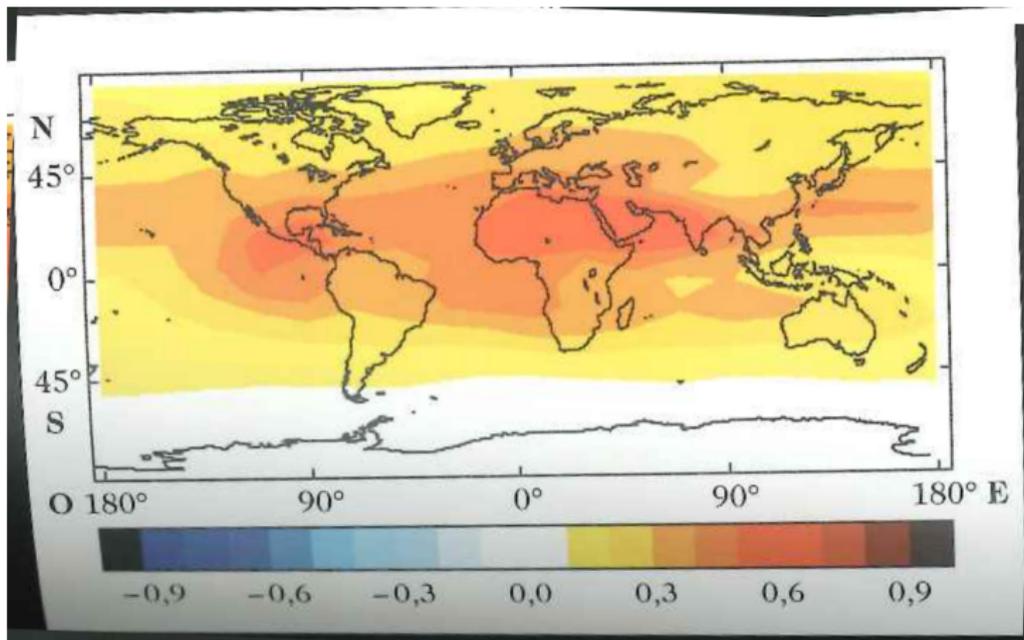
- └ Modélisation des climats futurs de la Terre
 - └ Modélisation des paramètres d'entrées des modèles



Forçage radiatif depuis le début de l'ère industriel dû à l'ozone stratosphérique.

Effet de l'ozone stratosphérique

Diminution de l'effet de serre



Forçage radiatif depuis le début de l'ère industriel dû à l'ozone troposphérique.

Effet de l'ozone troposphérique

Augmentation de l'effet de serre!

Gaz favorisant l'effet de serre

Gaz carbonique

Ozone troposphérique

Gaz contrariant l'effet de serre

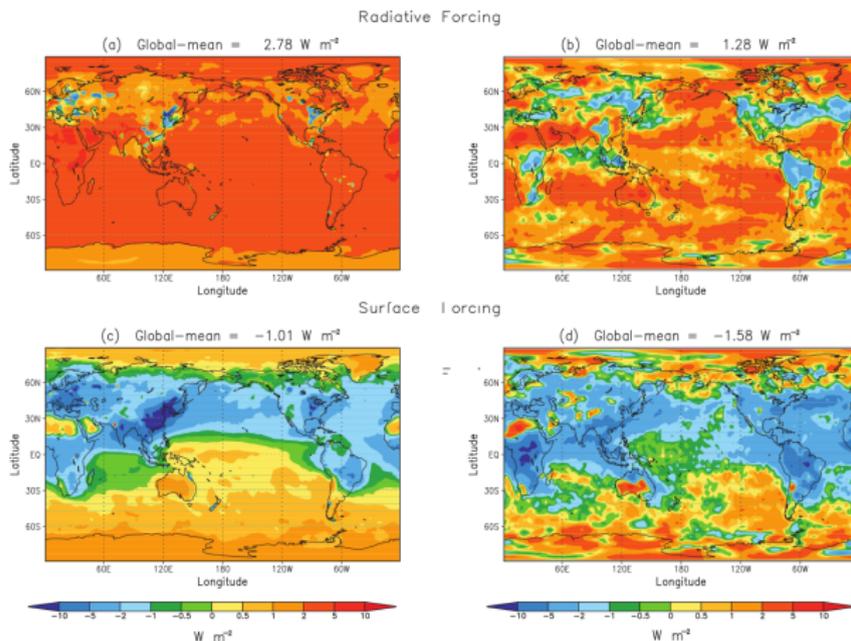
Sulfates

Ozone stratosphérique

Donc

Nécessité de prendre en compte les différentes espèces chimiques

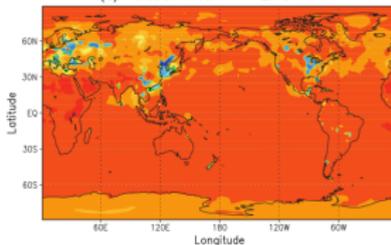
Nécessité d'intégrer les modèles sur toute la colonne d'atmosphère



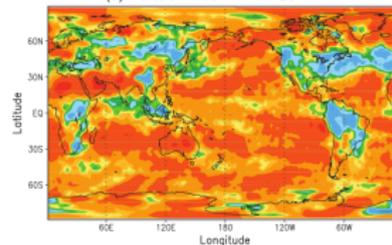
Deux modélisations de l'effet de l'augmentation des gaz à effet de serre sur le forçage radiatif au niveau de la troposphère (radiative forcing) et au niveau du sol (surface forcing) [IPCC 2017, chap 5]

Radiative Forcing

(a) Global-mean = 2.78 W m^{-2}

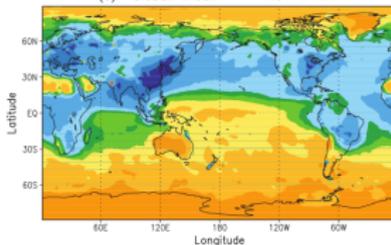


(b) Global-mean = 1.28 W m^{-2}

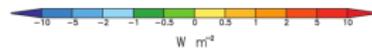
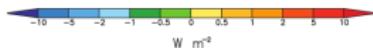
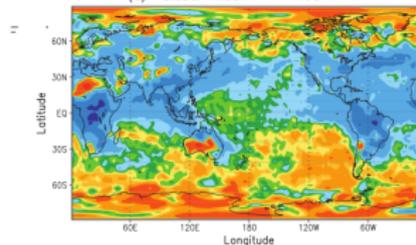


Surface Forcing

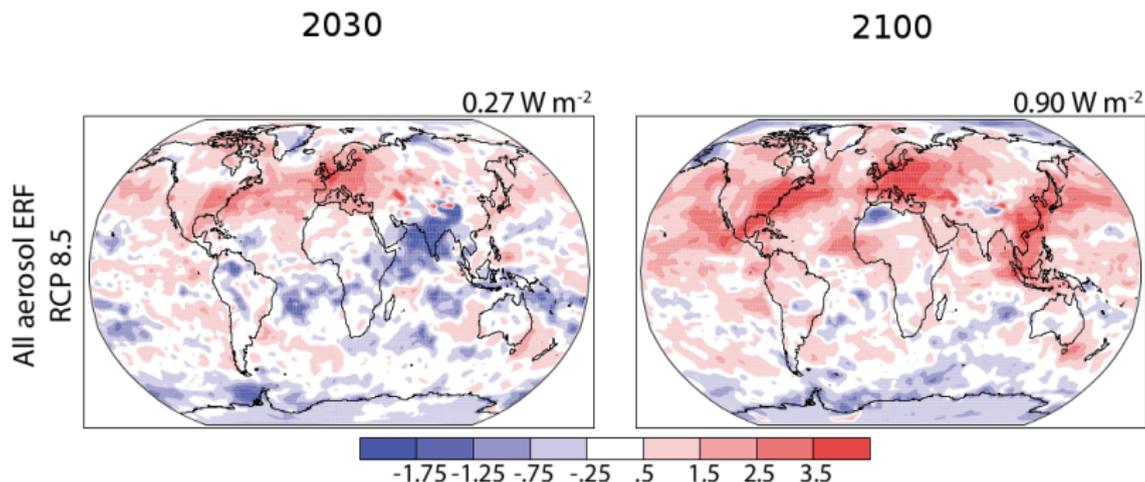
(c) Global-mean = -1.01 W m^{-2}



(d) Global-mean = -1.58 W m^{-2}



Un forçage inégalement réparti

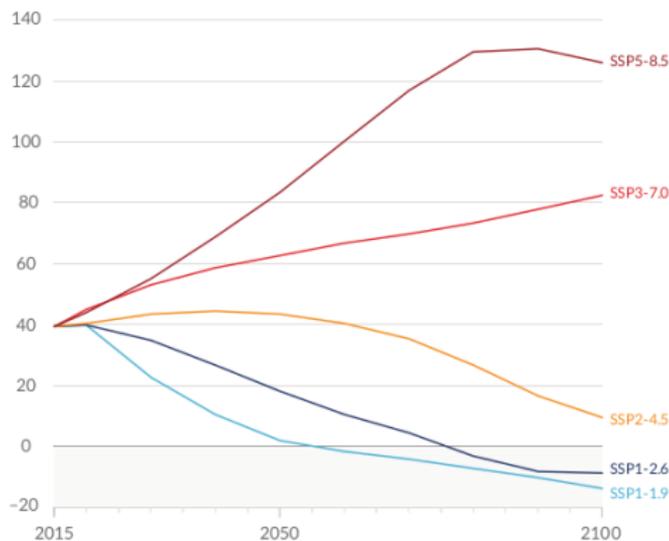
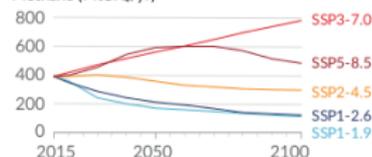
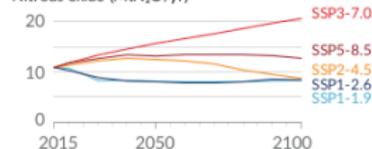


Évolution future du forçage radiatif terrestre [IPCC 2017, chap 5].

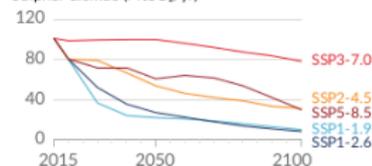
Zonation du forçage

Un forçage principalement concentré dans les régions tempérées!

- 1 Les bases de climatologie nécessaires à la compréhension des changements climatiques futures
- 2 Les instances internationales dédiées aux changements climatiques
- 3 Modélisation des climats futurs de la Terre
 - Observation du réchauffement climatique 1850-2022
 - **Modélisation des paramètres d'entrées des modèles**
 - Modélisation des réserves de la taille des réservoirs d'énergies non renouvelables
 - Etat actuelle de la consommation d'énergie dans le monde (rapport BP 2017)
 - Modélisations de l'émission de gaz à effet de serre
 - Gaz à effet de serre et forçage radiatif
 - **Les différents scénarios climatiques possibles**
 - Vérification de la qualité des modèles
 - Modélisation des paramètres climatiques futurs
 - Modélisation des climats régionaux futurs
 - Vers une augmentation de la température inédite à l'échelle des temps géologiques
- 4 Effets des changements climatiques
- 5 Changements climatiques et événements extrêmes

(a) Future annual emissions of CO₂ (left) and of a subset of key non-CO₂ drivers (right), across five illustrative scenariosCarbon dioxide (GtCO₂/yr)Selected contributors to non-CO₂ GHGsMethane (MtCH₄/yr)Nitrous oxide (MtN₂O/yr)

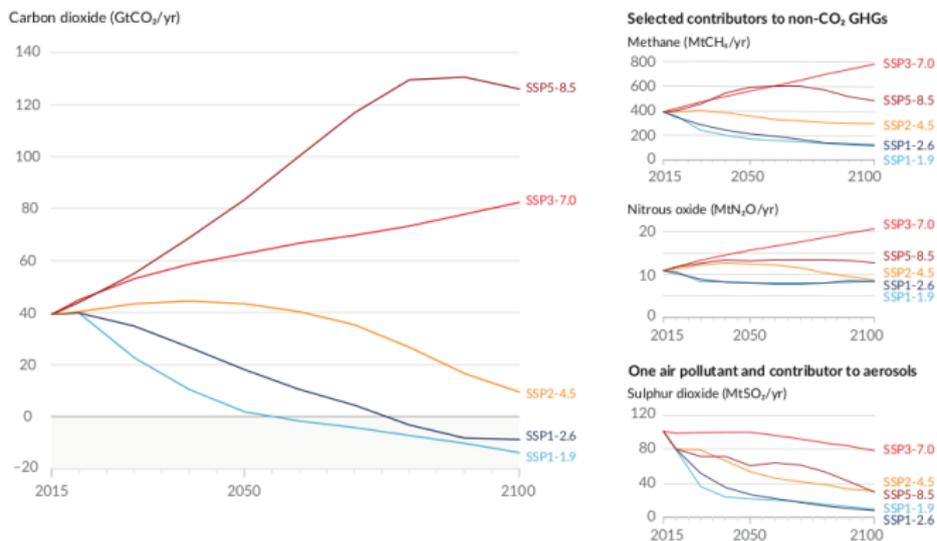
One air pollutant and contributor to aerosols

Sulphur dioxide (MtSO₂/yr)

Les différents scénarii d'émissions de GES (Masson-Delmotte et al., 2021(@))

SSP, RCP, késako! [ecologie.gouv.fr]

- SSP : SSP (*Shared Socioeconomic Pathways*) se différencient par divers aspects de développements socio-économiques et diverses stratégies d'adaptation et d'atténuation
- RCP : *Representative Concentration Pathways* = profils représentatifs d'évolution de concentration de GES

(a) Future annual emissions of CO₂ (left) and of a subset of key non-CO₂ drivers (right), across five illustrative scenarios

Les différents scénarii d'émissions de GES (Masson-Delmotte et al., 2021(@))

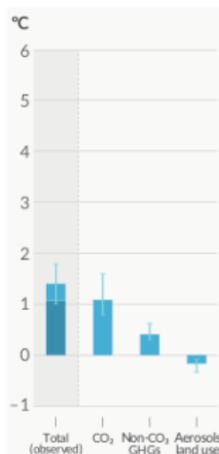
Les différents scénario RCP [statistiques-developpement] et [ecologie.gouv.fr]

Le chiffre correspond au forçage radiatif en $W.m^{-2}$

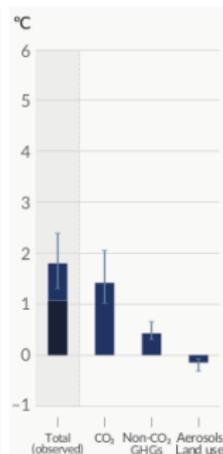
(b) Contribution to global surface temperature increase from different emissions, with a dominant role of CO₂ emissions

Change in global surface temperature in 2081–2100 relative to 1850–1900 (°C)

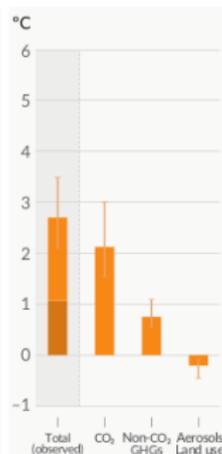
SSP1-1.9



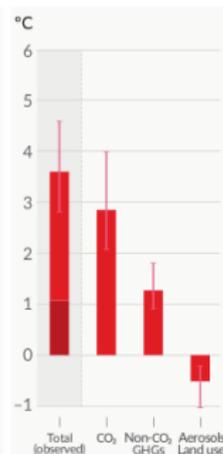
SSP1-2.6



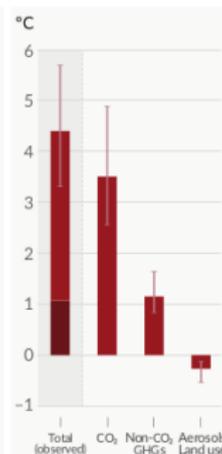
SSP2-4.5



SSP3-7.0

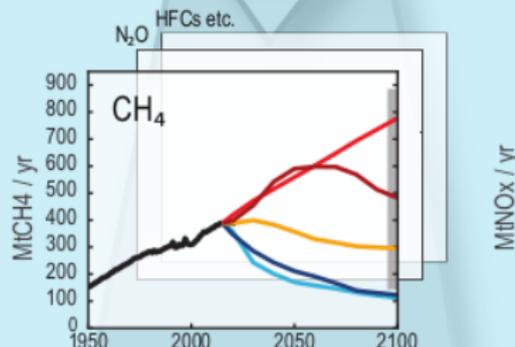
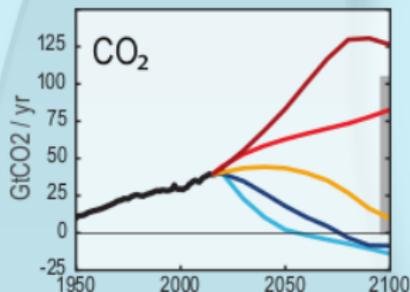


SSP5-8.5

Total warming (observed warming to date in darker shade), warming from CO₂, warming from non-CO₂ GHGs and cooling from changes in aerosols and land use

Les différents scénarii d'émissions de GES et leurs effets sur les températures mondiales (Masson-Delmotte et al., 2021(@))

Emissions



Legend:

Historical

SSP5-8.5

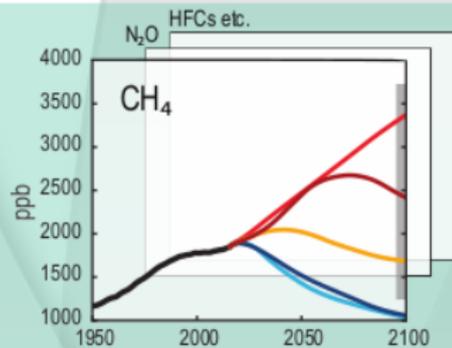
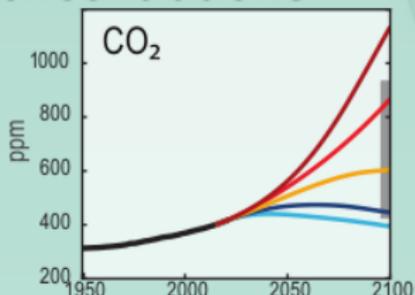
SSP3-7.0

SSP2-4.5

SSP1-2.6

SSP1-1.9

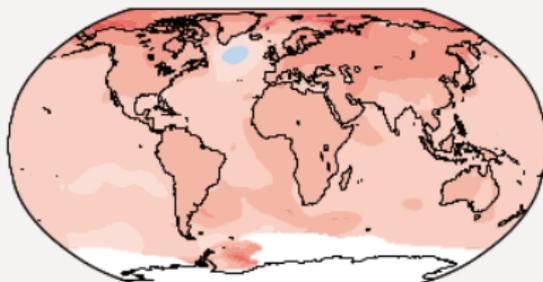
Concentrations



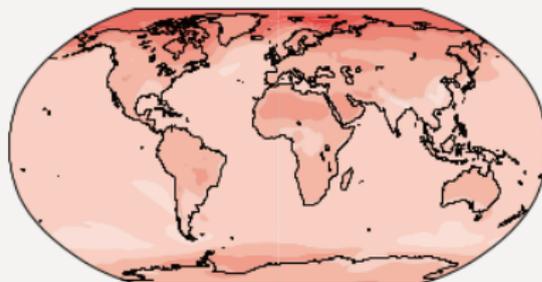
Evolution des concentrations de gaz émis en fonction de différents scénario (Masson-Delmotte et al., 2021(©))

- 1 Les bases de climatologie nécessaires à la compréhension des changements climatiques futures
- 2 Les instances internationales dédiées aux changements climatiques
- 3 Modélisation des climats futurs de la Terre
 - Observation du réchauffement climatique 1850-2022
 - Modélisation des paramètres d'entrées des modèles
 - **Vérification de la qualité des modèles**
 - Modélisation des paramètres climatiques futurs
 - Modélisation des climats régionaux futurs
 - Vers une augmentation de la température inédite à l'échelle des temps géologiques
- 4 Effets des changements climatiques
- 5 Changements climatiques et événements extrêmes
- 6 Les changements climatiques sont dû aux activités humaines

