

L'ÉTAT DU CLIMAT EN 2022

Ole Humlum

L'état du climat en 2022

Ole Humlum

Rapport 56, The Global Warming Policy Foundation

© Copyright 2022, The Global Warming Policy Foundation

À propos de l'auteur

Ole Humlum a été professeur de géographie physique au centre universitaire de Svalbard et à l'université d'Oslo, en Norvège.



Table des matières

À propos de l'auteur..... ii

Résumé général..... 2

1. Températures de l'air..... 4

2. Gaz à effet de serre dans l'atmosphère..... 19

3. Températures de l'océan..... 22

4. Oscillations océaniques..... 31

5. Niveau de la mer..... 33

6. Neige et glace..... 38

7. Tempête tropicale et ouragans..... 42

Written references..... 46

Data sources..... 46

Processus d'évaluation..... 48

À propos du GWPF (Global Warming Policy Foundation)..... 48

À propos de l'Association des Climato-Réalistes..... 48



L'ÉTAT DU CLIMAT EN 2022

Ole Humlum



Résumé général

Ce rapport se concentre sur les observations et non sur les résultats des modèles numériques, à quelques exceptions près (par exemple, la figure 38). Les références et les sources de données sont indiquées à la fin du rapport.

Températures de l'air

Les températures moyennes de l'air mesurées près de la surface de la planète (températures de l'air en surface), ou plutôt leur écart par rapport à la moyenne calculée pour une période de référence choisie, sont au cœur de nombreuses controverses sur le climat. Toutefois, il ne faut pas exagérer l'importance des périodes de réchauffement ou de refroidissement enregistrées sur des périodes courtes. Tout d'abord, le fait de se concentrer sur les moyennes tend à masquer les variations quotidiennes de température qui sont beaucoup plus importantes. D'autre part, lorsque la Terre connaît des épisodes chauds El Niño ou froids La Niña, d'importants échanges de chaleur ont lieu entre l'océan Pacifique et l'atmosphère, qui se traduisent par un signal dans la température de l'air à l'échelle mondiale. Toutefois, ces échanges ne reflètent pas les changements dans le contenu thermique total du système atmosphère-océan. En fait, les changements nets globaux impliqués peuvent être faibles ; ces échanges de chaleur peuvent principalement refléter une redistribution de l'énergie entre l'océan et l'atmosphère. L'évaluation de la dynamique des températures océaniques est donc tout aussi importante que l'évaluation des changements des températures de l'air en surface.

Par rapport à l'ensemble de la période 1850-1880, l'année 2022 bien que chaude a été plus fraîche que les années écoulées depuis 2016. Un épisode La Niña modéré s'est manifesté au cours de l'année, soulignant l'importance des échanges entre l'océan et l'atmosphère.

De nombreuses régions arctiques ont connu des températures record en 2016, mais depuis lors, y compris en 2022, les conditions sont généralement devenues un peu plus fraîches. Le pic de température de l'Arctique en 2016 pourrait avoir été influencé par la chaleur océanique, libérée par l'océan Pacifique pendant le puissant El Niño de 2015-16 et transportée par la suite vers l'Arctique. Cela montre à quel point les températures de l'air arctique peuvent être affectées, non seulement par les variations des conditions locales, mais aussi par les variations

qui se produisent dans des régions géographiquement éloignées.

De nombreux graphiques de ce rapport se concentrent sur la période commençant en 1979, qui correspond au début de l'ère des satellites et à la disponibilité d'une large gamme d'observations avec une couverture presque mondiale, incluant la température. Ces données permettent une vision détaillée des changements de température au fil du temps à différentes altitudes dans l'atmosphère. Entre autres phénomènes, elles révèlent qu'un plateau de température stratosphérique prévaut depuis 1995.

Depuis 1979, les températures dans la basse troposphère ont augmenté à la fois sur les terres et les océans, mais plus nettement sur les terres. L'explication la plus simple de cette observation est qu'une grande partie du réchauffement est causée par l'insolation solaire, mais il peut y avoir d'autres causes, par exemple les différences de capacité thermique et les changements dans la couverture nuageuse et l'utilisation des sols.

Océans

Le programme Argo atteint maintenant 19 années de couverture mondiale des océans, passant d'un réseau relativement peu dense de 1000 flotteurs profileurs en 2004 à plus de 3900 en décembre 2021. Depuis leur lancement, ces flotteurs ont fourni un ensemble unique de données sur la température des océans pour des profondeurs allant jusqu'à 1900 mètres. Ces données sont à jour jusqu'en août 2020. Bien que les océans soient beaucoup plus profonds que 1900 mètres et que le jeu de données soit encore relativement court, des informations intéressantes émergent maintenant de ces observations.

Globalement, depuis 2004, les 1900 mètres supérieurs des océans ont connu un réchauffement net d'environ 0,07°C. Le réchauffement net maximal (environ 0,2°C) concerne les 100 premiers mètres. Ce phénomène est principalement observé dans les régions proches de l'équateur, où la quantité de rayonnement solaire reçue est la plus importante. À une plus grande profondeur, un léger réchauffement net (environ 0,025 °C) s'est produit entre 2004 et 2020. Cette évolution de la température moyenne des océans se reflète dans les océans équatoriaux, entre 30°N et 30°S, qui, en raison de la forme sphérique de la planète,

représentent une surface considérable. Cependant, simultanément, les océans du nord (55-65°N) ont connu en moyenne un refroidissement marqué jusqu'à 1400 m de profondeur, et un léger réchauffement en deçà. Les océans du sud (55-65°S) ont connu en moyenne un léger réchauffement à la plupart des profondeurs depuis 2004, mais surtout près de la surface. Toutefois, les moyennes peuvent être trompeuses et, bien souvent, on obtient une meilleure vision en étudiant certaines zones en détail, comme nous le verrons plus loin dans ce rapport.

Le niveau de la mer

Le niveau de la mer est surveillé par altimétrie satellitaire et par des mesures directes à l'aide de marégraphes situés le long des côtes. Alors que les données satellitaires suggèrent une élévation globale du niveau de la mer d'environ 3,4 mm par an ou plus, les données des marégraphes du monde entier suggèrent une élévation moyenne stable du niveau de la mer à l'échelle mondiale de 1 à 2 mm par an. Les mesures n'indiquent aucune accélération (ou décélération) récente. La différence marquée (un rapport d'environ 1 à 2) entre les deux ensembles de données n'a pas encore d'explication universellement acceptée, mais on sait que les observations satellitaires du niveau de la mer sont compliquées dans les zones proches de la côte (voir, par exemple, Vignudelli et al. 2019). Quoi qu'il en soit, pour la planification côtière locale, les données marégraphiques sont préférables, comme expliqué plus loin dans ce rapport.

Glace de mer

En 2022, la couverture mondiale de glace de mer est restée bien en deçà de la moyenne de l'ère satellitaire (depuis 1979), mais avec une tendance globale stable ou même à la hausse. Fin 2016, l'étendue mondiale de la glace de mer a atteint un minimum marqué, causé au moins en partie par le fonctionnement de deux cycles naturels différents caractérisant la glace de mer dans l'hémisphère nord et dans l'hémisphère sud, respectivement. Les deux cycles ont eu des minima simultanés en 2016, ce qui a eu des conséquences sur l'étendue globale de la glace

de mer. L'évolution inverse, vers une glace de mer stable ou plus étendue aux deux pôles, a probablement commencé en 2018 et s'est accentuée depuis. La réduction marquée de la glace de mer antarctique en 2016 a également été affectée par des conditions de vent inhabituelles.