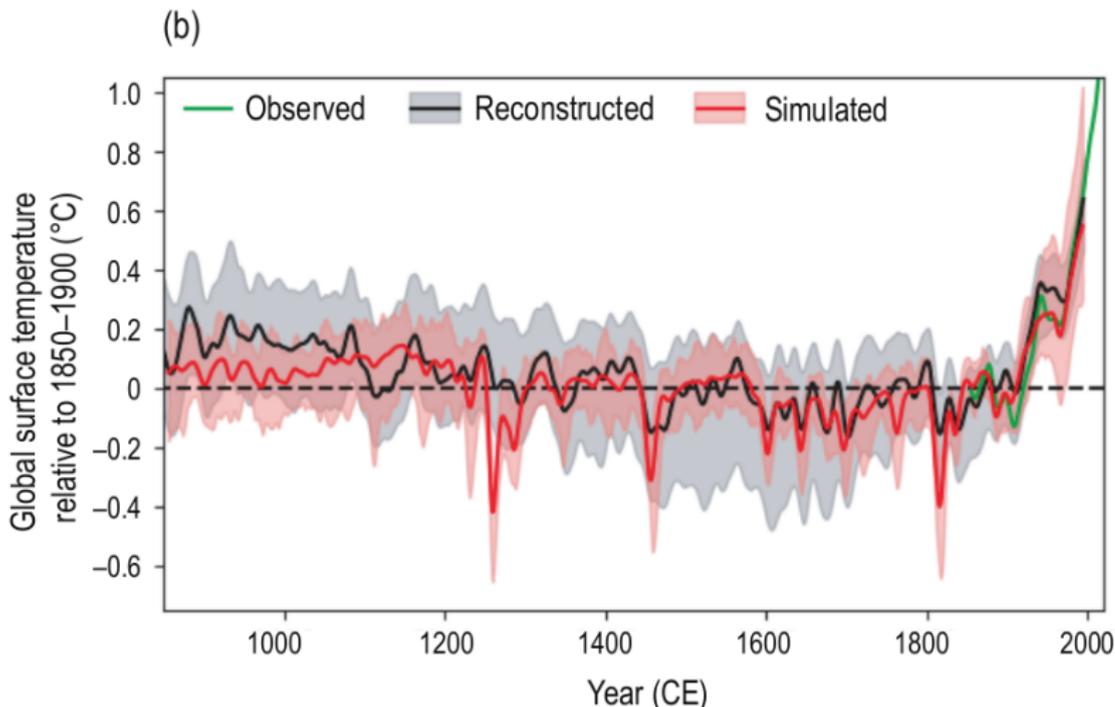
Observed change per 1°C global warming



Simulated change at 1°C global warming

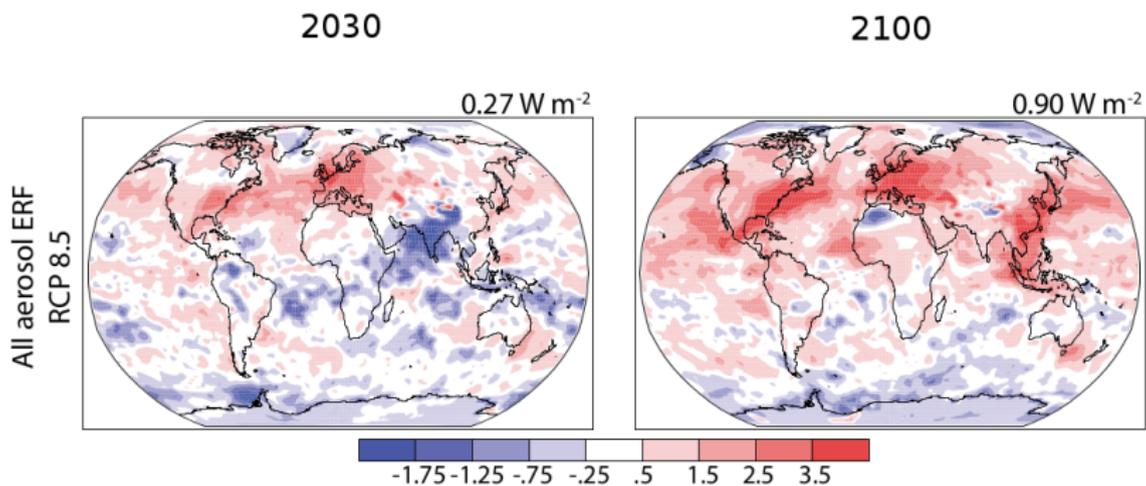


Comparaison de l'augmentation de température mesurée (gauche) et simulée (droite) (Masson-Delmotte et al., 2021(@))



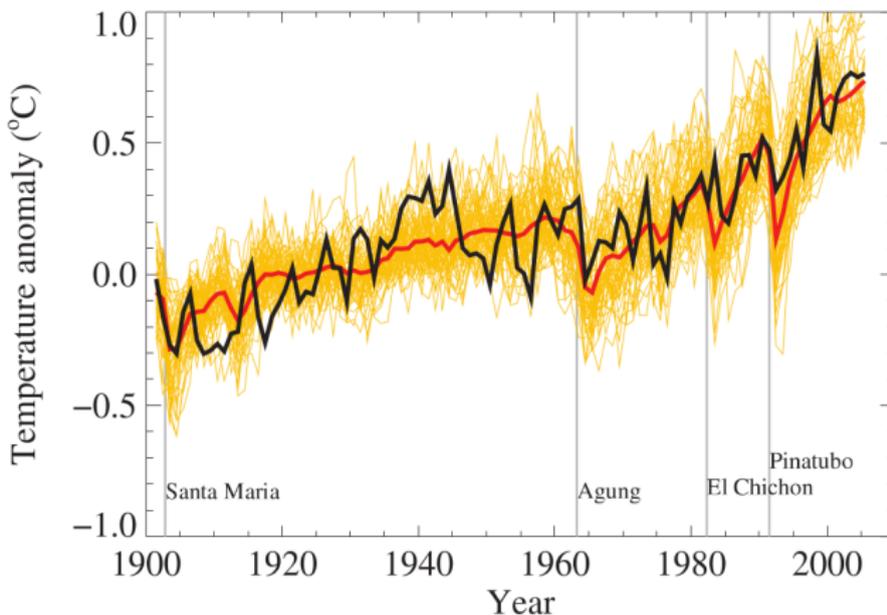
Comparaison des mesures de températures (vert), des reconstructions des températures et des températures simulées (Masson-Delmotte et al., 2021(©))

- 1 Les bases de climatologie nécessaires à la compréhension des changements climatiques futures
- 2 Les instances internationales dédiées aux changements climatiques
- 3 Modélisation des climats futurs de la Terre
 - Observation du réchauffement climatique 1850-2022
 - Modélisation des paramètres d'entrées des modèles
 - Vérification de la qualité des modèles
 - **Modélisation des paramètres climatiques futurs**
 - Modélisation des climats régionaux futurs
 - Vers une augmentation de la température inédite à l'échelle des temps géologiques
- 4 Effets des changements climatiques
- 5 Changements climatiques et événements extrêmes
- 6 Les changements climatiques sont dû aux activités humaines

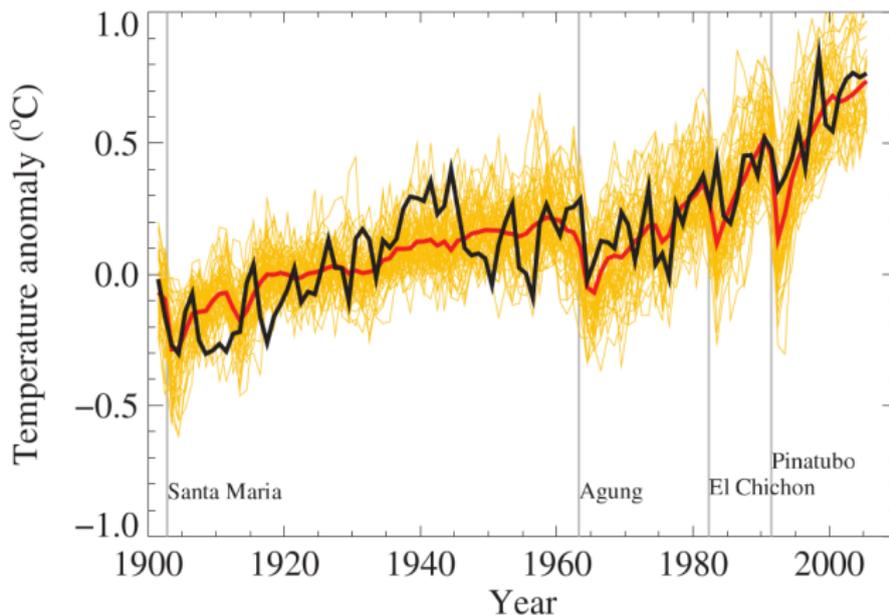


Évolution future du forçage radiatif terrestre [IPCC 2017, chap 5].

Utilisons ces données pour modéliser les climats futurs!

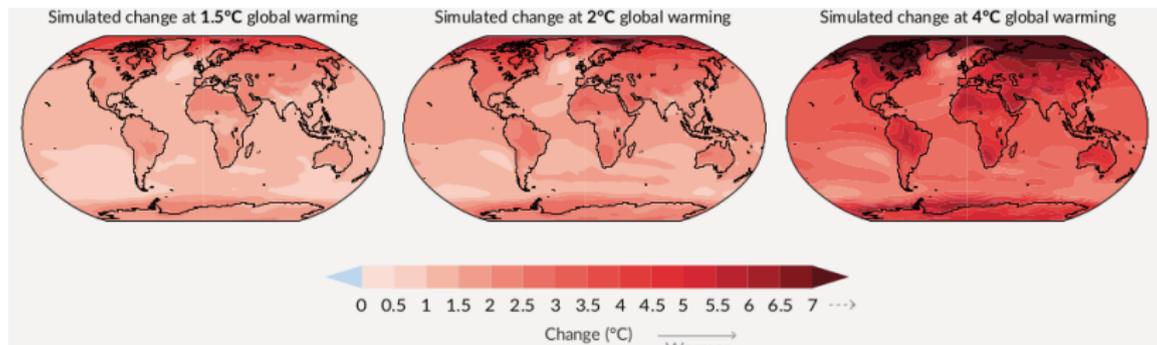


Évolution de la température globale mesurée au cours du dernier siècle (ligne rouge) et calculée à partir de 58 simulations (ligne jaune, moyenne en noire) [IPCC 2017, chap 5]

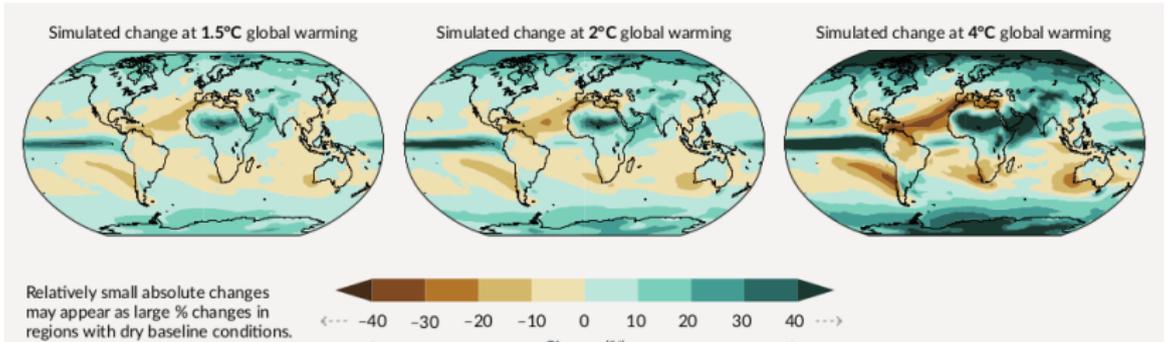


Évaluation des modèles

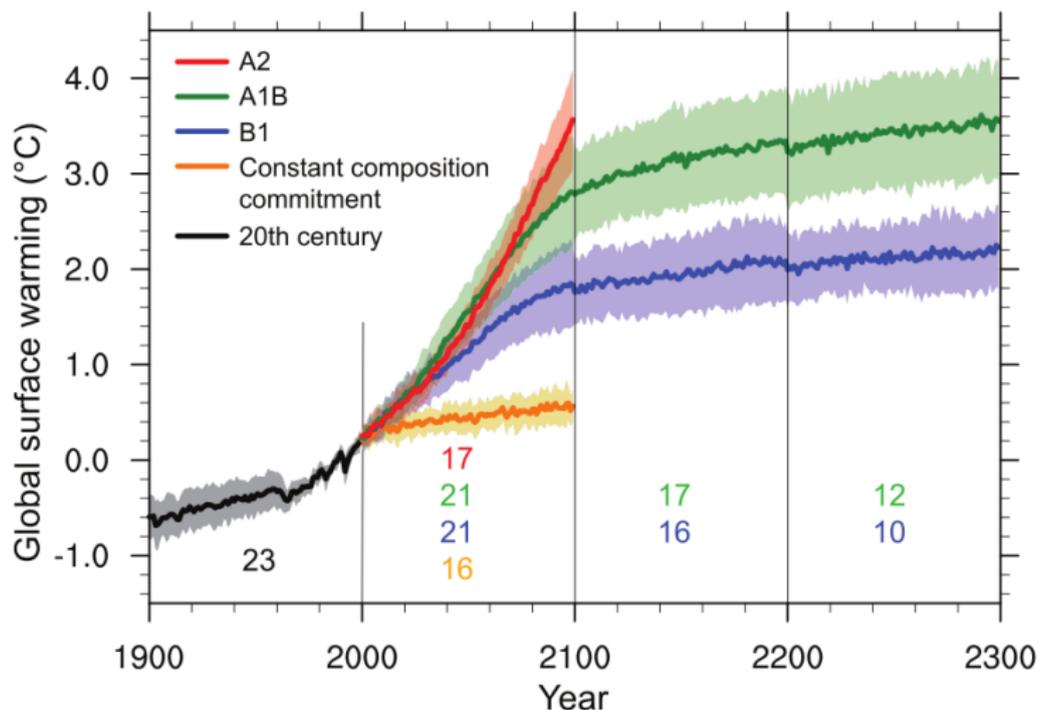
Une fois que les modèles reproduisent les valeurs historiques, ils peuvent être utilisés pour simuler le climat futur



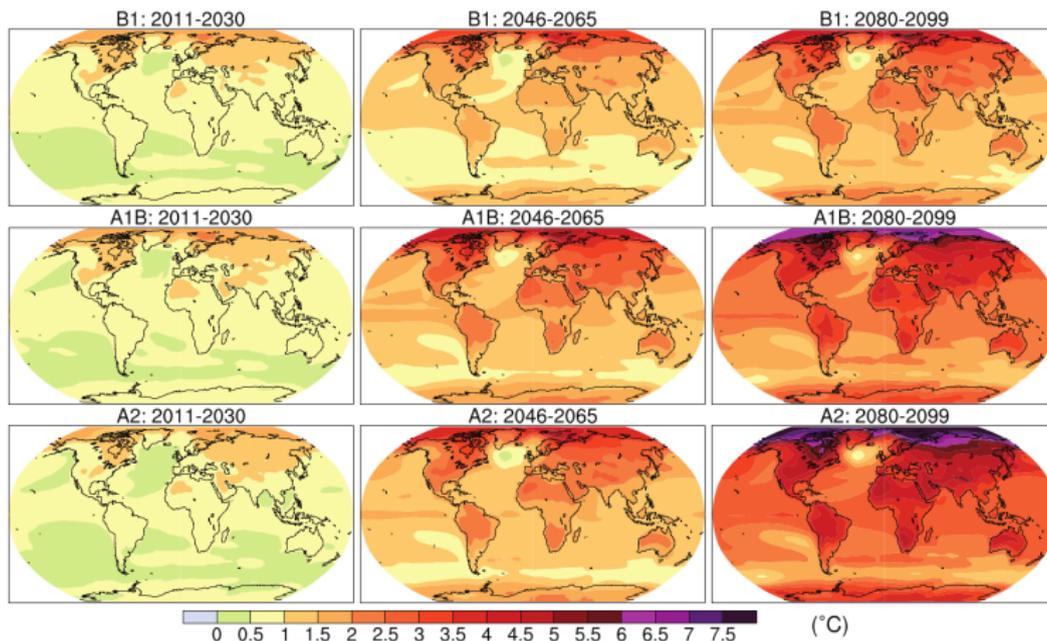
Modélisation des températures mondiales pour trois scénarios de réchauffement (Masson-Delmotte et al., 2021(©))



Modélisation de l'évolution des précipitations mondiales dans 3 scénario de réchauffement (Masson-Delmotte et al., 2021(@))



Modélisation des températures moyennes futures prenant en compte le forçage anthropique [IPCC 2017, chap.10]



Modélisation des températures futures en fonction de la latitude [IPCC 2017, chap.10]

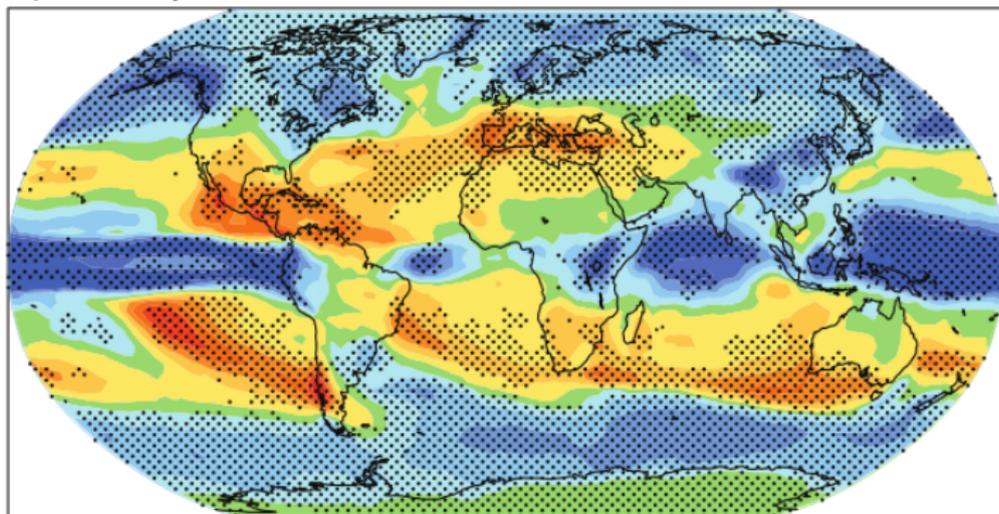
Effet du réchauffement

Vers un réchauffement massif des régions polaires!



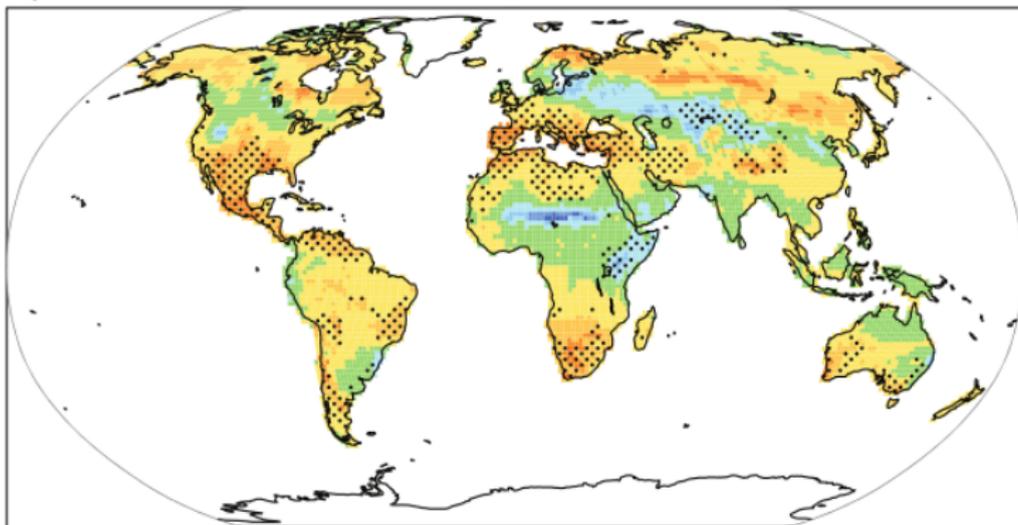
Modélisation des autres paramètres climatiques

a) Précipitation



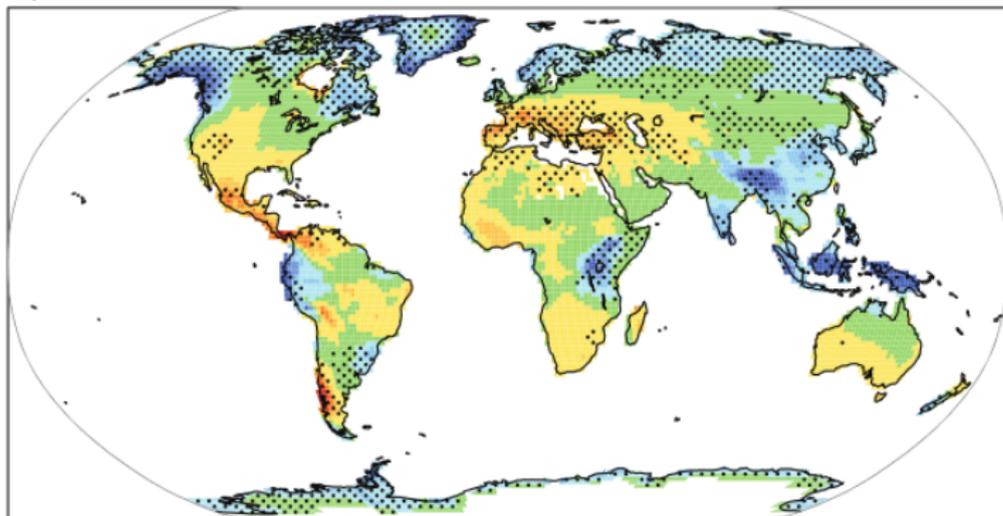
Modélisation de l'humidité des sols pour la période 2089-2099 comparée à la période 1989-1999 [IPCC 2017, chap.10]. On observe une aridification des zones méditerranéennes

b) Soil moisture



Modélisation de l'humidité des sols pour la période 2089-2099 comparée à la période 1989-1999 [IPCC 2017, chap.10]. On observe une augmentation de l'humidité des sols saharien.

c) Runoff



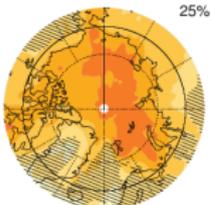
Modélisation de l'érosion pour la période 2089-2099 comparée à la période 1989-1999 [IPCC 2017, chap.10] . On observe une augmentation de l'érosion Himalayenne.

- 1 Les bases de climatologie nécessaires à la compréhension des changements climatiques futures
- 2 Les instances internationales dédiées aux changements climatiques
- 3 Modélisation des climats futurs de la Terre
 - Observation du réchauffement climatique 1850-2022
 - Modélisation des paramètres d'entrées des modèles
 - Vérification de la qualité des modèles
 - Modélisation des paramètres climatiques futurs
 - **Modélisation des climats régionaux futurs**
 - Modélisation du climat futur au pôle Nord
 - Modélisation du climat futur Européen
 - Modélisation du climat futur français
 - Vers une augmentation de la température inédite à l'échelle des temps géologiques
- 4 Effets des changements climatiques
- 5 Changements climatiques et événements extrêmes
- 6 Les changements climatiques sont dû aux activités humaines

- 1 Les bases de climatologie nécessaires à la compréhension des changements climatiques futures
- 2 Les instances internationales dédiées aux changements climatiques
- 3 Modélisation des climats futurs de la Terre
 - Observation du réchauffement climatique 1850-2022
 - Modélisation des paramètres d'entrées des modèles
 - Vérification de la qualité des modèles
 - Modélisation des paramètres climatiques futurs
 - **Modélisation des climats régionaux futurs**
 - **Modélisation du climat futur au pôle Nord**
 - Modélisation du climat futur Européen
 - Modélisation du climat futur français
 - Vers une augmentation de la température inédite à l'échelle des temps géologiques
- 4 Effets des changements climatiques
- 5 Changements climatiques et événements extrêmes
- 6 Les changements climatiques sont dû aux activités humaines

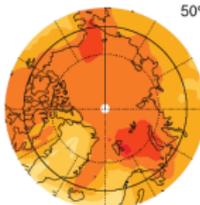


Temperature change RCP4.5 in 2016-2035: December-February



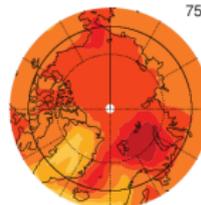
25%

Temperature change RCP4.5 in 2016-2035: December-February



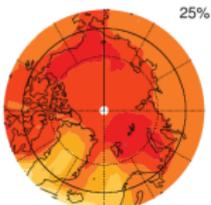
50%

Temperature change RCP4.5 in 2016-2035: December-February



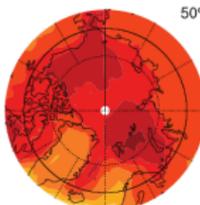
75%

Temperature change RCP4.5 in 2046-2065: December-February



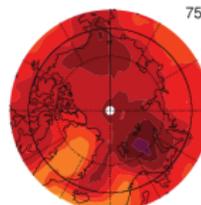
25%

Temperature change RCP4.5 in 2046-2065: December-February



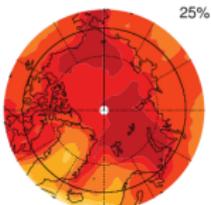
50%

Temperature change RCP4.5 in 2046-2065: December-February



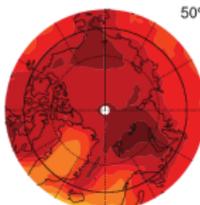
75%

Temperature change RCP4.5 in 2081-2100: December-February



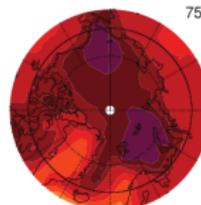
25%

Temperature change RCP4.5 in 2081-2100: December-February



50%

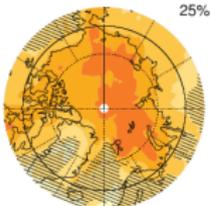
Temperature change RCP4.5 in 2081-2100: December-February



75%

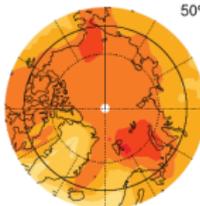
Évolution des températures au pôle Nord au cours du prochain siècle. Le pourcentage correspond au pourcentage cumulé de simulation ayant donné ces résultats (e.g : 50% : médiane de l'ensemble des simulations) [IPCC 2013, Annex 1]

Temperature change RCP4.5 in 2016-2035: December-February



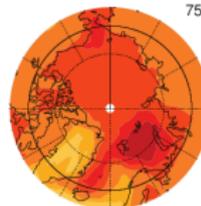
25%

Temperature change RCP4.5 in 2016-2035: December-February



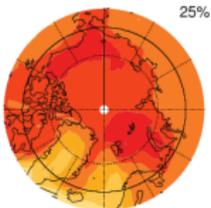
50%

Temperature change RCP4.5 in 2016-2035: December-February



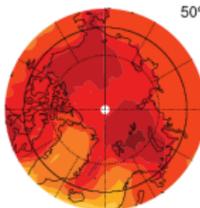
75%

Temperature change RCP4.5 in 2046-2065: December-February



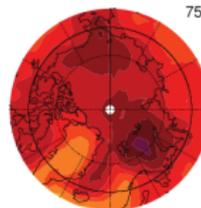
25%

Temperature change RCP4.5 in 2046-2065: December-February



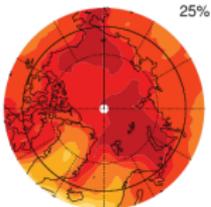
50%

Temperature change RCP4.5 in 2046-2065: December-February



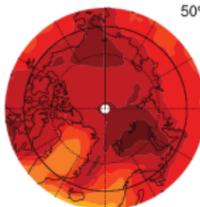
75%

Temperature change RCP4.5 in 2081-2100: December-February



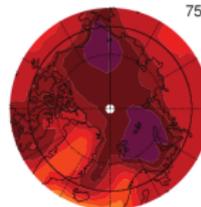
25%

Temperature change RCP4.5 in 2081-2100: December-February



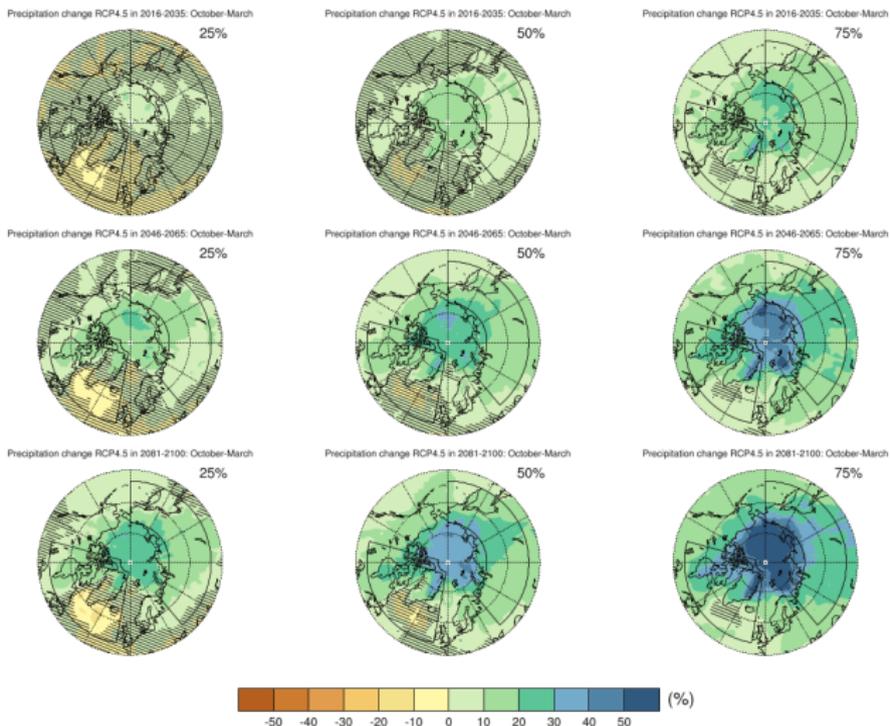
50%

Temperature change RCP4.5 in 2081-2100: December-February

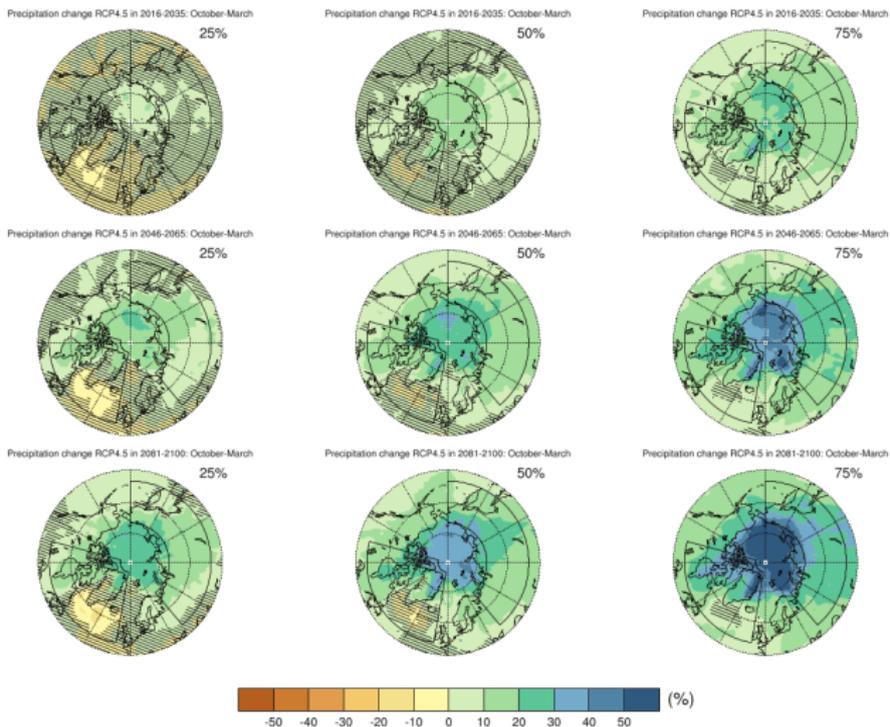


75%

Vers une très forte augmentation des températures aux pôles!

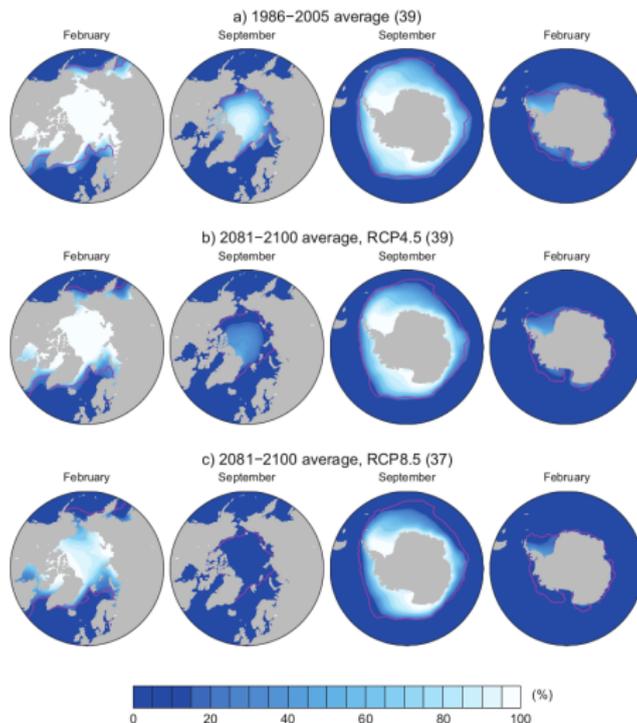


Modélisation des précipitations futurs au pôle Nord lors des mois de janvier à mars [IPCC 2013, Annex 1]

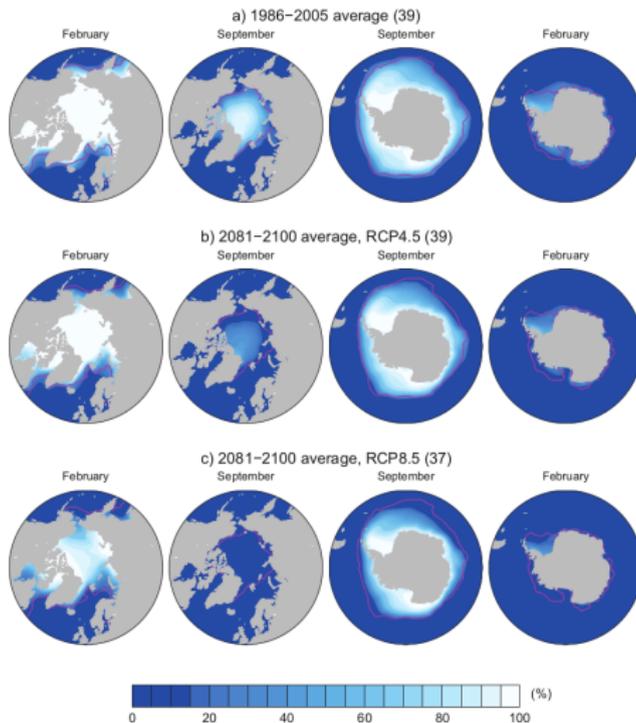


Vers une augmentation des précipitations hivernales

Qu'en est-t-il de la dynamique de la calotte et de la banquise?



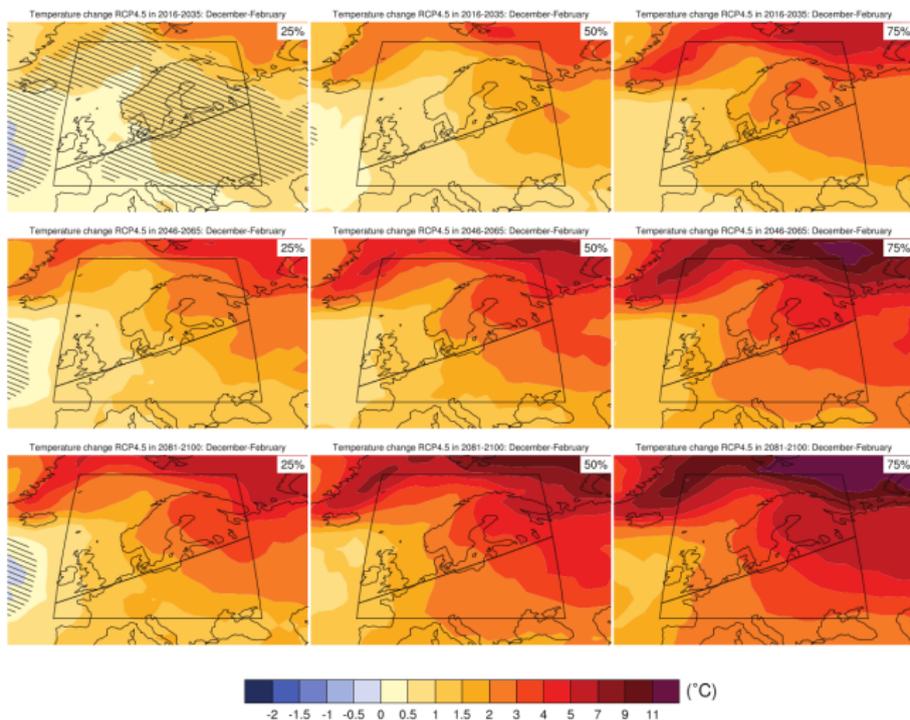
Évolution de la taille des banquises Nord et Sud au cours du prochain siècle selon deux modèles RCP [IPCC 2013, Chap 10].



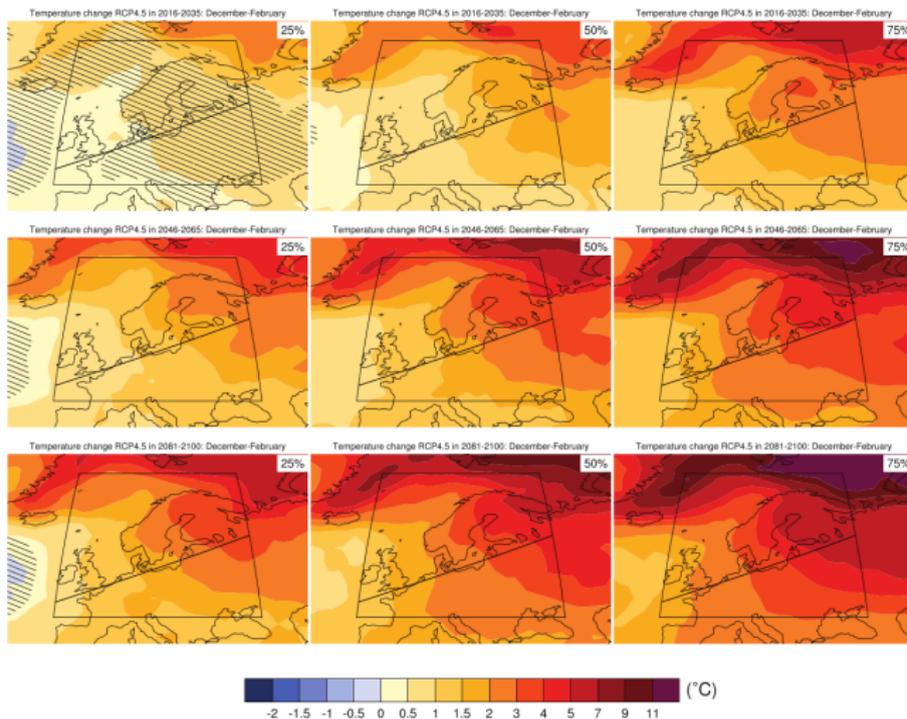
Vers une fonte des glaces polaires!