Couverture neigeuse

Les variations de la couverture neigeuse mondiale sont principalement dues à des changements dans l'hémisphère nord, où se trouvent toutes les grandes zones terrestres. L'étendue de la couverture neigeuse dans l'hémisphère sud est essentiellement déterminée par l'inlandsis antarctique et est donc relativement stable. L'étendue moyenne de la couverture neigeuse de l'hémisphère nord est également plus ou moins statique depuis le début des observations par satellite, bien que des variations interannuelles locales et régionales puissent être importantes. Si l'on considère les changements saisonniers dans l'hémisphère Nord depuis 1979, l'étendue en automne augmente légèrement, l'étendue au milieu de l'hiver est pratiquement stable et l'étendue au printemps diminue légèrement. En 2022, l'étendue saisonnière de la couverture neigeuse dans l'hémisphère nord était proche de la moyenne 1972-2021.

Tempêtes et ouragans

Les données les plus récentes sur l'énergie cyclonique accumulée (ACE) des tempêtes tropicales et des ouragans au niveau mondial se situent bien dans la fourchette observée depuis 1970. La série ACE présente une variabilité dans le temps, avec une périodicité significative de 3,6 années, mais sans tendance claire vers des valeurs plus élevées ou plus basses. Une plus longue série d'ACE pour le bassin atlantique (depuis 1850) suggère toutefois des rythmes naturels d'une durée de 55,8 ans et de 7,8 ans. En outre, les données récentes sur le nombre d'atterrissages d'ouragans sur le territoire continental des États-Unis est restée dans la fourchette normale pendant toute la période d'observation depuis 1851.

1. Températures de l'air

Surface : configuration spatiale

La température moyenne de l'air à la surface du globe en 2022 était presque identique à celle de l'année précédente, et il s'avère de plus en plus que 2016 aura marqué un pic de température mondiale (figure 1). Les années à venir montreront si cette hypothèse est correcte ou non. L'année 2022 a été (comme en 2021) affectée par un épisode La Niña froid (Océan Pacifique, voir Figure 29).

L'hémisphère nord a été marqué par des contrastes régionaux de température, en particulier au-dessus de 30°N. Les épisodes de température les plus prononcés en 2022 ont été des températures moyennes basses dans une grande partie de l'Amérique du Nord et dans les océans autour du Groenland et de l'Europe du Nord. En revanche, la majeure partie de l'Europe et les régions de Russie et de Sibérie ont connu des températures relativement élevées en 2022 (par rapport aux dix dernières années).

Dans l'Arctique, les secteurs Europe-Russie-Sibérie ont été relativement chauds, tandis que la majeure partie du secteur Canada-Alaska a été relativement froide (figure 2a).

Près de l'équateur, les températures de l'air en surface ont été généralement proches ou inférieures à la moyenne des dix années précédentes. Dans l'océan Pacifique, les conditions ont été froides reflétant l'épisode La Niña en cours.

Dans l'hémisphère sud, les températures de l'air en surface étaient proches ou inférieures à la moyenne des dix dernières années. Toutes les grandes régions terrestres ont connu des températures froides en 2022 par rapport aux dix années précédentes.

Les océans entourant le continent antarctique ont été relativement chauds en 2022, tout comme la majeure partie de l'Antarctique occidental. L'Antarctique oriental est resté proche ou inférieur à la moyenne décennale (figure 2b).

En résumé, en 2022, les températures moyennes mondiales de l'air étaient élevées par rapport à la période instrumentale depuis 1850, mais avec une tendance au refroidissement global depuis 2016. Les températures ont été sous l'influence de l'épisode La Niña en cours dans l'océan Pacifique.

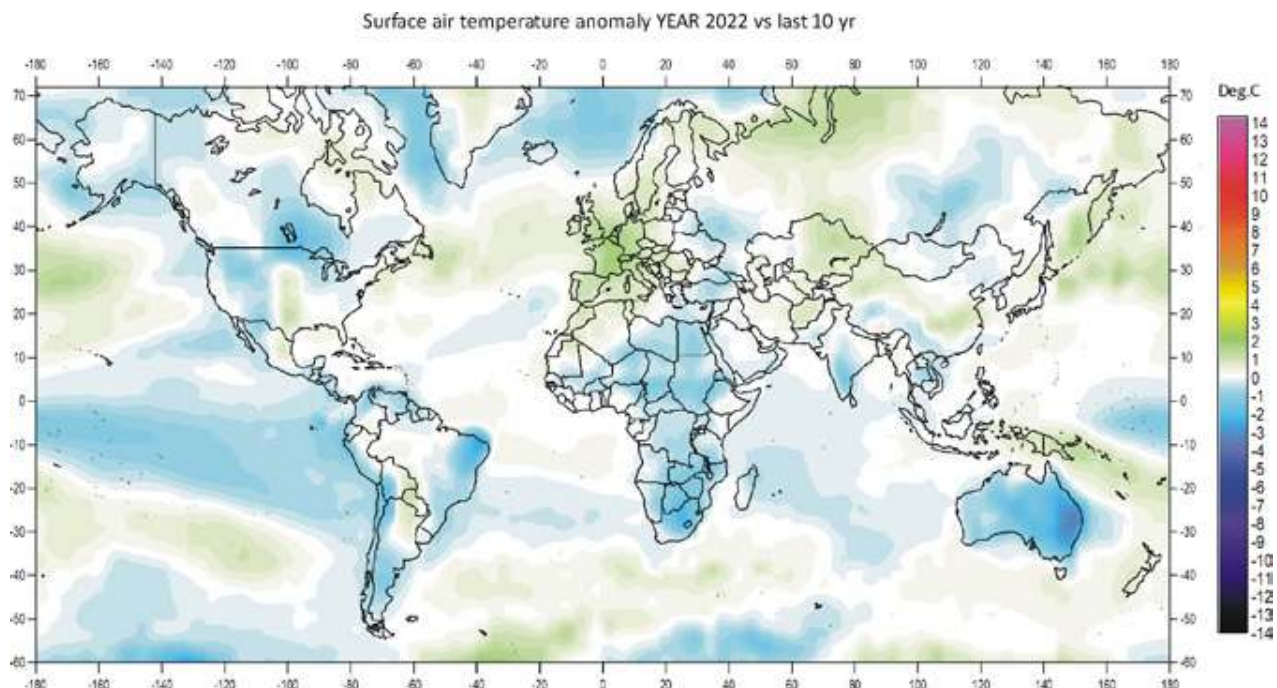


Figure 1 : Températures de l'air en surface en 2022 par rapport à la moyenne des 10 années précédentes.

Les couleurs vert-jaune-rouge indiquent les zones où les températures sont plus élevées que la moyenne, tandis que les couleurs bleues indiquent des températures plus basses que la moyenne. Source des données : Anomalie de température de surface télédéteectée, AIRS/Aqua L3 Monthly Standard Physical Retrieval 1-degree x 1-degree V007 (<https://airs.jpl.nasa.gov/>), obtenue sur le portail de données GISS (https://data.giss.nasa.gov/gistemp/maps/index_v4.html).