- 1 Les bases de climatologie nécessaires à la compréhension des changements climatiques futures
- 2 Les instances internationales dédiées aux changements climatiques
- 3 Modélisation des climats futurs de la Terre
 - Observation du réchauffement climatique 1850-2022
 - Modélisation des paramètres d'entrées des modèles
 - Vérification de la qualité des modèles
 - Modélisation des paramètres climatiques futurs
 - **Modélisation des climats régionaux futurs**
 - Modélisation du climat futur au pôle Nord
 - **Modélisation du climat futur Européen**
 - Modélisation du climat futur français
 - Vers une augmentation de la température inédite à l'échelle des temps géologiques
- 4 Effets des changements climatiques
- 5 Changements climatiques et événements extrêmes
- 6 Les changements climatiques sont dû aux activités humaines

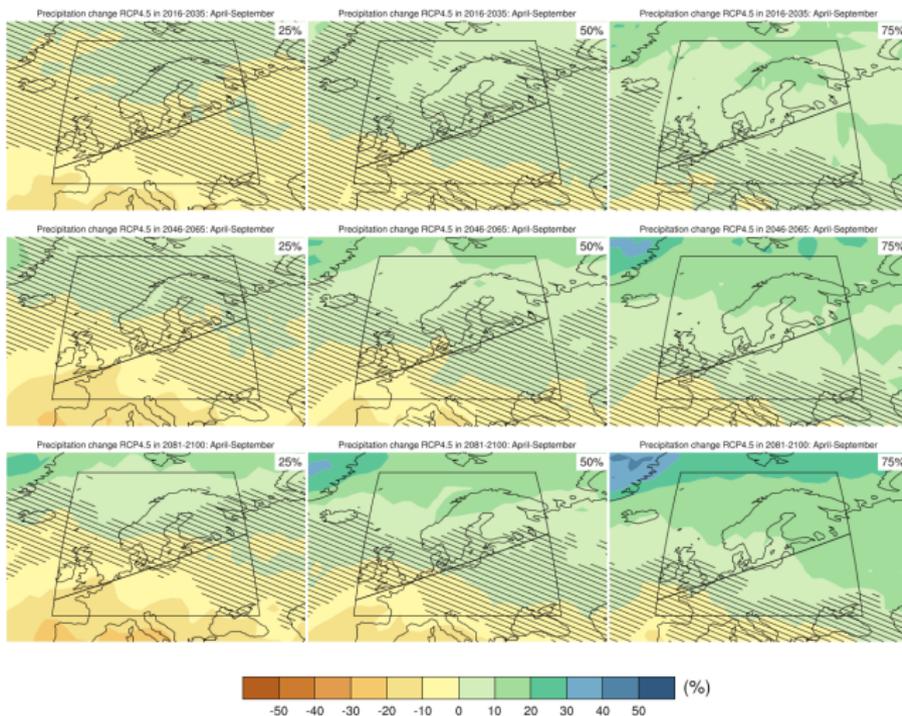




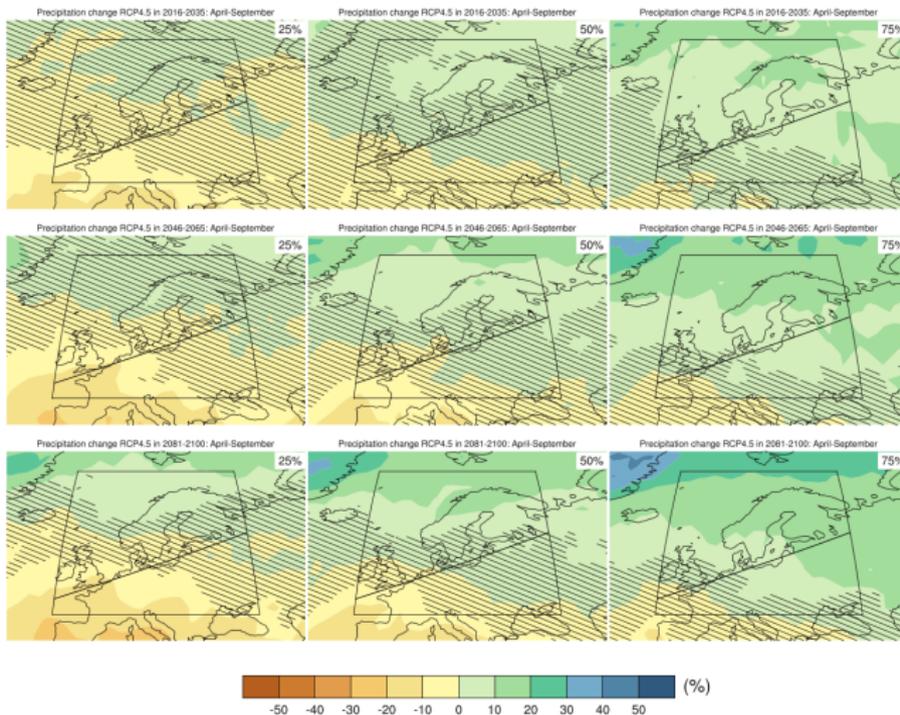
Évolution des températures européennes au cours du prochain siècle [IPCC 2013, Annex 1]



Un réchauffement moindre aux basses latitudes!



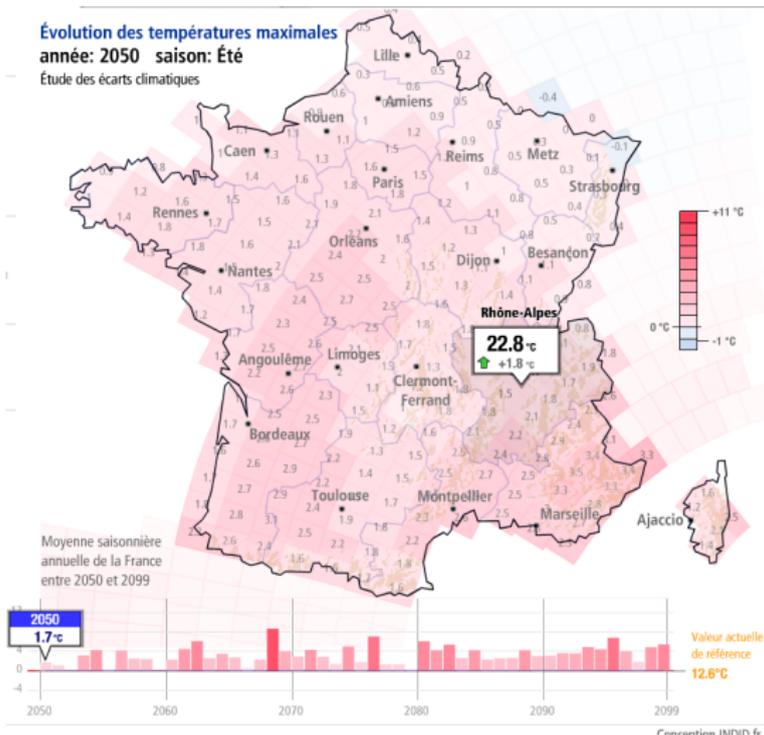
Modélisation des précipitations estivales futures sur le continent européen [IPCC 2013, Annex 1]



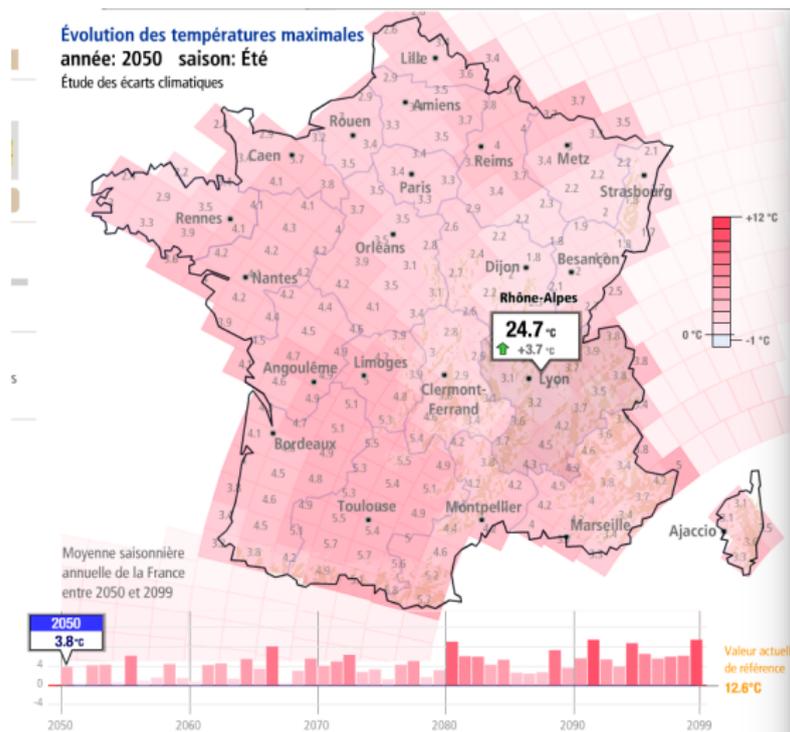
Vers une aridification estivale!

- 1 Les bases de climatologie nécessaires à la compréhension des changements climatiques futures
- 2 Les instances internationales dédiées aux changements climatiques
- 3 Modélisation des climats futurs de la Terre
 - Observation du réchauffement climatique 1850-2022
 - Modélisation des paramètres d'entrées des modèles
 - Vérification de la qualité des modèles
 - Modélisation des paramètres climatiques futurs
 - **Modélisation des climats régionaux futurs**
 - Modélisation du climat futur au pôle Nord
 - Modélisation du climat futur Européen
 - **Modélisation du climat futur français**
 - Vers une augmentation de la température inédite à l'échelle des temps géologiques
- 4 Effets des changements climatiques
- 5 Changements climatiques et événements extrêmes
- 6 Les changements climatiques sont dû aux activités humaines





Écart de température par rapport à la moyenne des températures actuelles durant l'été 2050. Le scénario choisit est un scénario de faibles émissions [Science et vie.com].

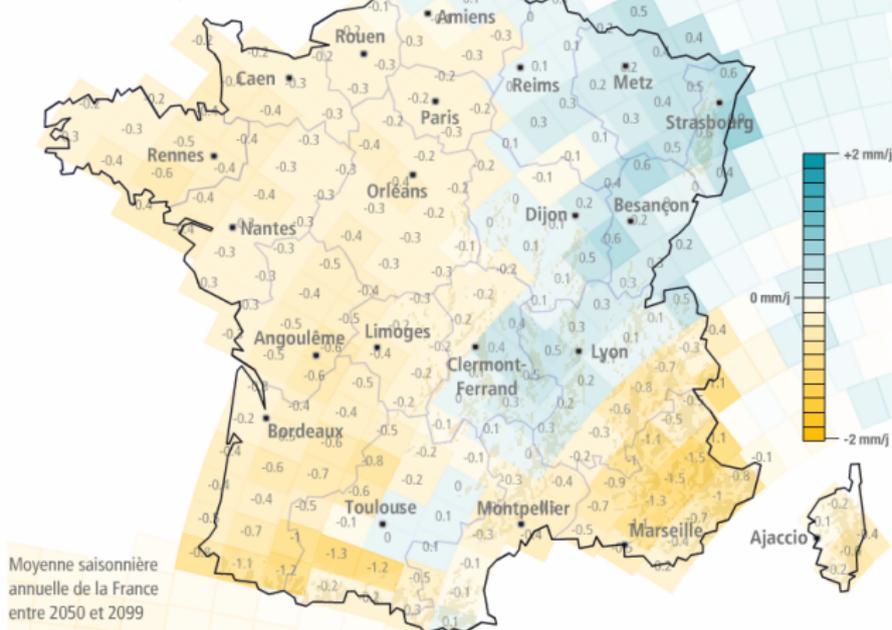


Écart de température par rapport à la moyenne des températures actuelles durant l'été 2050. Le scénario choisi est un scénario de fortes émissions [Science et vie.com].

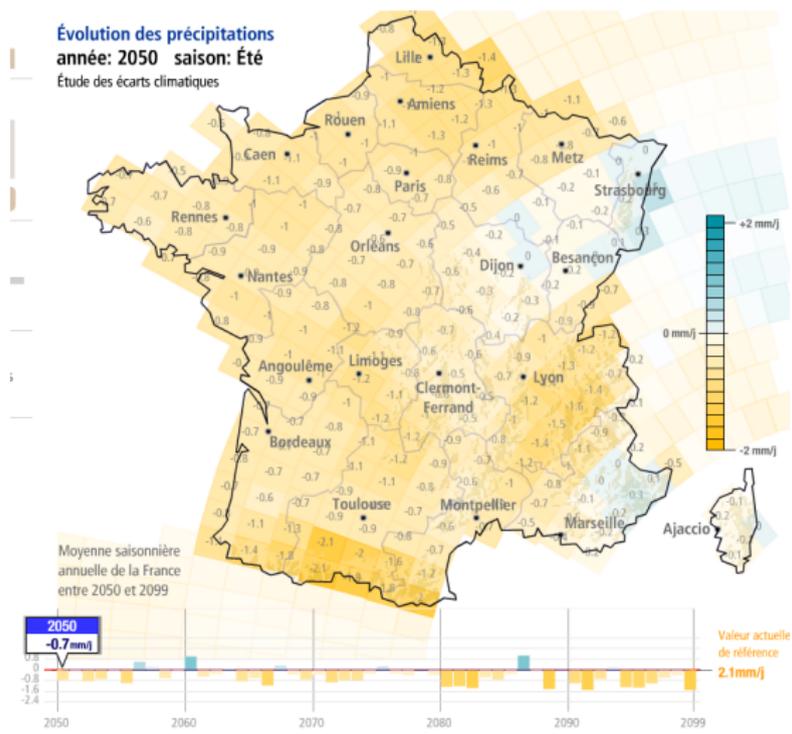
Évolution des précipitations

année: 2050 saison: Été

Étude des écarts climatiques



Écart de précipitation par rapport à la moyenne des températures actuelles durant l'été 2050. Le scénario choisit est un scénario de basses émissions [Science et vie.com].

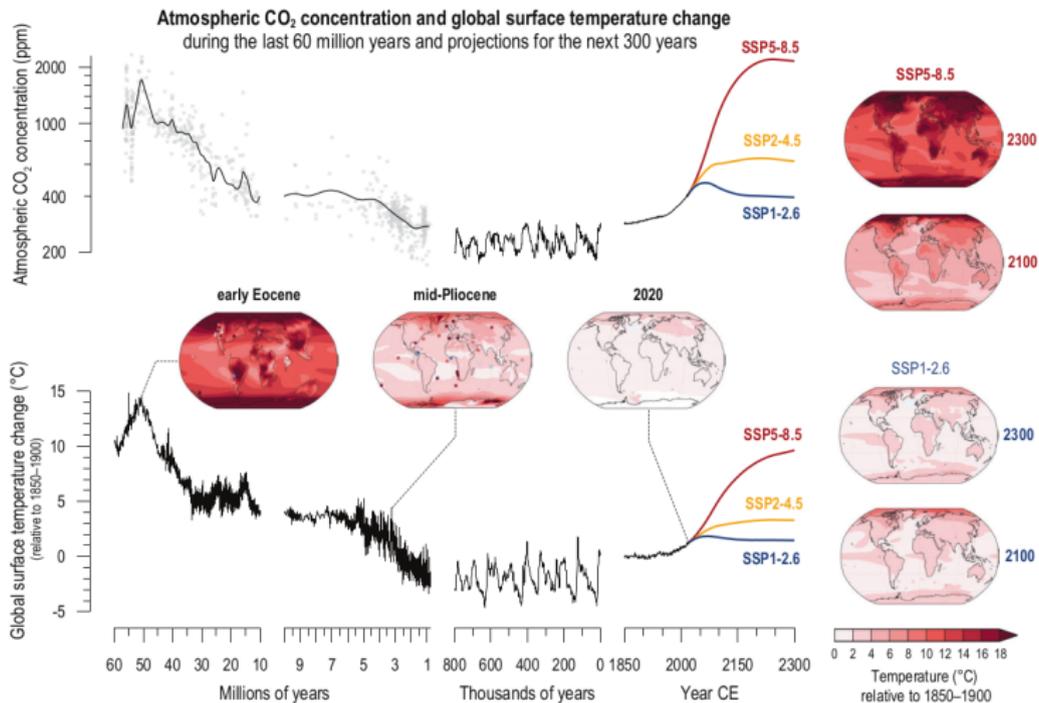


Écart de précipitation par rapport à la moyenne des températures actuelles durant l'été 2050. Le scénario choisies est un scénario de fortes émissions [Science et vie.com].

Résumé

Vers un réchauffement et une aridification des régions méditerranéennes!

- 1 Les bases de climatologie nécessaires à la compréhension des changements climatiques futures
- 2 Les instances internationales dédiées aux changements climatiques
- 3 Modélisation des climats futurs de la Terre
 - Observation du réchauffement climatique 1850-2022
 - Modélisation des paramètres d'entrées des modèles
 - Vérification de la qualité des modèles
 - Modélisation des paramètres climatiques futurs
 - Modélisation des climats régionaux futurs
 - Vers une augmentation de la température inédite à l'échelle des temps géologiques
- 4 Effets des changements climatiques
- 5 Changements climatiques et événements extrêmes
- 6 Les changements climatiques sont dû aux activités humaines



Comparaison de l'évolution des taux de CO₂ et des températures futures (horizon 2300) et passée depuis 60 millions d'années

Quelques calculs de vitesse

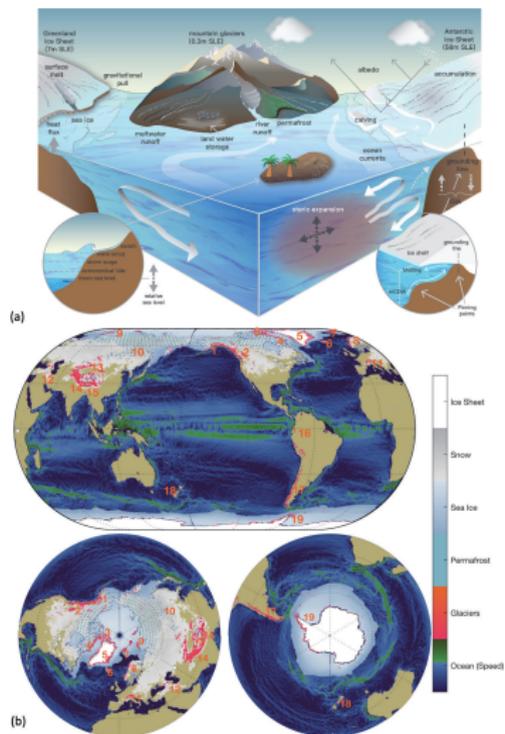
▣ Variation du taux de CO₂

- Depuis 50 Myr : $\frac{2600-270}{5000000} = 0,000466$ ppm/10 ans
- Entre 1850 et 2300 (Scénario RCP 1-2.6) : $\frac{370-270}{35} = 0.29$ ppm/10 ans (600 fois plus rapide)
- Entre 1850 et 2300 (Scénario RCP 2-4.6) : $\frac{600-270}{35} = 9.42$ ppm/10 ans (20 000 fois plus rapide)
- Entre 1850 et 2300 (Scénario RCP 5-8.5) : $\frac{2000-270}{35} = 49.4$ ppm/10 ans (100 000 fois plus rapide)

Quelques calculs de vitesse

- Variation de la température moyenne mondiale
 - Depuis 50 Myr : $\frac{14}{5000000} = 0,0000028 \text{ °/10 ans}$
 - Depuis 5 Myr : $\frac{5}{500000} = 0,00001 \text{ °/10 ans}$
 - Entre 1850 et 2300 (Scénario RCP 1-2.6) : $\frac{1\text{ou}2.6}{35} = 0.29\text{ou}0.74 \text{ °/10 ans}$ (10 000 à 23 000 fois plus rapide)
 - Entre 1850 et 2300 (Scénario RCP 2-4.6) : $\frac{2\text{ou}4.6}{35} = 0.06\text{ou}0.13 \text{ °/10 ans}$ (20 000 à 43 000 fois plus rapide)
 - Entre 1850 et 2300 (Scénario RCP 5-8.5) : $\frac{5\text{ou}8.5}{35} = 0.14\text{ou}0.24 \text{ °/10 ans}$ (46 000 à 80 000 fois plus rapide)

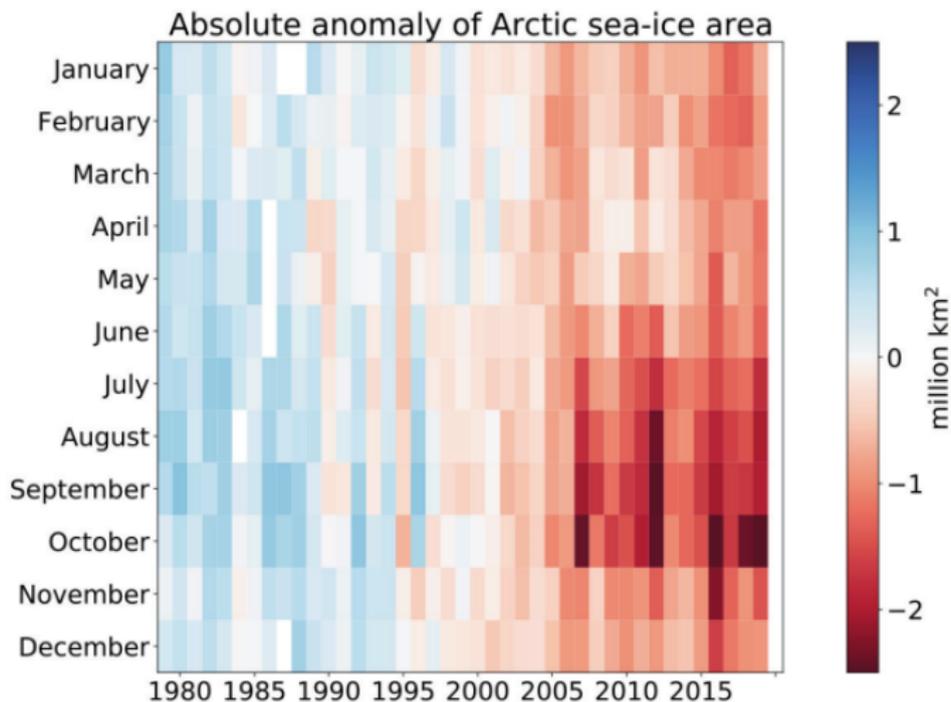
- 1 Les bases de climatologie nécessaires à la compréhension des changements climatiques futures
- 2 Les instances internationales dédiées aux changements climatiques
- 3 Modélisation des climats futurs de la Terre
- 4 Effets des changements climatiques**
- 5 Changements climatiques et événements extrêmes
- 6 Les changements climatiques sont dû aux activités humaines