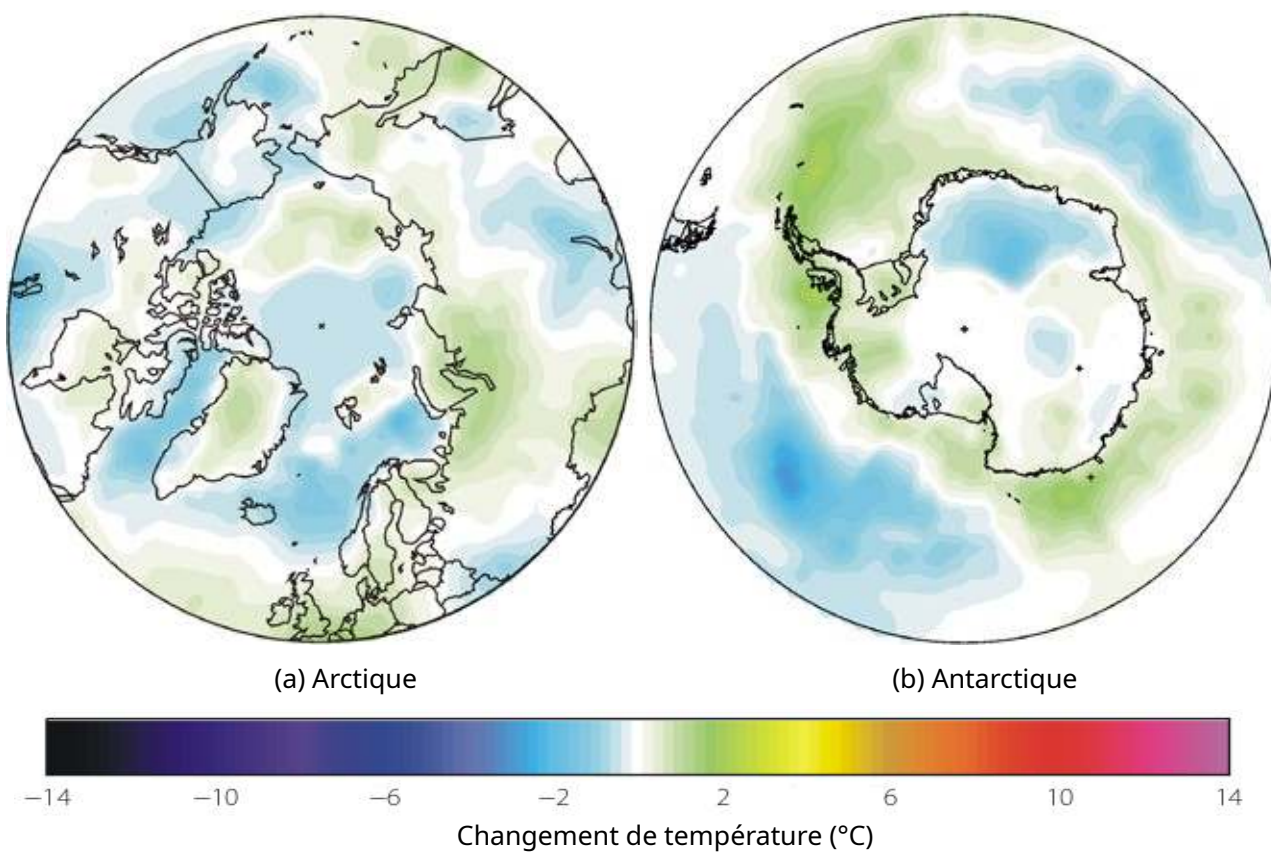
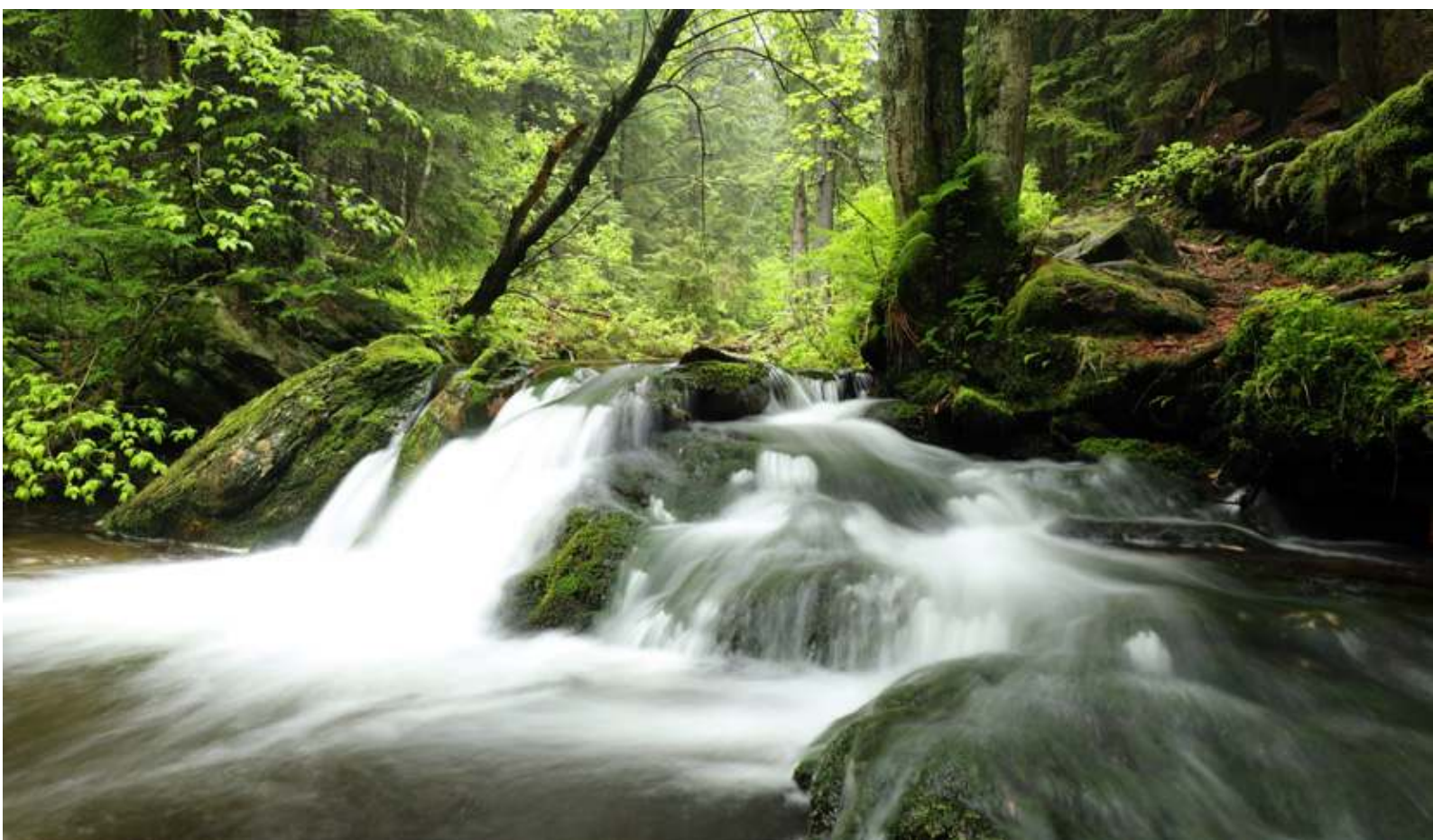


Figure 2 : Températures de l'air polaire de surface en 2022 par rapport à la moyenne des 10 années précédentes.

Les couleurs vert-jaune-rouge indiquent les zones où les températures sont plus élevées que la moyenne, tandis que les couleurs bleues indiquent des températures plus basses que la moyenne.

Source des données : Anomalie de température de surface télédéteectée, AIRS/Aqua L3 Monthly Standard Physical Retrieval 1-degree $\times$ 1-degree V007 (<https://airs.jpl.nasa.gov/>), obtenues sur le portail de données GISS (https://data.giss.nasa.gov/gistemp/maps/index_v4.html).

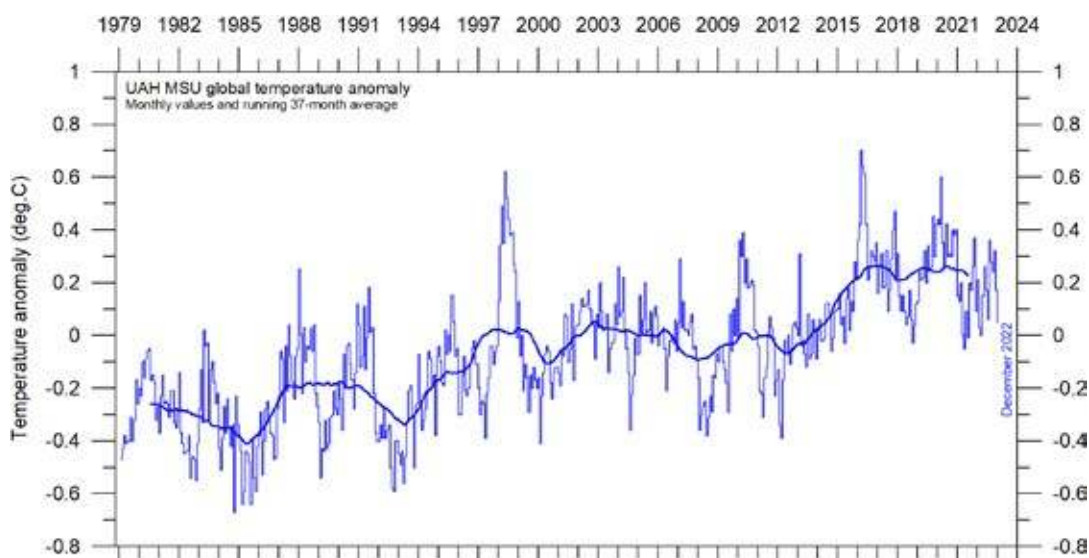


Températures mensuelles de la troposphère inférieure

Les deux systèmes d'enregistrements satellitaires des températures de la troposphère inférieure (RSS et UAH) montrent clairement un pic de température associé à l'El Niño de 2015-16, une baisse progressive subséquente, suivie d'un nouveau pic de température dû à l'El Niño modéré de 2019-20. L'évolution la plus récente est une nouvelle baisse des températures pendant l'épisode La Niña en cours dans l'océan Pacifique.

Le schéma de variation des températures est similaire pour les deux séries de données (Figures 3-5), mais l'augmentation globale des températures pour la période 1979-2022 est plus importante pour RSS que pour UAH. Avant l'ajustement assez important de la série RSS en 2017, l'augmentation de la température était presque identique pour les deux séries de données.

(a) UAH



(b) RSS

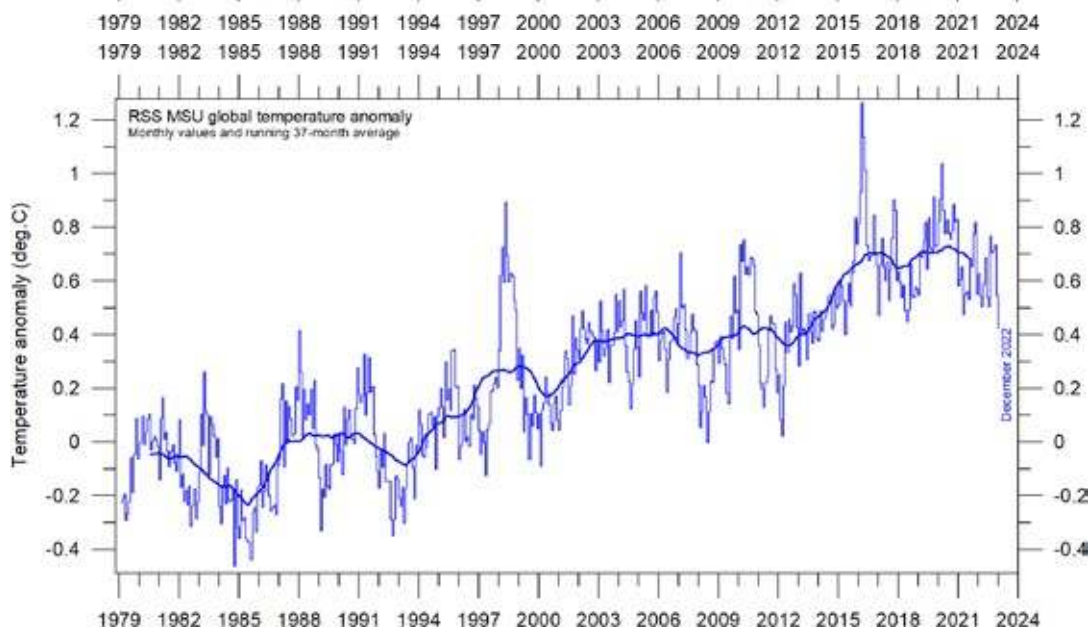


Figure 3 : Moyenne mensuelle des températures de la troposphère inférieure depuis 1979.

(a) UAH et (b) RSS. La ligne épaisse est la moyenne mobile simple sur 37 mois, correspondant presque à une moyenne mobile sur 3 ans.

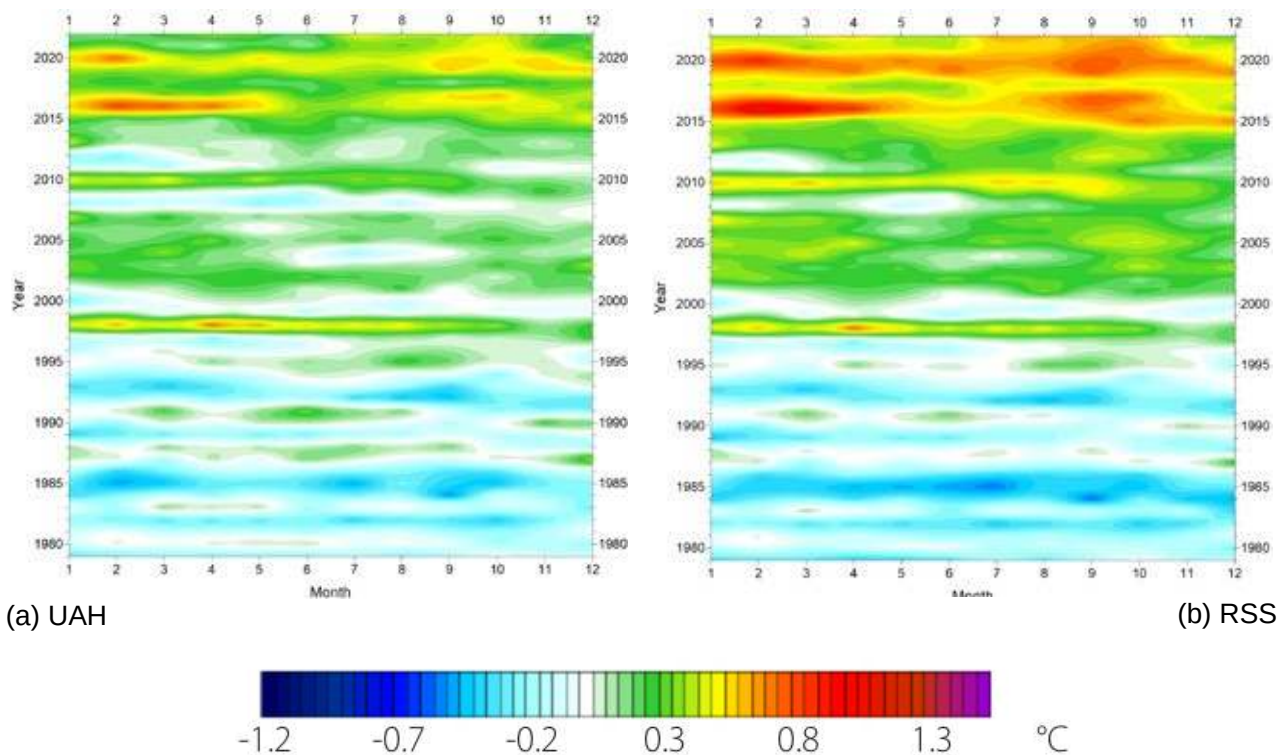


Figure 4 : Evolution temporelle des températures de la basse troposphère depuis 1979.