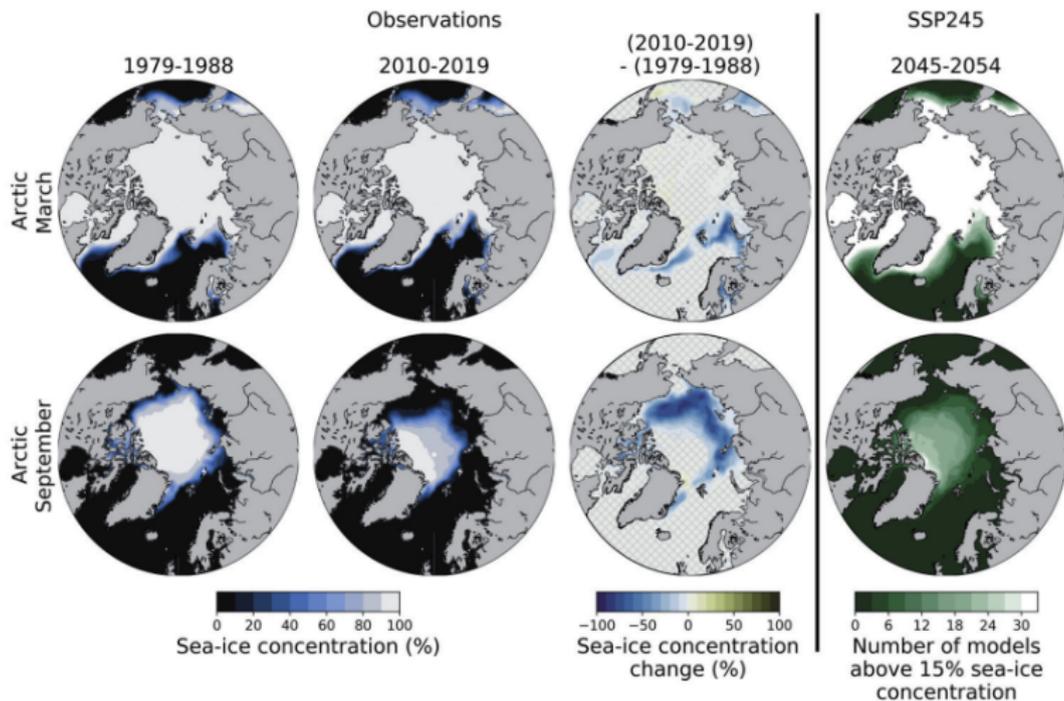
Elements de la cryosphère et de l'hydrosphère (Masson-Delmotte et al., 2021(©))

- 1 Les bases de climatologie nécessaires à la compréhension des changements climatiques futures
- 2 Les instances internationales dédiées aux changements climatiques
- 3 Modélisation des climats futurs de la Terre
- 4 Effets des changements climatiques
 - Effets des changements climatiques sur la cryosphère
 - Vers une diminution/disparition de la banquise arctique et antarctique
 - Fonte rapide des calottes arctiques et antarctiques
 - Vers une fonte des glaciers mondiaux
 - Effets des changements climatiques sur l'hydrosphère
 - Résumé des changements climatiques probables
- 5 Changements climatiques et événements extrêmes
- 6 Les changements climatiques sont dû aux activités humaines

- 1 Les bases de climatologie nécessaires à la compréhension des changements climatiques futures
- 2 Les instances internationales dédiées aux changements climatiques
- 3 Modélisation des climats futurs de la Terre
- 4 Effets des changements climatiques
 - Effets des changements climatiques sur la cryosphère
 - Vers une diminution/disparition de la banquise arctique et antarctique
 - Fonte rapide des calottes arctiques et antarctiques
 - Vers une fonte des glaciers mondiaux
 - Effets des changements climatiques sur l'hydrosphère
 - Résumé des changements climatiques probables
- 5 Changements climatiques et événements extrêmes
- 6 Les changements climatiques sont dû aux activités humaines

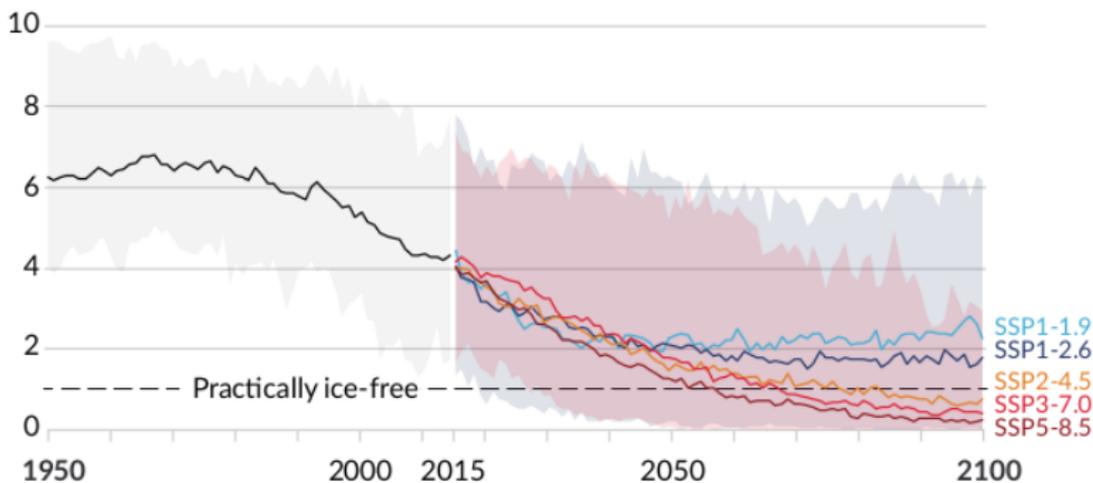


Observation de la taille de la calotte polaire (1980-2020)
(Masson-Delmotte et al., 2021(©))

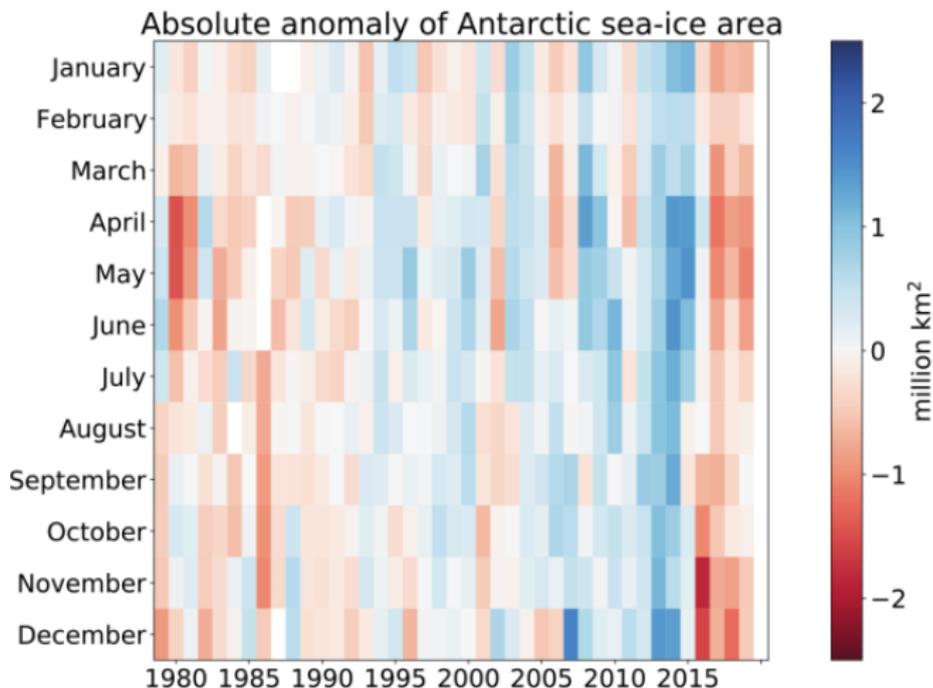


**Evolution passée (gauche) et future de la banquise Arctique
(Masson-Delmotte et al., 2021(©))**

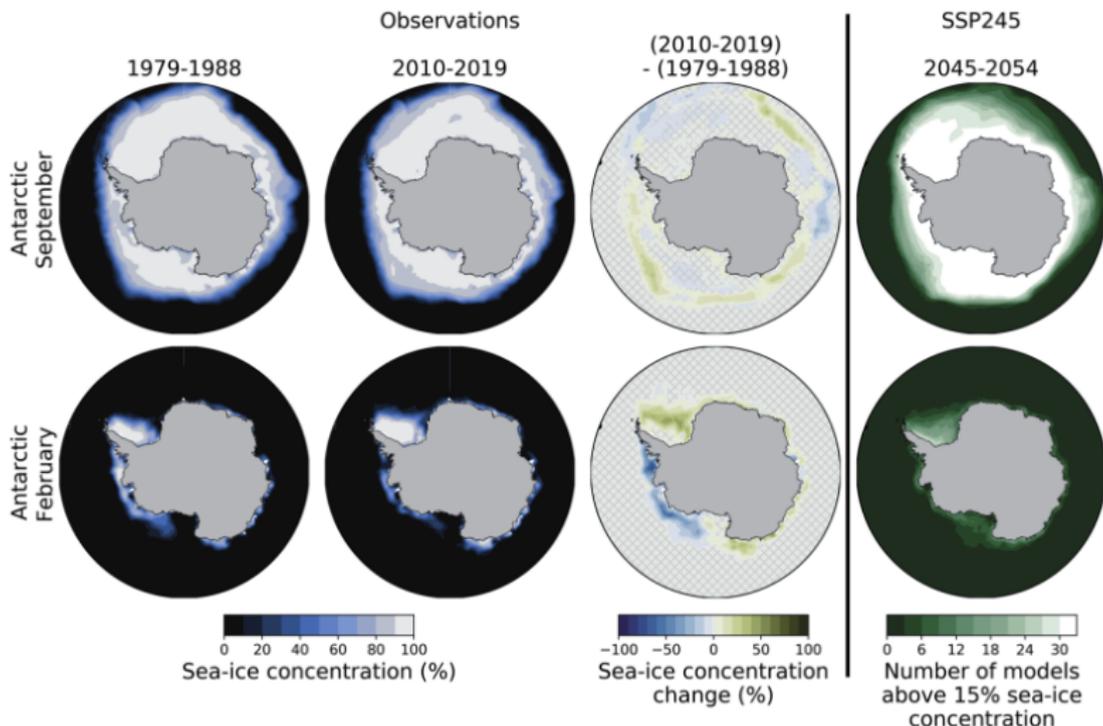
(b) September Arctic sea ice area

 10^6 km^2 

Evolution de la taille de la calotte arctique pour les différents scénarios de réchauffement (Masson-Delmotte et al., 2021(@))

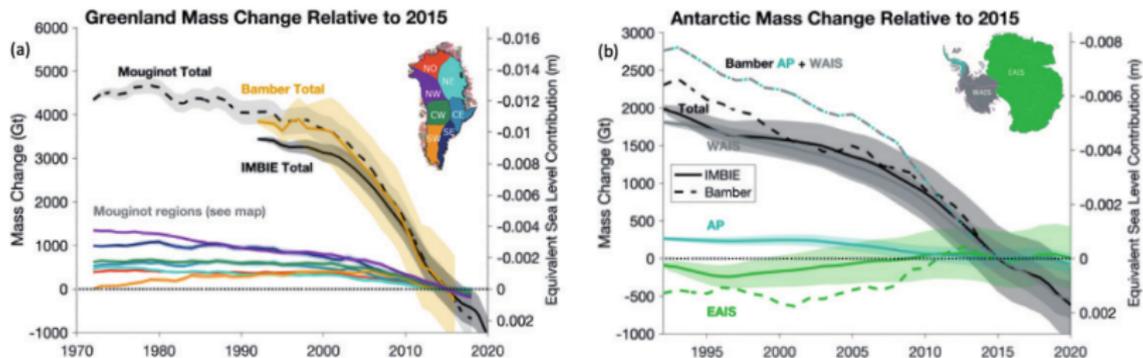


**Observation de la taille de la calotte antarctique (1980-2020)
(Masson-Delmotte et al., 2021(©))**



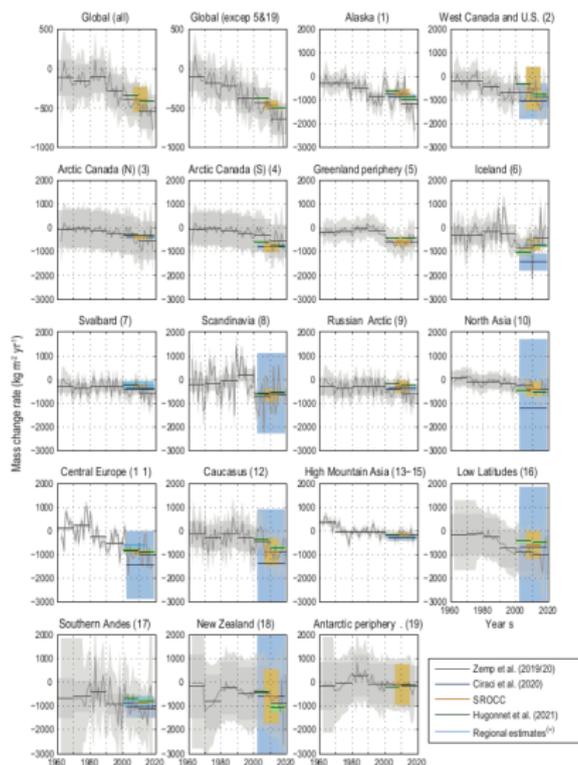
**Evolution passée (gauche) et future de la banquise Antarctique
(Masson-Delmotte et al., 2021(©))**

- 1 Les bases de climatologie nécessaires à la compréhension des changements climatiques futures
- 2 Les instances internationales dédiées aux changements climatiques
- 3 Modélisation des climats futurs de la Terre
- 4 Effets des changements climatiques
 - Effets des changements climatiques sur la cryosphère
 - Vers une diminution/disparition de la banquise arctique et antarctique
 - **Fonte rapide des calottes arctiques et antarctiques**
 - Vers une fonte des glaciers mondiaux
 - Effets des changements climatiques sur l'hydrosphère
 - Résumé des changements climatiques probables
- 5 Changements climatiques et événements extrêmes
- 6 Les changements climatiques sont dû aux activités humaines

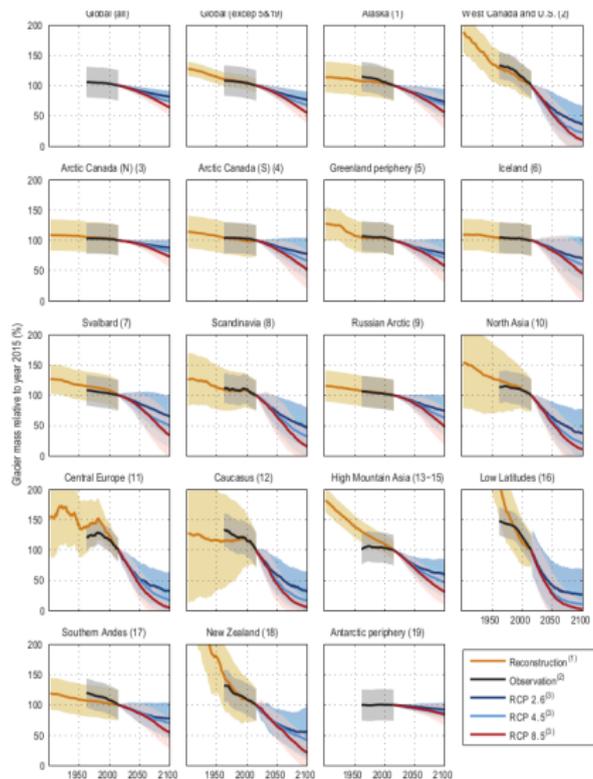


Observation de la fonte des calottes arctiques (gauche) et antarctiques (Masson-Delmotte et al., 2021(©))

- 1 Les bases de climatologie nécessaires à la compréhension des changements climatiques futures
- 2 Les instances internationales dédiées aux changements climatiques
- 3 Modélisation des climats futurs de la Terre
- 4 Effets des changements climatiques
 - Effets des changements climatiques sur la cryosphère
 - Vers une diminution/disparition de la banquise arctique et antarctique
 - Fonte rapide des calottes arctiques et antarctiques
 - **Vers une fonte des glaciers mondiaux**
 - Effets des changements climatiques sur l'hydrosphère
 - Résumé des changements climatiques probables
- 5 Changements climatiques et événements extrêmes
- 6 Les changements climatiques sont dû aux activités humaines



**Evolution de la taille des glaciers pour différentes régions du globe
(Masson-Delmotte et al., 2021(@))**

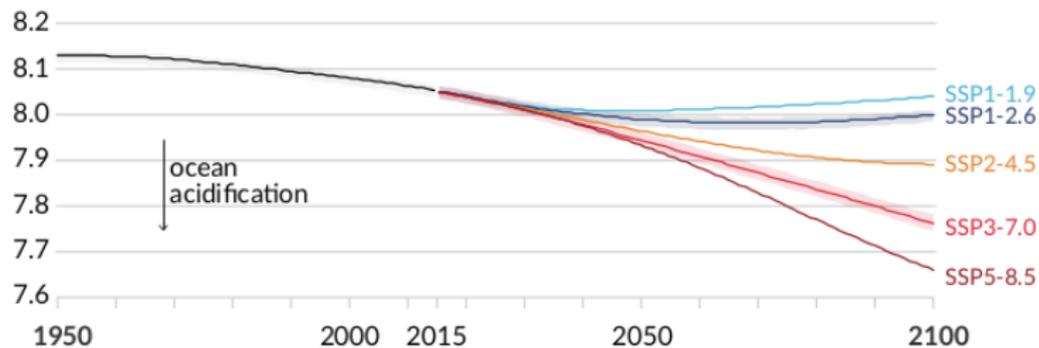


Evolution future de la taille des glaciers pour différentes régions du globe et différents scénario

- 1 Les bases de climatologie nécessaires à la compréhension des changements climatiques futures
- 2 Les instances internationales dédiées aux changements climatiques
- 3 Modélisation des climats futurs de la Terre
- 4 Effets des changements climatiques
 - Effets des changements climatiques sur la cryosphère
 - Effets des changements climatiques sur l'hydrosphère
 - Vers une acidification des océans
 - Vers une augmentation du niveau marin
 - Vers une augmentation des vagues de chaleur maritimes
 - Vers un ralentissement de la circulation océanique profonde
 - Résumé des changements climatiques probables
- 5 Changements climatiques et événements extrêmes
- 6 Les changements climatiques sont dû aux activités humaines