Anomalie de température par rapport à 1979-2008. Les effets des El Niños de 1998, 2010 et 2015-2016 sont clairement visibles, de même que la tendance de nombreux El Niños à culminer pendant l'hiver de l'hémisphère nord. Comme les différentes bases de données sur les températures utilisent des périodes de référence différentes, les séries ont été rendues comparables en fixant leur période de référence à 30 ans.

Températures moyennes annuelles de la troposphère inférieure

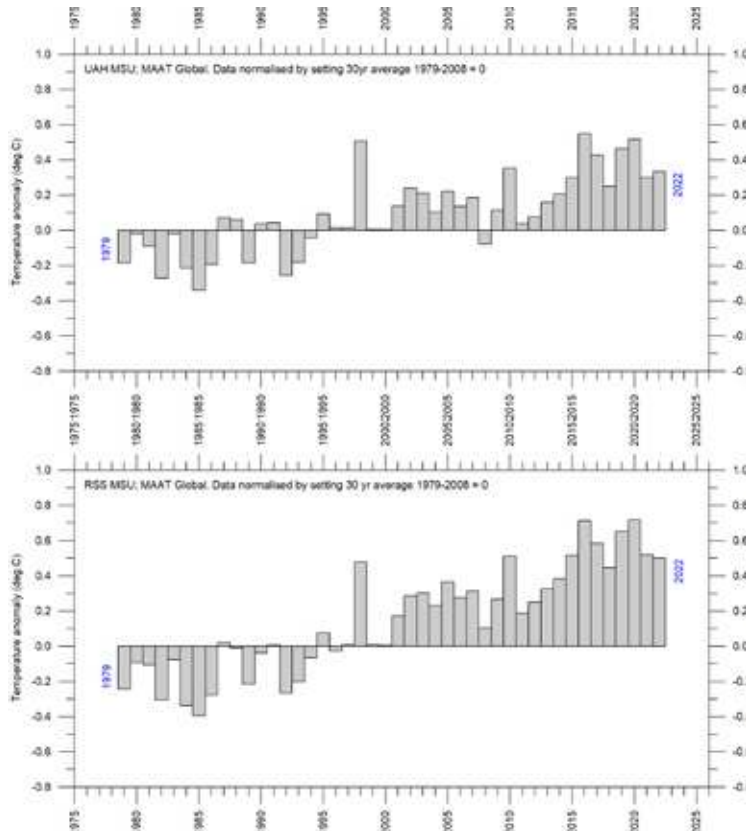


Figure 5 : Températures moyennes annuelles de l'air dans la basse troposphère depuis 1979.

Données satellitaires interprétées par l'Université de l'Alabama à Huntsville (UAH) et par *Remote Sensing Systems* (RSS), tous deux aux États-Unis.

Températures mensuelles à la surface

Les trois relevés de température de l'air en surface montrent clairement le pic de température associé à l'El Niño de 2015-16, la baisse de température qui a suivi, la nouvelle augmentation de la température due à l'El Niño de 2019-20 et la dernière baisse de température due à l'épisode La Niña en cours (figure 6).

Les trois relevés de surface confirment toutefois que le récent épisode El Niño majeur a culminé au début de 2016, qu'il s'en est suivi un retour progressif vers les conditions antérieures à 2015, puis une nouvelle augmentation en 2019-20 suivie d'une baisse subséquente de la température. Ces évolutions sont également illustrées dans la figure 7.

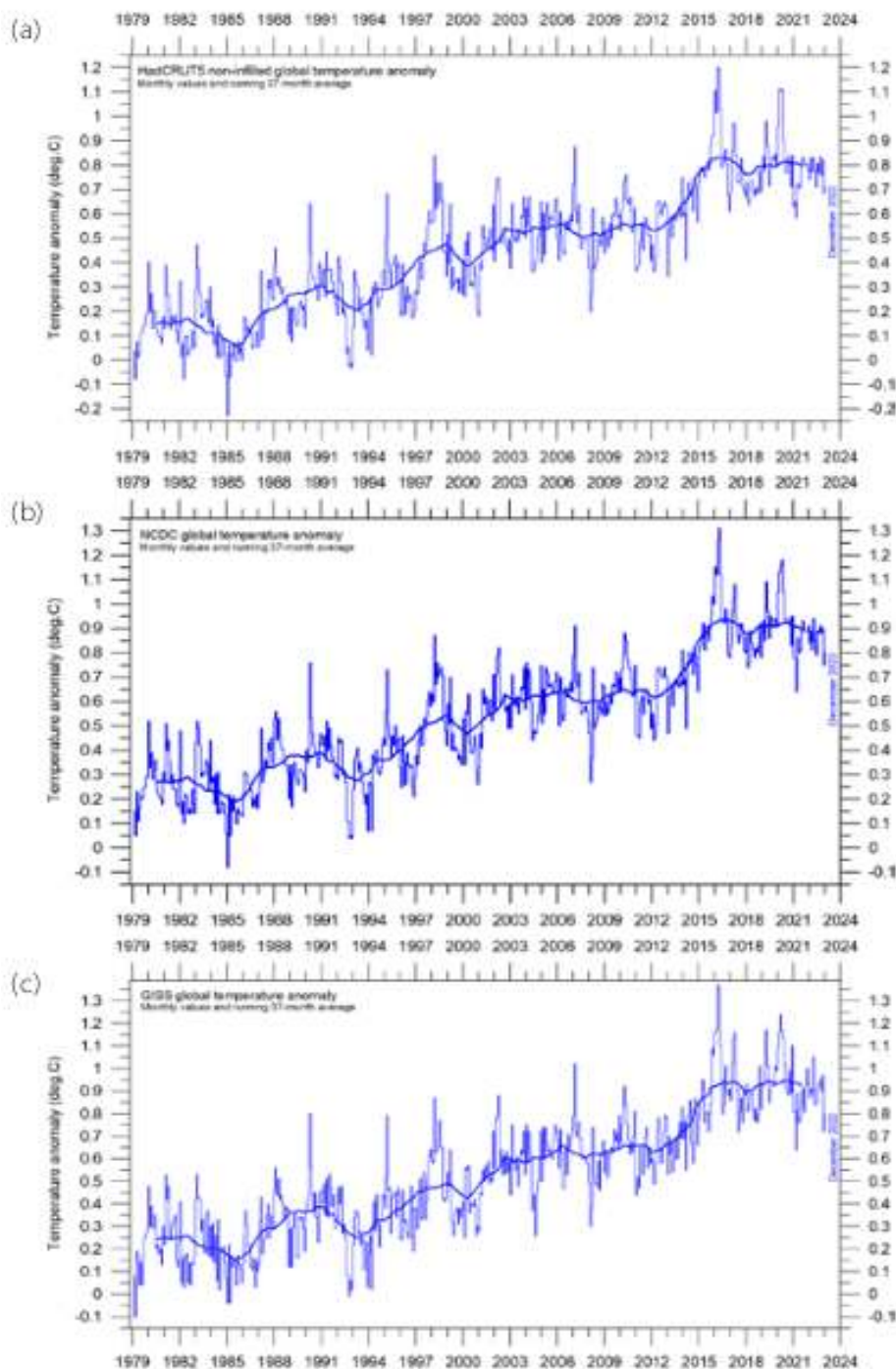
Figure 6 : Températures moyennes mensuelles de l'air en surface depuis 1979.

(a) HadCRUT5

(b) NCDC

(c) GISS.

La ligne épaisse est la moyenne mobile simple sur 37 mois, correspondant quasiment à une moyenne mobile sur 3 ans.



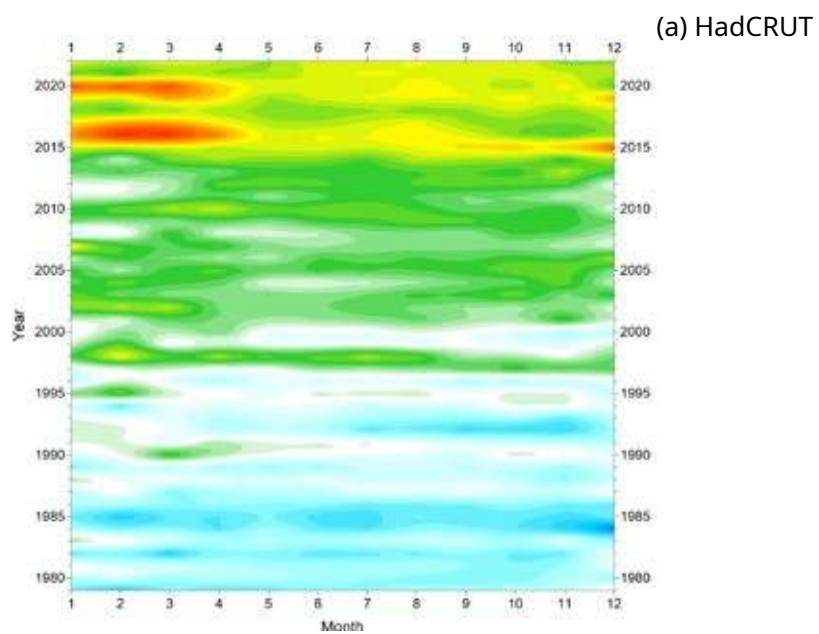
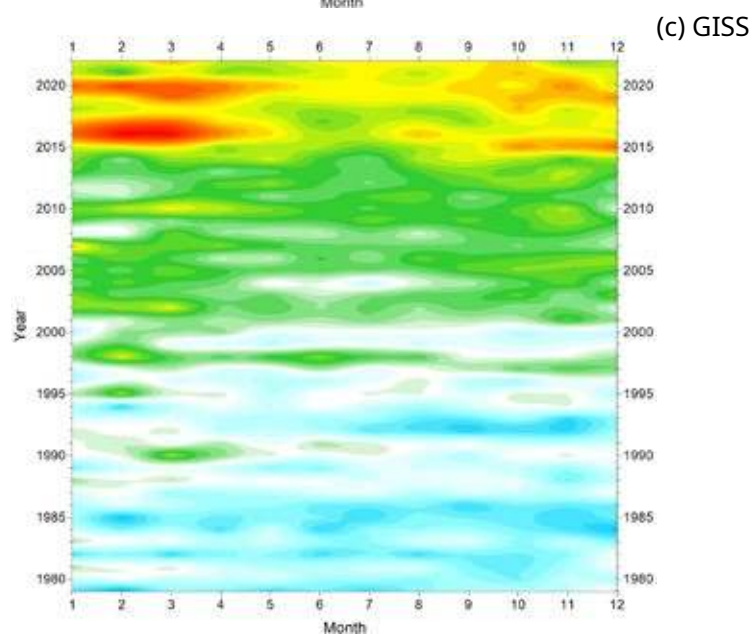
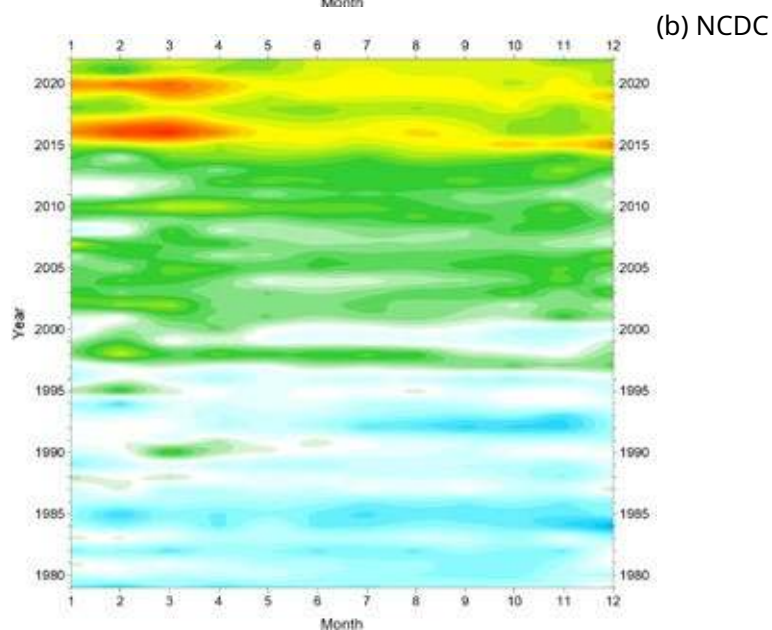
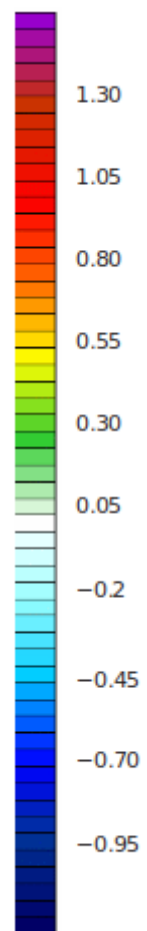


Figure 7 : Évolution temporelle des températures moyennes mensuelles de l'air en surface.

(a) HadCRUT (b) NCDC (c) GISS. Anomalie de température (°C) par rapport à 1979-2008.



Anomalie de température (°C)



Températures de surface : moyennes annuelles

Les trois séries de données de la température moyenne de l'air en surface montrent que l'année 2022 s'inscrit dans une

tendance à la baisse depuis 2016 (figure 8). L'année 2022 a été influencée par un épisode La Niña dans l'océan Pacifique (voir figure 22).