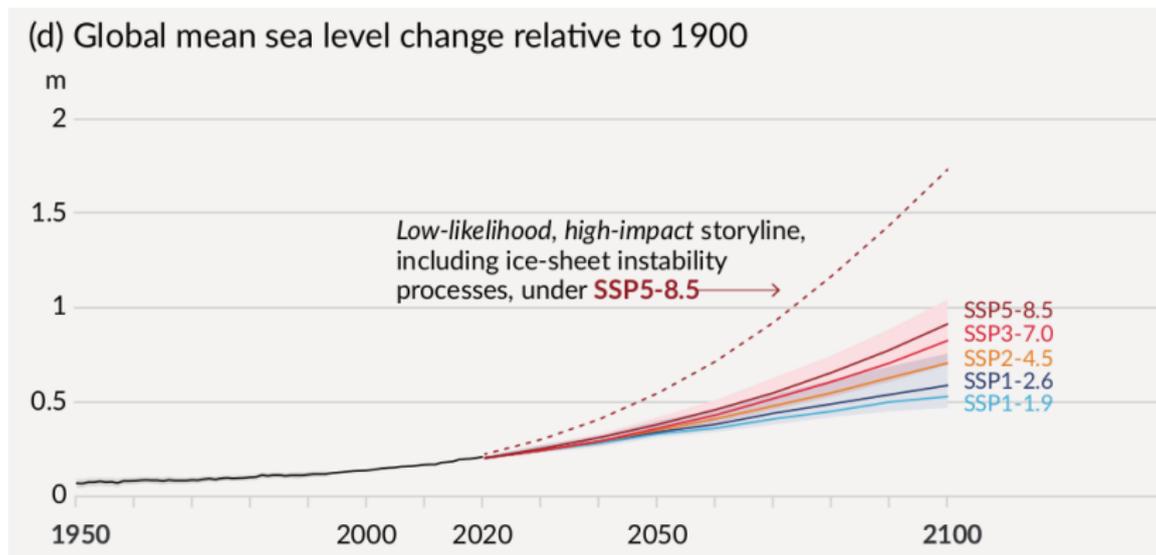
- 1 Les bases de climatologie nécessaires à la compréhension des changements climatiques futures
- 2 Les instances internationales dédiées aux changements climatiques
- 3 Modélisation des climats futurs de la Terre
- 4 Effets des changements climatiques
 - Effets des changements climatiques sur la cryosphère
 - Effets des changements climatiques sur l'hydrosphère
 - Vers une acidification des océans
 - Vers une augmentation du niveau marin
 - Vers une augmentation des vagues de chaleur maritimes
 - Vers un ralentissement de la circulation océanique profonde
 - Résumé des changements climatiques probables
- 5 Changements climatiques et événements extrêmes
- 6 Les changements climatiques sont dû aux activités humaines

(c) Global ocean surface pH (a measure of acidity)



Evolution du pH océanique en fonction des différents modèles climatiques (Masson-Delmotte et al., 2021(@))

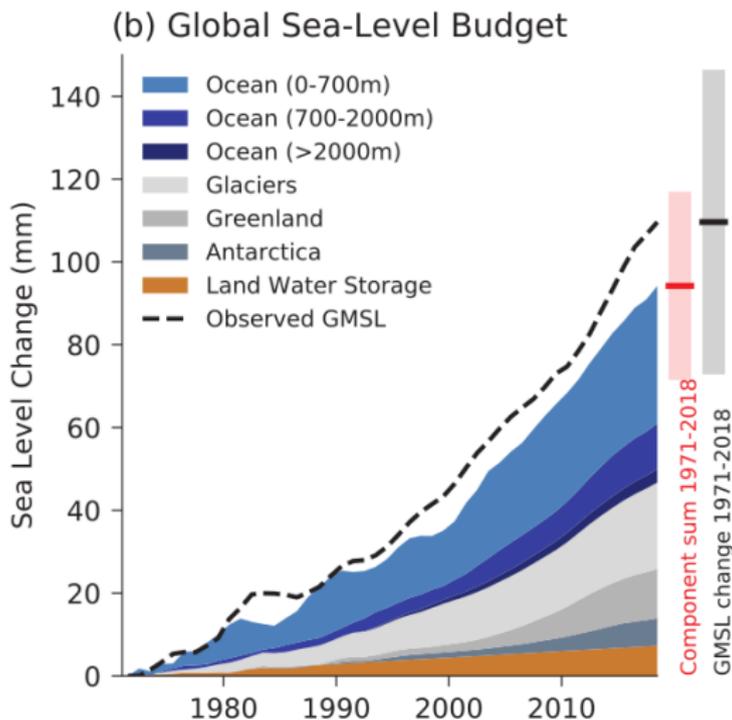
- 1 Les bases de climatologie nécessaires à la compréhension des changements climatiques futures
- 2 Les instances internationales dédiées aux changements climatiques
- 3 Modélisation des climats futurs de la Terre
- 4 Effets des changements climatiques
 - Effets des changements climatiques sur la cryosphère
 - Effets des changements climatiques sur l'hydrosphère
 - Vers une acidification des océans
 - Vers une augmentation du niveau marin
 - Vers une augmentation des vagues de chaleur maritimes
 - Vers un ralentissement de la circulation océanique profonde
 - Résumé des changements climatiques probables
- 5 Changements climatiques et événements extrêmes
- 6 Les changements climatiques sont dû aux activités humaines



Evolution du niveau de la mer à l'horizon 2100 (Masson-Delmotte et al., 2021(@))

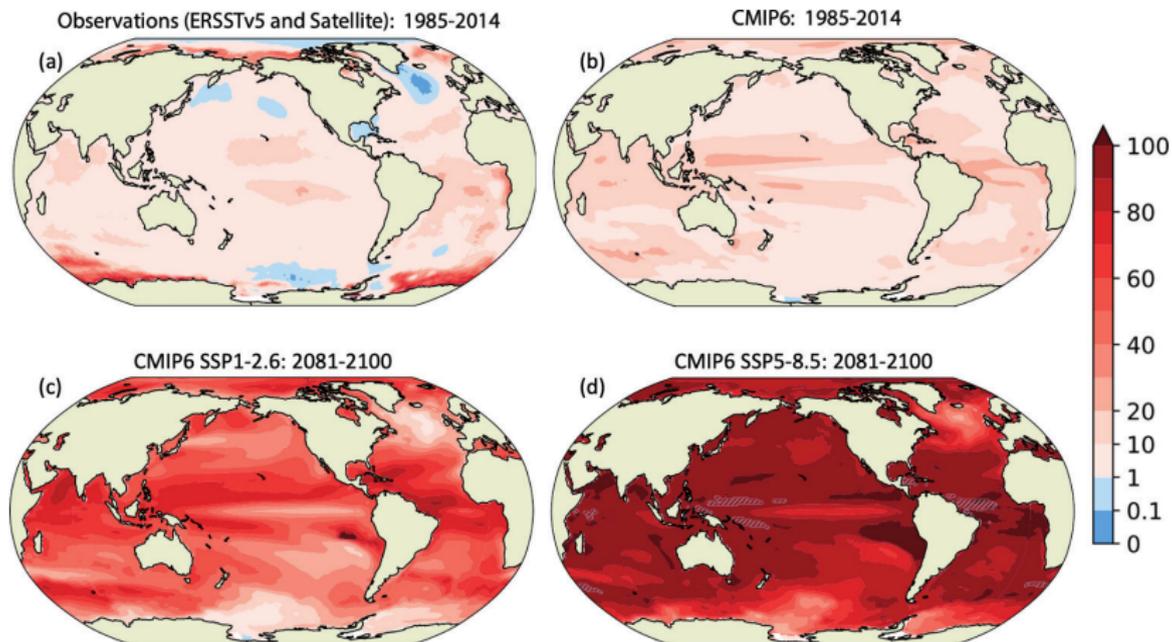


Evolution du niveau de la mer à l'horizon 2400 (Masson-Delmotte et al., 2021(@))



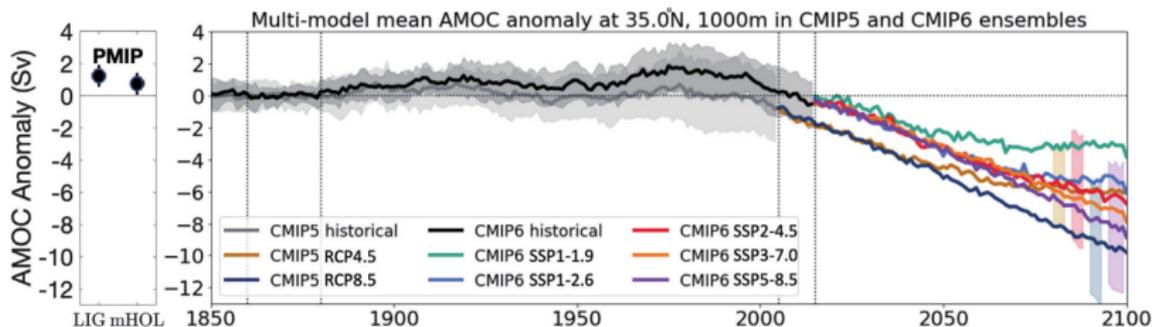
Origine probable de l'augmentation du niveau marin
(Masson-Delmotte et al., 2021(©))

- 1 Les bases de climatologie nécessaires à la compréhension des changements climatiques futures
- 2 Les instances internationales dédiées aux changements climatiques
- 3 Modélisation des climats futurs de la Terre
- 4 Effets des changements climatiques
 - Effets des changements climatiques sur la cryosphère
 - Effets des changements climatiques sur l'hydrosphère
 - Vers une acidification des océans
 - Vers une augmentation du niveau marin
 - Vers une augmentation des vagues de chaleur maritimes
 - Vers un ralentissement de la circulation océanique profonde
 - Résumé des changements climatiques probables
- 5 Changements climatiques et événements extrêmes
- 6 Les changements climatiques sont dû aux activités humaines



Vagues de chaleurs marines observées et simulé (haut) et simulés pour le futurs (bas) (?)

- 1 Les bases de climatologie nécessaires à la compréhension des changements climatiques futures
- 2 Les instances internationales dédiées aux changements climatiques
- 3 Modélisation des climats futurs de la Terre
- 4 Effets des changements climatiques
 - Effets des changements climatiques sur la cryosphère
 - Effets des changements climatiques sur l'hydrosphère
 - Vers une acidification des océans
 - Vers une augmentation du niveau marin
 - Vers une augmentation des vagues de chaleur maritimes
 - Vers un ralentissement de la circulation océanique profonde
 - Résumé des changements climatiques probables
- 5 Changements climatiques et événements extrêmes
- 6 Les changements climatiques sont dû aux activités humaines



Anomalie de vitesse de la circulation profonde océanique (Masson-Delmotte et al., 2021(©))

Rappel (ou pas)

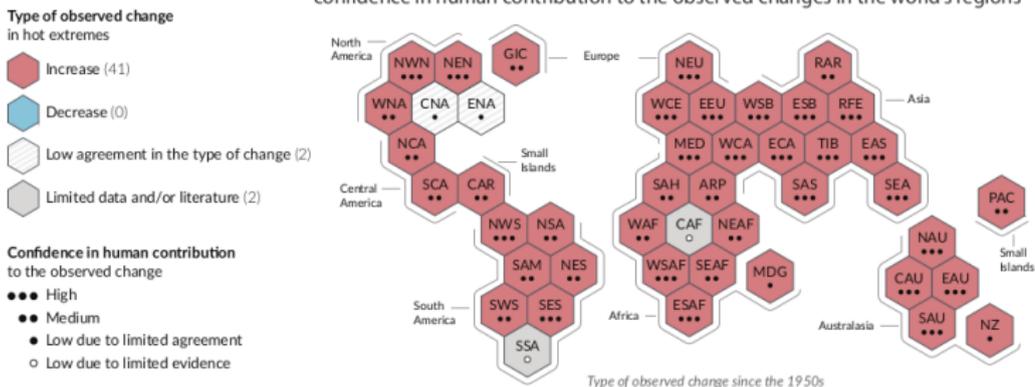
Les eaux polaires “plongent” au niveau des zones polaires. C’est un des moteurs du Gulfstream

- 1 Les bases de climatologie nécessaires à la compréhension des changements climatiques futures
- 2 Les instances internationales dédiées aux changements climatiques
- 3 Modélisation des climats futurs de la Terre
- 4 Effets des changements climatiques
 - Effets des changements climatiques sur la cryosphère
 - Effets des changements climatiques sur l'hydrosphère
 - Résumé des changements climatiques probables
- 5 Changements climatiques et événements extrêmes
- 6 Les changements climatiques sont dû aux activités humaines



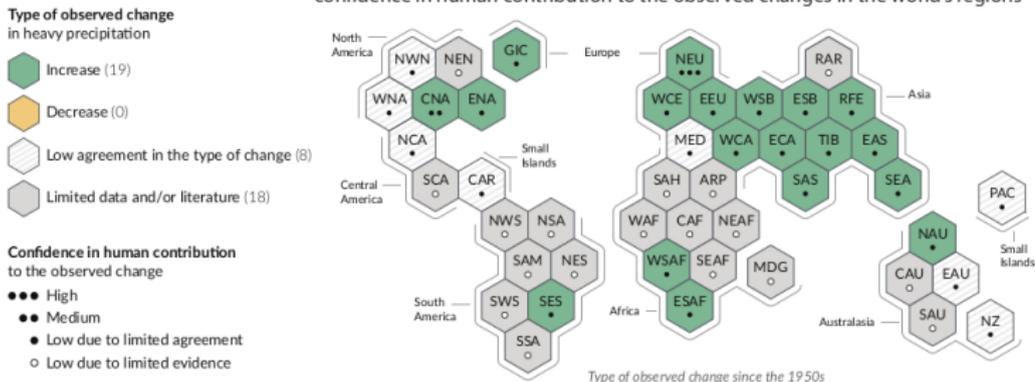
Résumé des différents changements climatiques probables (Masson-Delmotte et al., 2021(@))

- 1 Les bases de climatologie nécessaires à la compréhension des changements climatiques futures
- 2 Les instances internationales dédiées aux changements climatiques
- 3 Modélisation des climats futurs de la Terre
- 4 Effets des changements climatiques
- 5 Changements climatiques et événements extrêmes**
- 6 Les changements climatiques sont dû aux activités humaines

(a) Synthesis of assessment of observed change in **hot extremes** and confidence in human contribution to the observed changes in the world's regions

Origine anthropiques des températures extrêmes (Masson-Delmotte et al., 2021)

(b) Synthesis of assessment of observed change in **heavy precipitation** and confidence in human contribution to the observed changes in the world's regions



Origine anthropique des événements de précipitations extrêmes (Masson-Delmotte et al., 2021(©))

Type of observed change
in agricultural and ecological drought

● Increase (12)

● Decrease (1)

○ Low agreement in the type of change (28)

○ Limited data and/or literature (4)

Confidence in human contribution
to the observed change

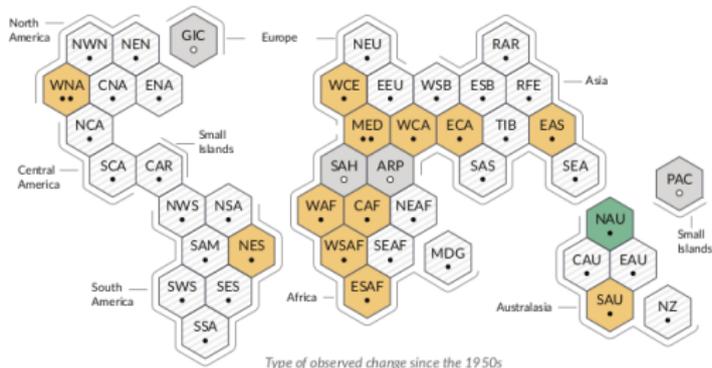
●●● High

●● Medium

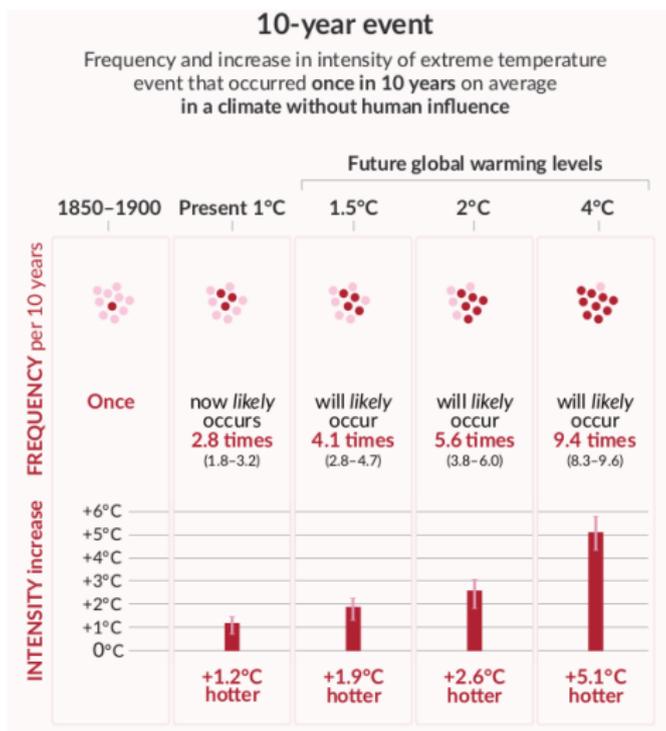
● Low due to limited agreement

○ Low due to limited evidence

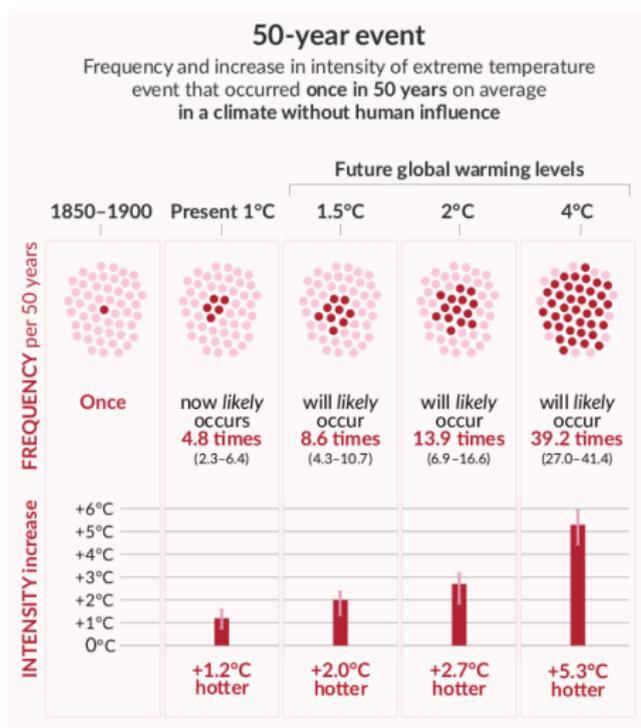
(c) Synthesis of assessment of observed change in **agricultural and ecological drought** and confidence in human contribution to the observed changes in the world's regions



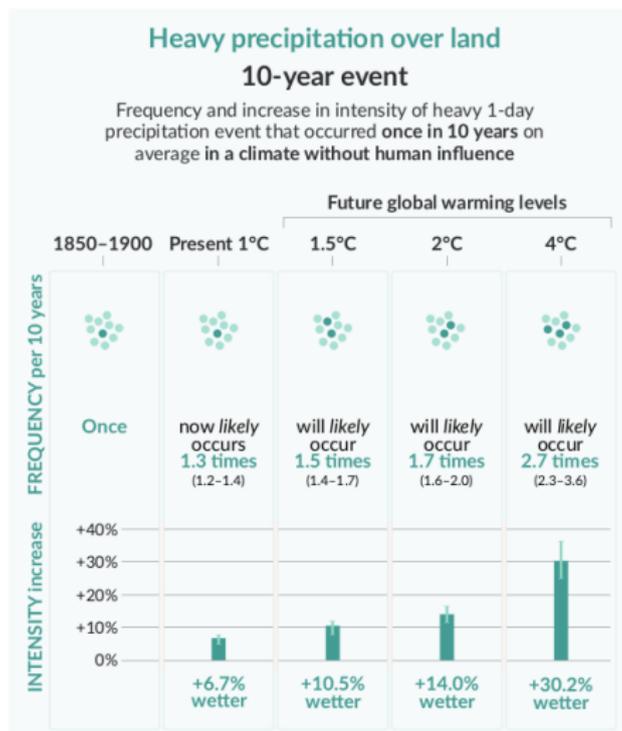
Origine anthropique des événements de sécheresses extrêmes (Masson-Delmotte et al., 2021)