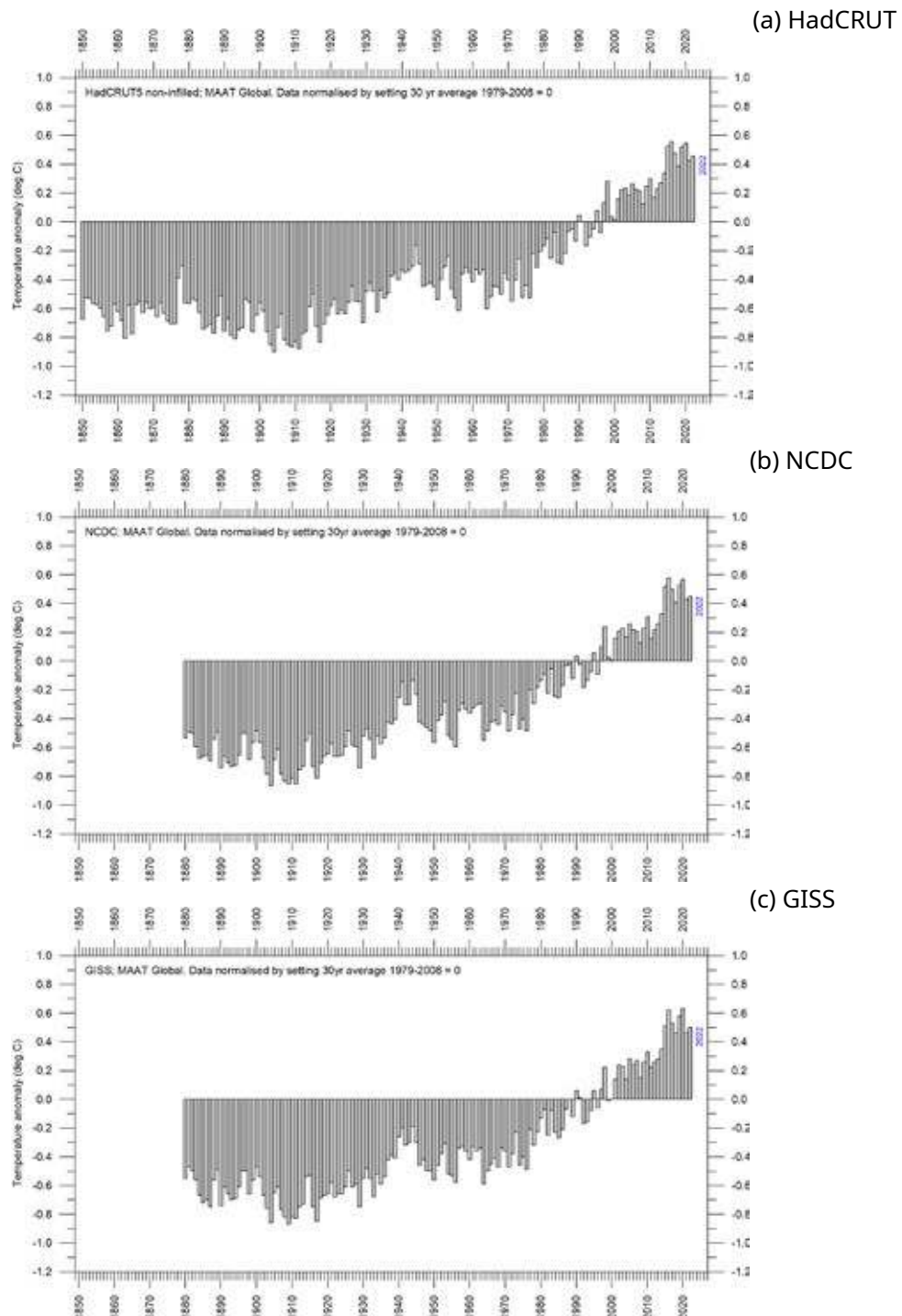


Figure 8 : Températures moyennes annuelles globales de l'air en surface.

(a) HadCRUT (b) NCDC (c) GISS anomalie de température (°C) par rapport à 1979-2008.

Erreur, cohérence et qualité

D'après les différents ensembles de données sur la température de l'air, 2022 a été une année chaude, si l'on considère l'ensemble des relevés sur la période 1850-1880 à 1979.

Les relevés de surface représentent un mélange de données de surface de la mer, collectées par des navires en mouvement ou par d'autres moyens, et de données provenant de stations terrestres, dont la qualité et la représentativité pour leur région sont en partie inconnues. De nombreuses stations terrestres ont également été déplacées géographiquement au cours de leur période d'exploitation, l'instrumentation a été modifiée et la plupart ont été influencées par les changements en cours dans leur environnement (végétation, bâtiments, etc.).

Les relevés de température par satellite ont leurs propres problèmes, mais ils sont généralement de nature plus technique et donc probablement plus faciles à rectifier. En outre, l'échantillonnage par satellite est plus régulier et plus complet à l'échelle mondiale que pour les relevés de surface. Il est également important de noter que les capteurs des satellites mesurent la température directement, par le rayonnement émis, alors que la plupart des mesures modernes de la température en surface sont indirectes, utilisant la résistance électronique.

Tous les relevés de température sont affectés par au moins trois sources d'erreur différentes, qui diffèrent selon les relevés individuels des stations utilisés pour le calcul d'une estimation de la température moyenne mondiale :

1. L'exactitude est définie par le degré de proximité d'une valeur mesurée par rapport à la valeur « réelle ».
2. La précision est la répétabilité, attribut selon lequel des mesures répétées dans des conditions inchangées indiquent la même valeur, vraie ou non.
3. La résolution est la plus petite variation de mesure qu'un appareil de mesure peut différencier.

La combinaison de ces trois chiffres est généralement ce que la « marge d'erreur » tente d'exprimer pour les relevés de température. La marge d'erreur a fait l'objet d'intenses discussions, et elle est probablement d'au moins $\pm 0,1$ °C pour les enregistrements de la température de l'air en surface, voire plus. De ce fait, il est souvent peu utile, d'un point de vue statistique, de classer une année comme ayant

battu un record, car plusieurs autres années peuvent se situer dans la fourchette de $\pm 0,1$ °C de la valeur considérée.

En outre, deux autres questions relatives à la marge d'erreur des relevés de surface n'ont pas reçu autant d'attention. Tout d'abord, à titre d'exemple, il ne sera pas possible de tirer de conclusions définitives sur la valeur réelle de la température globale de l'air en surface de décembre 2022 avant mars ou avril 2023, lorsque les données non encore communiquées seront intégrées dans les bases de données sur la température de l'air à la surface. C'est ce que l'on pourrait appeler l'effet "retard" dans la communication des données. Deuxièmement, les enregistrements de la température de l'air en surface sont souvent retraités au fil du temps, ce qui rend plus difficile encore l'interprétation des températures de l'air en surface mensuelles ou annuelles récemment rapportées.

Ces ajustements apparemment perpétuels des valeurs enregistrées dans les bases de données de température, ont pour conséquence le fait que ce qui a été rapporté comme la température moyenne globale pour une année changera plus tard. Cela n'a rien à voir, ou presque, avec un retard dans la communication des données : dans tous les ensembles de données (mais en particulier dans ceux du GISS et du NCDC), des modifications sont encore apportées à des années du passé lointain, remontant même au XIXe siècle, où la probabilité d'un retard dans la communication des données est extrêmement faible. Il s'agit probablement de l'effet des changements apportés à la manière dont les valeurs mensuelles moyennes sont calculées, dans le but d'améliorer l'enregistrement qui en résulte.

À titre d'exemple, la figure 9 montre l'effet cumulé depuis mai 2008 de ces changements « administratifs » dans l'enregistrement de la température de l'air à la surface du globe du GISS, remontant jusqu'à 1880, bien que n'importe quel autre ensemble de données puisse être utilisé à la place. L'effet net global des changements administratifs introduits dans l'enregistrement GISS depuis mai 2008 est un réchauffement de la partie précoce et moderne de l'enregistrement et un refroidissement de la période intermédiaire, en gros de 1900 à 1970. Plusieurs des changements nets introduits depuis 2008 sont assez importants, allant d'environ $+0,20$ à $-0,20$ °C.