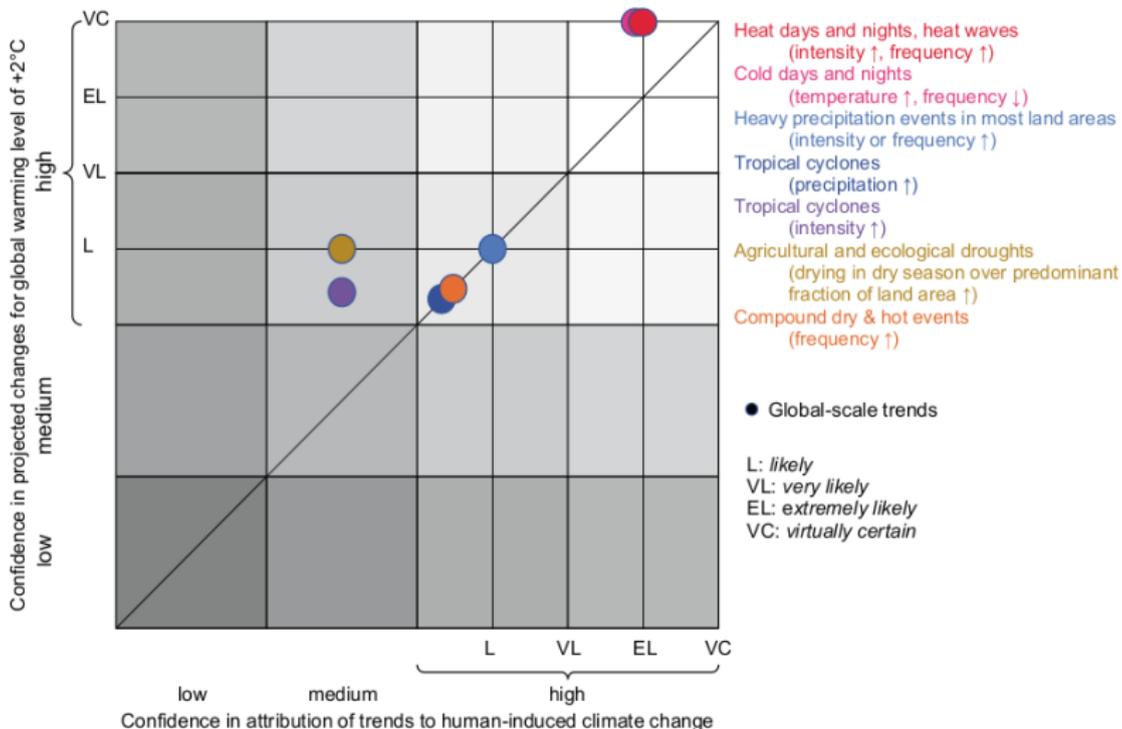
Probabilité d'occurrence et intensité des vagues de chaleur rare (1 fois tout les 10 ans) (Masson-Delmotte et al., 2021(@))



Probabilité d'occurrence et intensité des vagues de chaleur exceptionnelle (1 fois tout les 50 ans) (Masson-Delmotte et al., 2021(©))



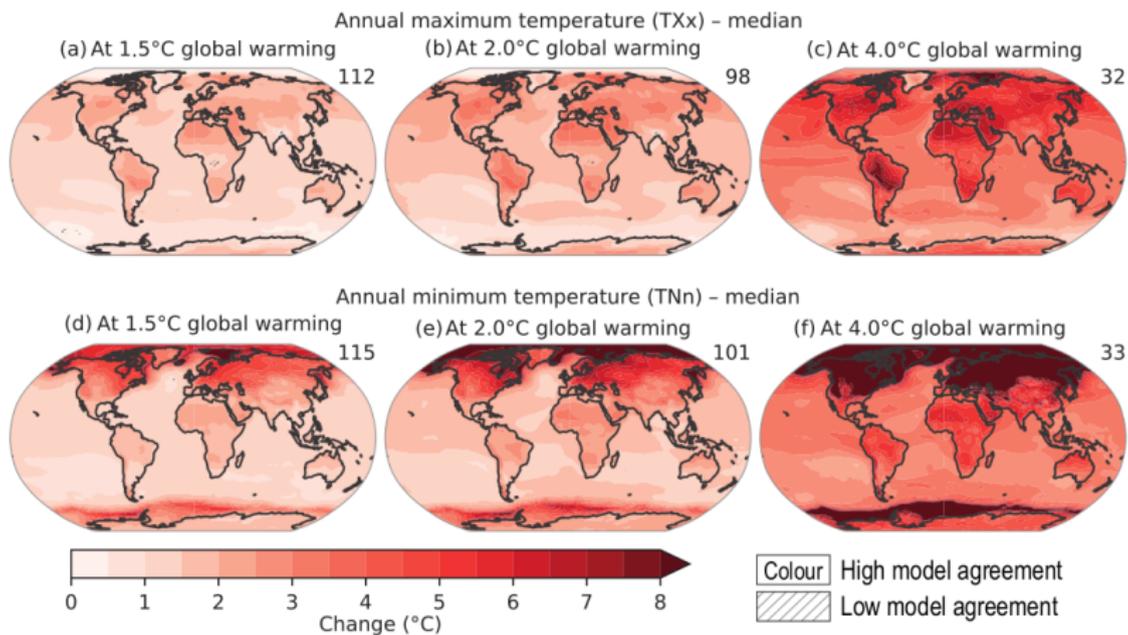
Probabilité d'occurrence d'événements de précipitation extrêmes rare (1 fois tout les 10 ans) (Masson-Delmotte et al., 2021(@))



Probabilité de l'augmentation de l'intensité et de la fréquence de quelques événements extrêmes (Masson-Delmotte et al., 2021(@))

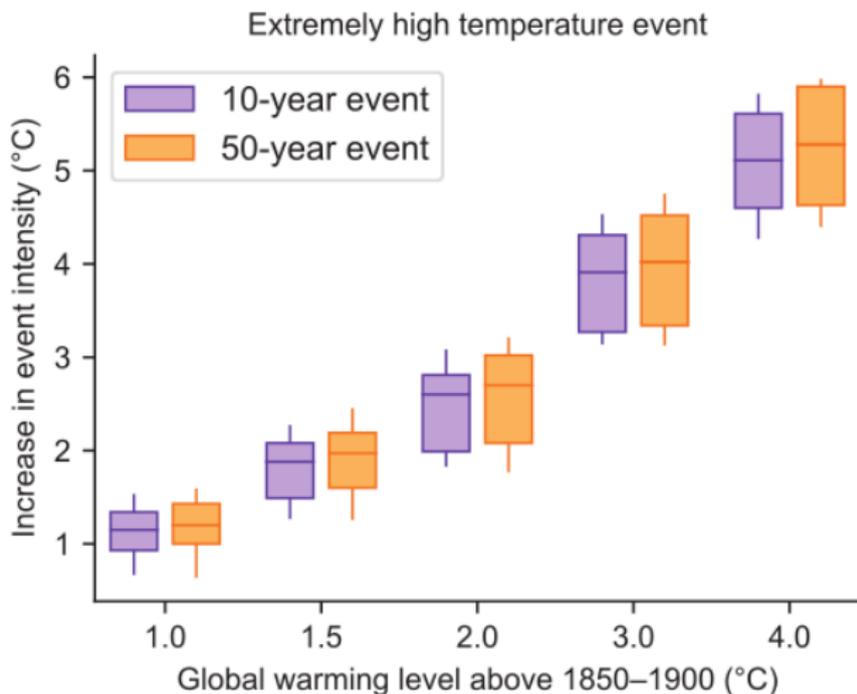
- 1 Les bases de climatologie nécessaires à la compréhension des changements climatiques futures
- 2 Les instances internationales dédiées aux changements climatiques
- 3 Modélisation des climats futurs de la Terre
- 4 Effets des changements climatiques
- 5 Changements climatiques et événements extrêmes
 - Des vagues de chaleurs plus chaudes plus fréquentes, des vagues de froids moins froides
 - Vers une augmentation des extremums de températures
 - Des vagues de chaleurs exceptionnelles, plus intense et plus fréquentes
 - Une augmentation de la fréquence et de l'intensité des événements de pluies extrêmes
 - Vers une augmentations locale de l'intensité ou de la fréquence des tempêtes et cyclones
- 6 Les changements climatiques sont dû aux activités humaines

- 1 Les bases de climatologie nécessaires à la compréhension des changements climatiques futures
- 2 Les instances internationales dédiées aux changements climatiques
- 3 Modélisation des climats futurs de la Terre
- 4 Effets des changements climatiques
- 5 Changements climatiques et événements extrêmes
 - Des vagues de chaleurs plus chaudes plus fréquentes, des vagues de froids moins froides
 - Vers une augmentation des extremums de températures
 - Des vagues de chaleurs exceptionnelles, plus intense et plus fréquentes
 - Une augmentation de la fréquence et de l'intensité des événements de pluies extrêmes
 - Vers une augmentations locale de l'intensité ou de la fréquence des tempêtes et cyclones
- 6 Les changements climatiques sont dû aux activités humaines

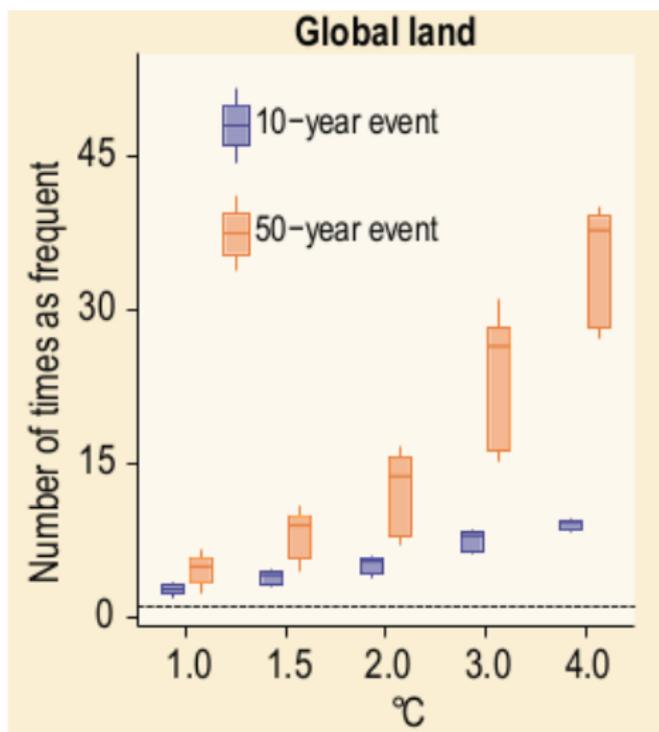


Changements des températures minimales et maximales annuelles pour différents scénario (Masson-Delmotte et al., 2021(©))

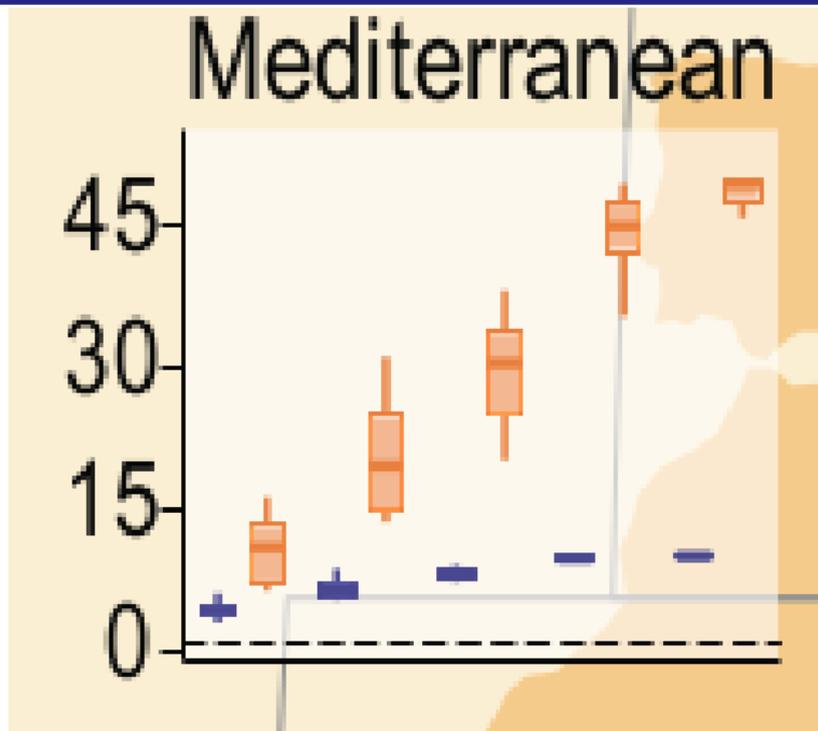
- 1 Les bases de climatologie nécessaires à la compréhension des changements climatiques futures
- 2 Les instances internationales dédiées aux changements climatiques
- 3 Modélisation des climats futurs de la Terre
- 4 Effets des changements climatiques
- 5 Changements climatiques et événements extrêmes
 - Des vagues de chaleurs plus chaudes plus fréquentes, des vagues de froids moins froides
 - Vers une augmentation des extremums de températures
 - Des vagues de chaleurs exceptionnelles, plus intense et plus fréquentes
 - Une augmentation de la fréquence et de l'intensité des événements de pluies extrêmes
 - Vers une augmentations locale de l'intensité ou de la fréquence des tempêtes et cyclones
- 6 Les changements climatiques sont dû aux activités humaines



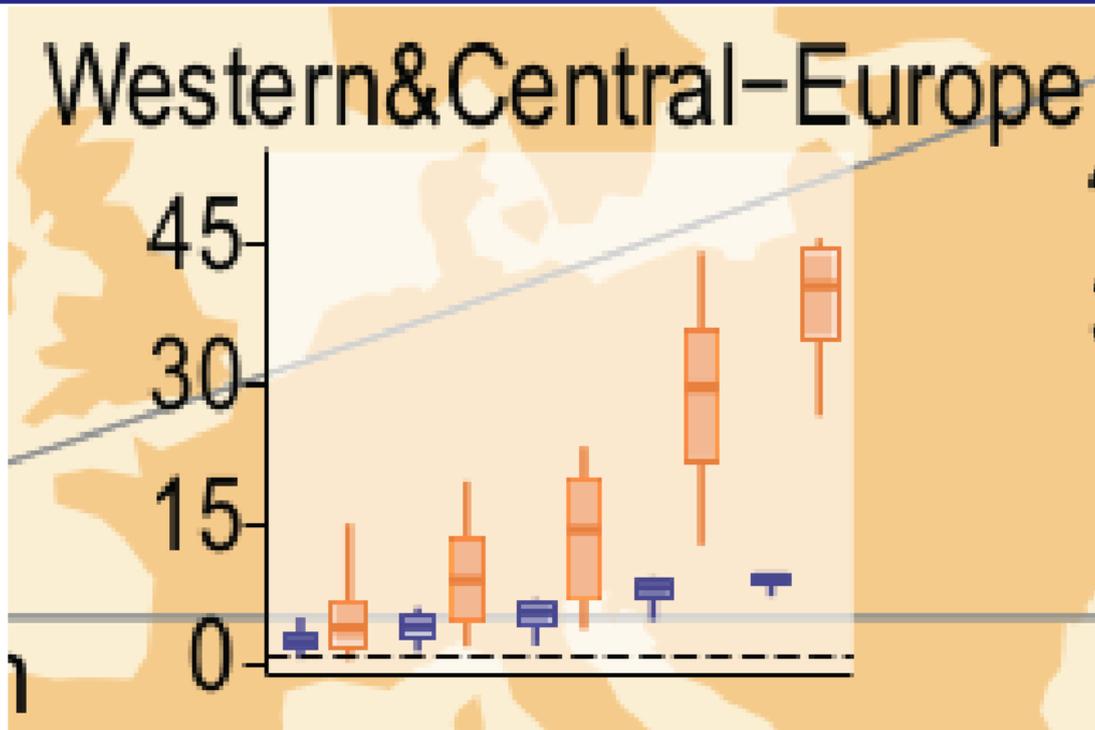
**Intensité des vagues de chaleurs exceptionnelles (1 tout les 10 ans)
et historiques (1 toute les 50 ans) pour différents scenario de
réchauffement**



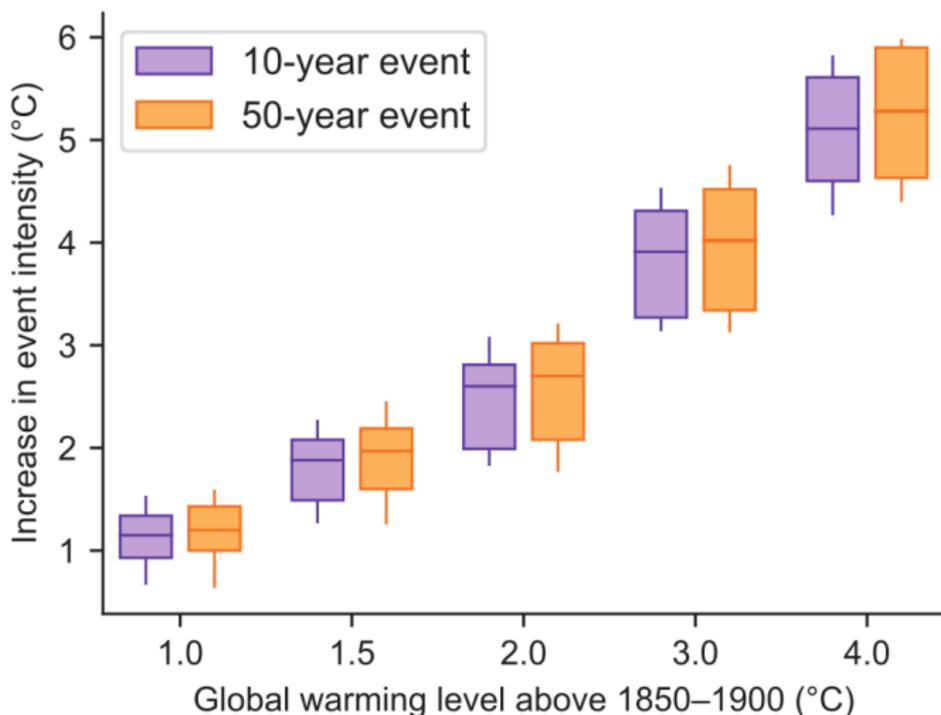
Fréquence des vagues de chaleurs exceptionnelles (1 toute les 10 ans) et historiques (1 toute les 50 ans) pour différents scénario de réchauffement (Masson-Delmotte et al., 2021(©))



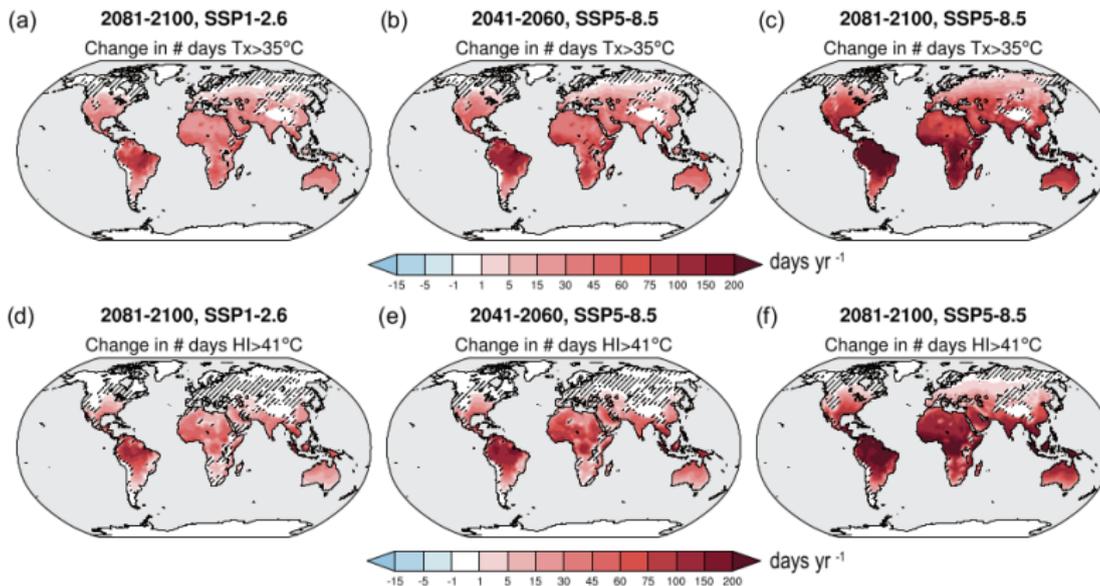
Fréquence des vagues de chaleurs en méditerranée exceptionnelles (1 toute les 10 ans) et historiques (1 toute les 50 ans) pour différents scénario de réchauffement (Masson-Delmotte et al., 2021(©))



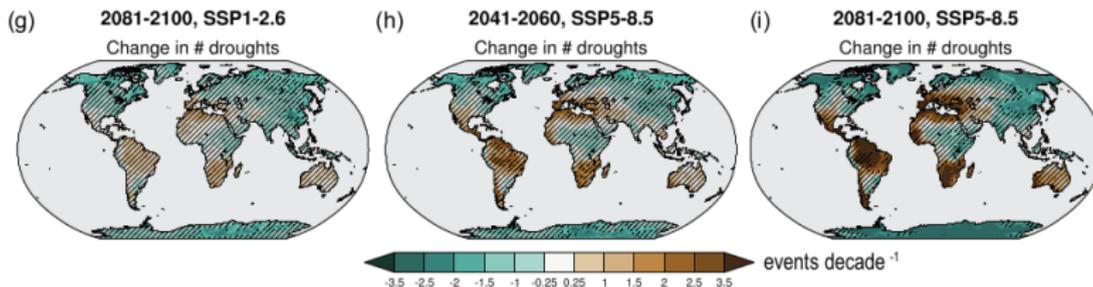
Fréquence des vagues de chaleurs en Europe de l'Ouest exceptionnelles (1 toute les 10 ans) et historiques (1 toute les 50 ans) pour différents scénario de réchauffement (Masson-Delmotte et al., 2021(@))



Intensité des événements de températures extrêmes exceptionnelles en Europe (1 tout les 10 ans) et historiques (1 tout les 50 ans) pour différents scénario de réchauffement

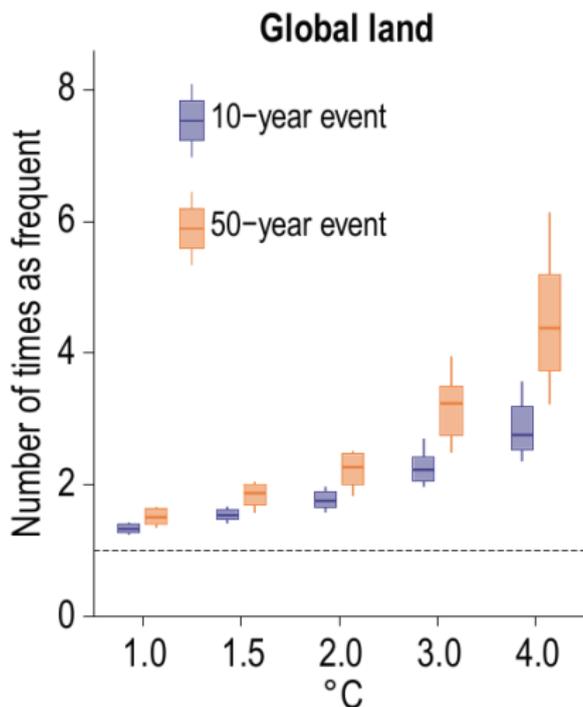


**Nombre de jours où les températures seront supérieur à 35°(haut)
ou 41 °(bas) (Masson-Delmotte et al., 2021(@))**

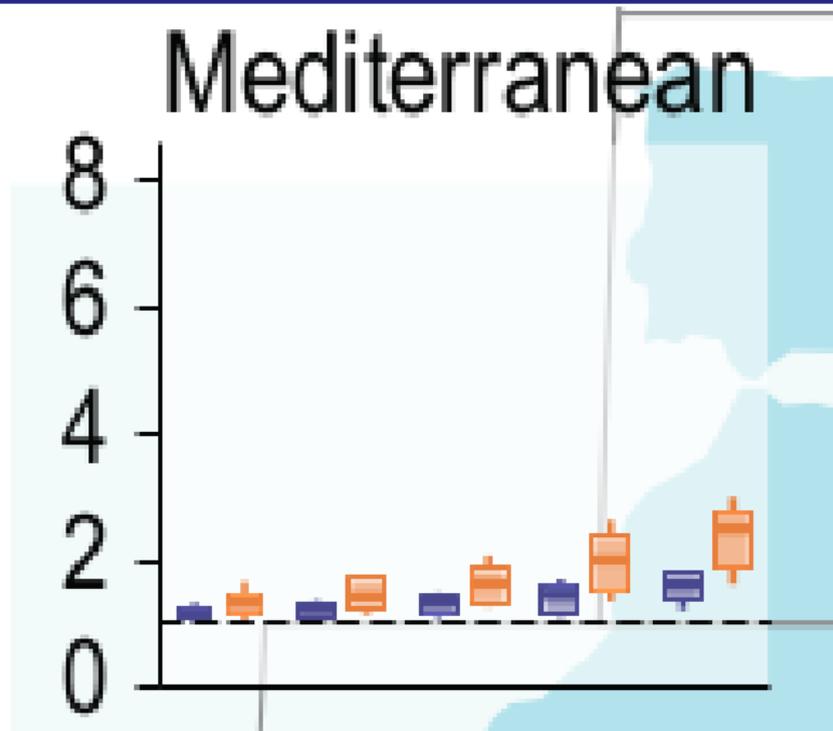


Nombre d'épisodes de sécheresses par décennie selon différents scénario (Masson-Delmotte et al., 2021(@))

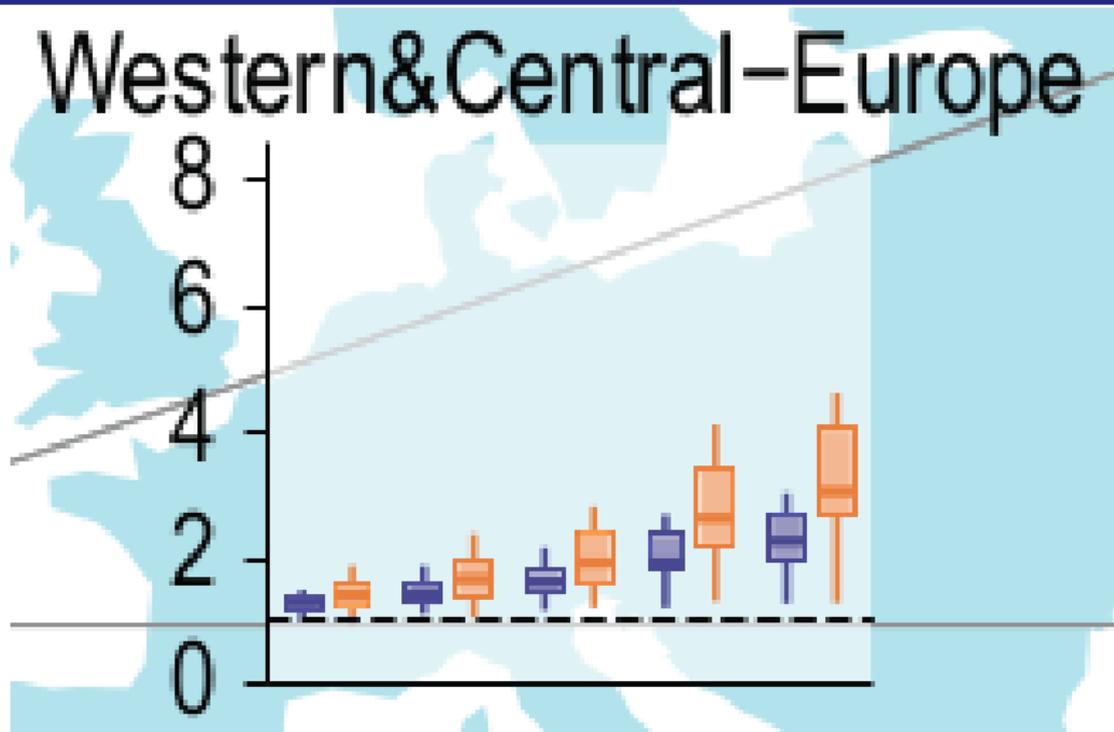
- 1 Les bases de climatologie nécessaires à la compréhension des changements climatiques futures
- 2 Les instances internationales dédiées aux changements climatiques
- 3 Modélisation des climats futurs de la Terre
- 4 Effets des changements climatiques
- 5 Changements climatiques et événements extrêmes
 - Des vagues de chaleurs plus chaudes plus fréquentes, des vagues de froids moins froides
 - Une augmentation de la fréquence et de l'intensité des événements de pluies extrêmes
 - Vers une augmentations locale de l'intensité ou de la fréquence des tempêtes et cyclones
- 6 Les changements climatiques sont dû aux activités humaines



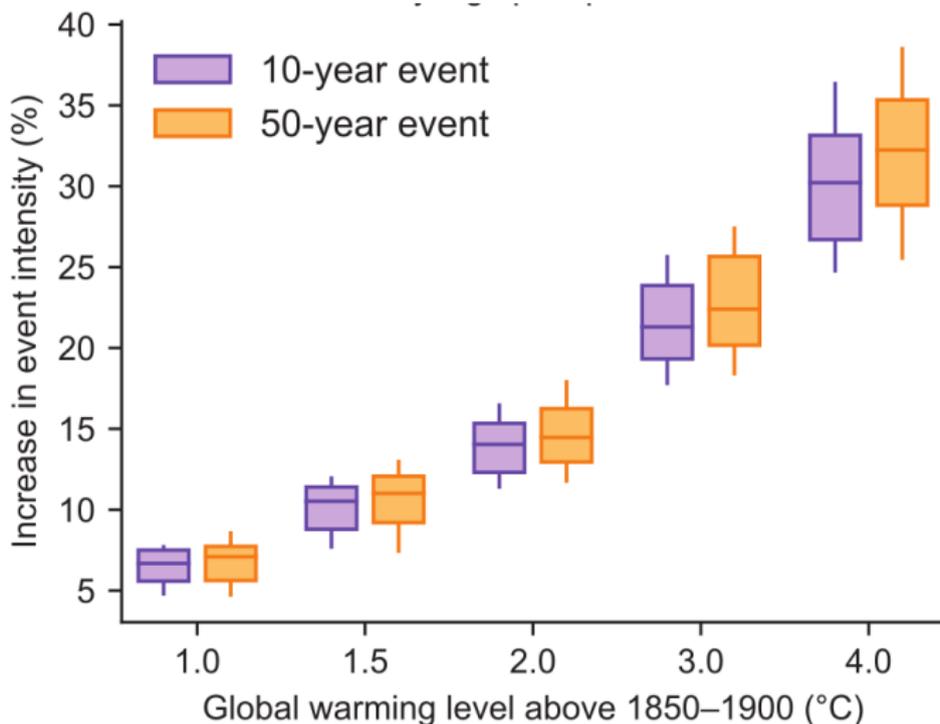
Fréquence des événements de précipitations extrêmes exceptionnelles (1 tout les 10 ans) et historiques (1 tout les 50 ans) pour différents scénario de réchauffement (Masson-Delmotte et al., 2021(©))



Fréquence des événements de précipitations extrêmes exceptionnelles en méditerranée (1 tout les 10 ans) et historiques (1 tout les 50 ans) pour différents scénario de réchauffement (Masson-Delmotte et al., 2021(©))



Fréquence des événements de précipitations extrêmes exceptionnelles en Europe (1 tout les 10 ans) et historiques (1 tout les 50 ans) pour différents scénario de réchauffement (Masson-Delmotte et al., 2021(©))



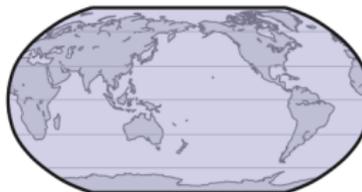
Intensité des événements de précipitations extrêmes exceptionnelles en Europe (1 tout les 10 ans) et historiques (1 tout les 50 ans) pour différents scénario de réchauffement

- 1 Les bases de climatologie nécessaires à la compréhension des changements climatiques futures
- 2 Les instances internationales dédiées aux changements climatiques
- 3 Modélisation des climats futurs de la Terre
- 4 Effets des changements climatiques
- 5 Changements climatiques et événements extrêmes
 - Des vagues de chaleurs plus chaudes plus fréquentes, des vagues de froids moins froides
 - Une augmentation de la fréquence et de l'intensité des événements de pluies extrêmes
 - Vers une augmentations locale de l'intensité ou de la fréquence des tempêtes et cyclones
- 6 Les changements climatiques sont dû aux activités humaines

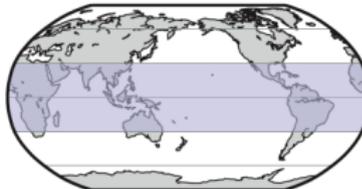
Global

- Tropical cyclones
- Extratropical cyclones
- Atmospheric river

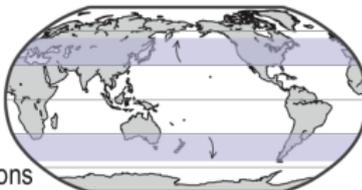
Average and maximum precipitation rates **increase** with warming



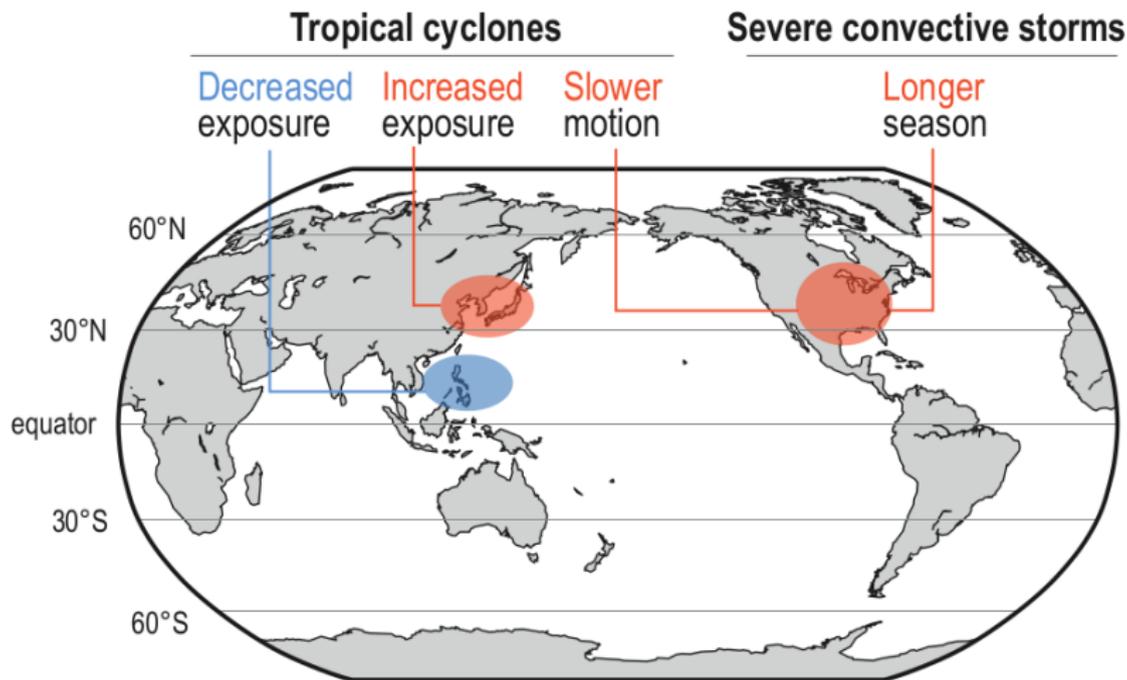
- Tropical cyclones
 - Increase** in strength
 - Decreased** or unchanged genesis frequency



- Extratropical cyclones
 - Changes (**increase** or **decrease**) in wind speed following storm tracks
 - poleward shift in some regions



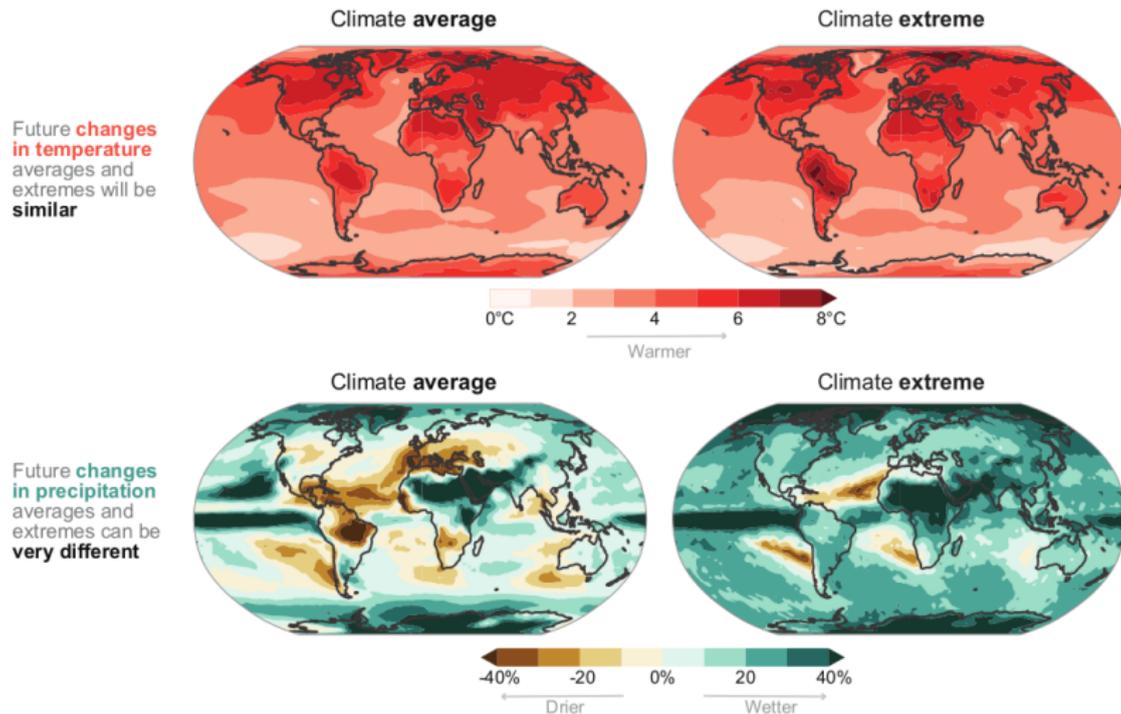
Changements de fréquence et d'intensité d'événements atmosphériques extrêmes liées aux changements climatiques (Masson-Delmotte et al., 2021(©))



Changement locaux de l'intensité et de la fréquence des événements météorologiques extrêmes (Masson-Delmotte et al., 2021(©))

FAQ 11.1: How will changes in climate extremes compare with changes in climate averages?

The direction and magnitude of future changes in climate extremes and averages depend on the variable considered.

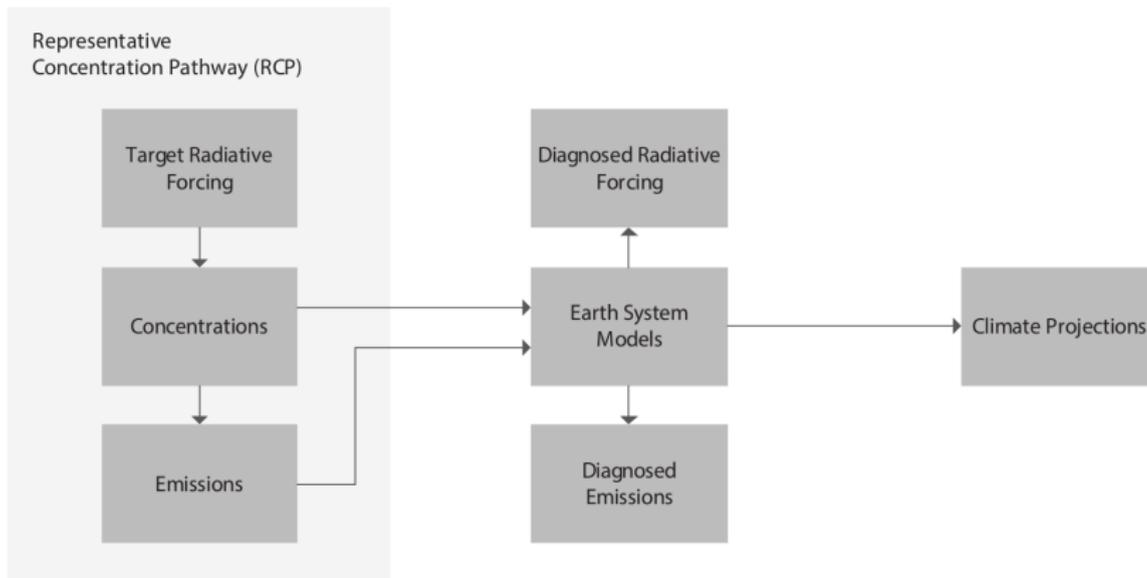


Future **changes in temperature** averages and extremes will be **similar**

Future **changes in precipitation** averages and extremes can be **very different**

Résumé des changements climatiques moyen et extrêmes

- 1 Les bases de climatologie nécessaires à la compréhension des changements climatiques futures
- 2 Les instances internationales dédiées aux changements climatiques
- 3 Modélisation des climats futurs de la Terre
- 4 Effets des changements climatiques
- 5 Changements climatiques et événements extrêmes
- 6 Les changements climatiques sont dû aux activités humaines



Fonctionnement de la modélisation des climats futurs [IPCC Chap 11]

Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S. L., Péan, C., Berger, S., Caud, N., Chen, Y., Goldfarb, L., Gomis, M.,. Climate change 2021: the physical science basis. *Contribution of working group I to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*, page 2, 2021.