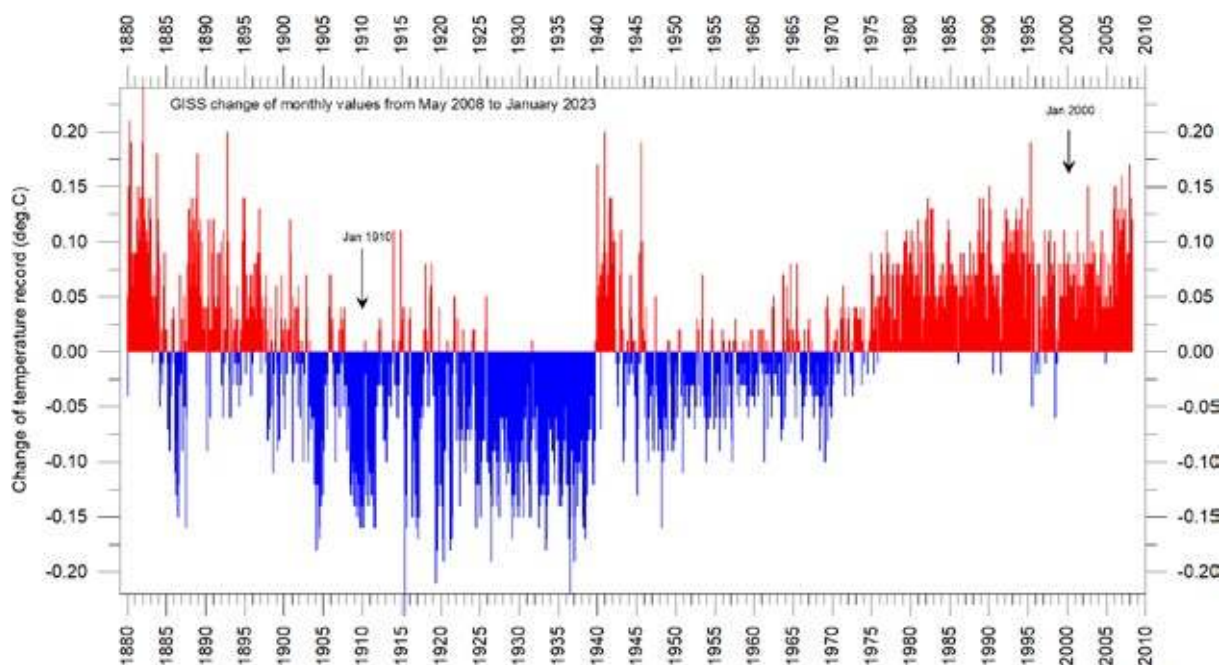


Figure 9 : Ajustements depuis le 17 mai 2008 dans l'enregistrement des températures de surface du GISS.

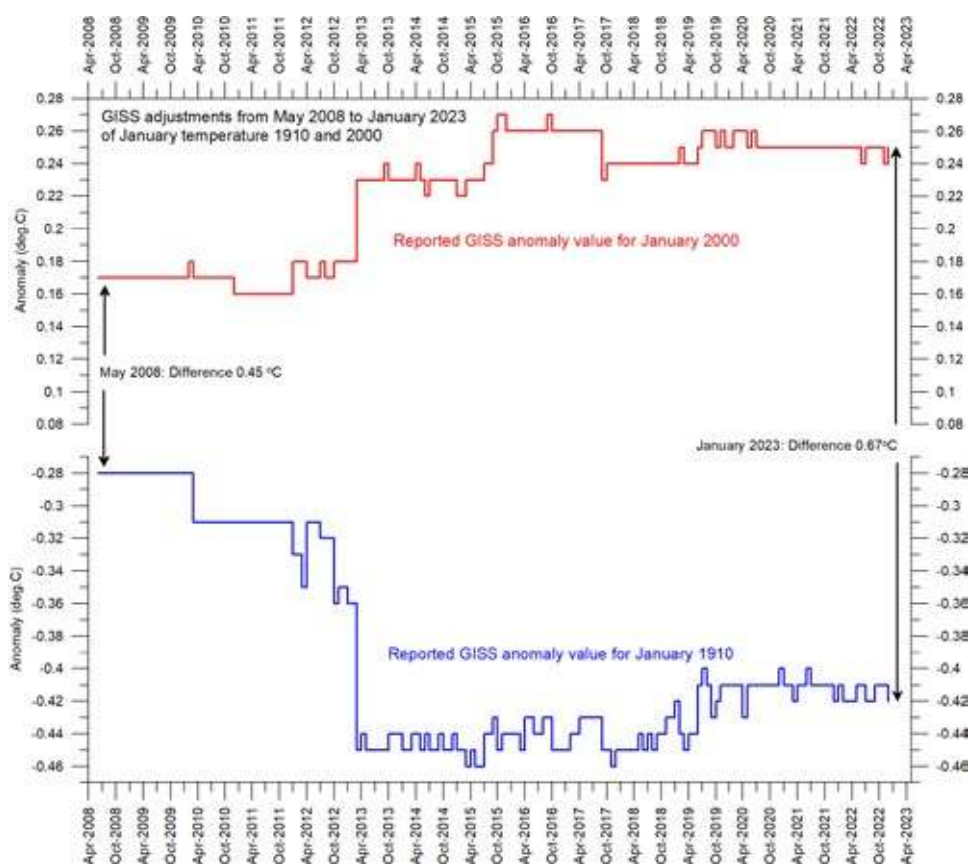


Figure 10 : Ajustements apportés depuis mai 2008 aux anomalies GISS pour les mois de janvier 1910 et janvier 2000.

Pour illustrer l'effet d'une autre manière, la figure 10 montre comment la température de l'air à la surface du globe pour janvier 1910 et janvier 2000 (mois indiqués dans la figure 15) a changé depuis mai 2008, encore une fois illustrée par les données du GISS. L'augmentation « administrative » du GISS a augmenté le réchauffement apparent des températures de l'air à la surface du globe entre janvier 1910 et janvier 2000, de 0,45 (tel que rapporté en mai 2008) à 0,67°C (tel que rapporté en janvier 2023). Cela représente une augmentation d'environ 49 % sur cette période, ce qui signifie que près de la moitié de l'augmentation apparente de la température mondiale entre janvier 1910 et janvier 2000 (telle que rapportée par le GISS en janvier 2023) est due à des ajustements apportés aux données originales depuis mai 2008. Il est clair que ces changements sont importants pour évaluer la qualité globale des différents enregistrements de température, ainsi que

d'autres sources d'erreur standard. En fait, l'ampleur des ajustements « administratifs » peut dépasser la marge d'erreur formelle.

Pour des raisons évidentes, comme le passé ne change pas, tout enregistrement subissant des changements continus ne peut pas décrire correctement le passé en permanence. Des corrections fréquentes et importantes dans une base de données signalent inévitablement une incertitude fondamentale quant aux valeurs correctes. Néanmoins, tous ceux qui s'intéressent à la science du climat devraient reconnaître avec gratitude les efforts déployés pour maintenir les différentes bases de données mentionnées dans le présent rapport. Dans le même temps, cependant, il est également important de réaliser que tous les relevés de température ne peuvent pas être de qualité scientifique égale. Le simple fait qu'ils diffèrent dans une certaine mesure montre qu'ils ne peuvent pas tous être complètement corrects.



Températures de surface et températures de la basse troposphère

Il y a en général une bonne cohérence entre les moyennes des données de surface et celles par satellite, comme le montre la Figure 11. Cependant, avant l'ajustement majeur de l'enregistrement satellitaire RSS en 2017, la situation était différente, la moyenne des températures de surface évoluant vers le haut par rapport aux données satellitaires. Encore une fois, cela illustre l'importance des changements continus apportés aux séries de données de température.

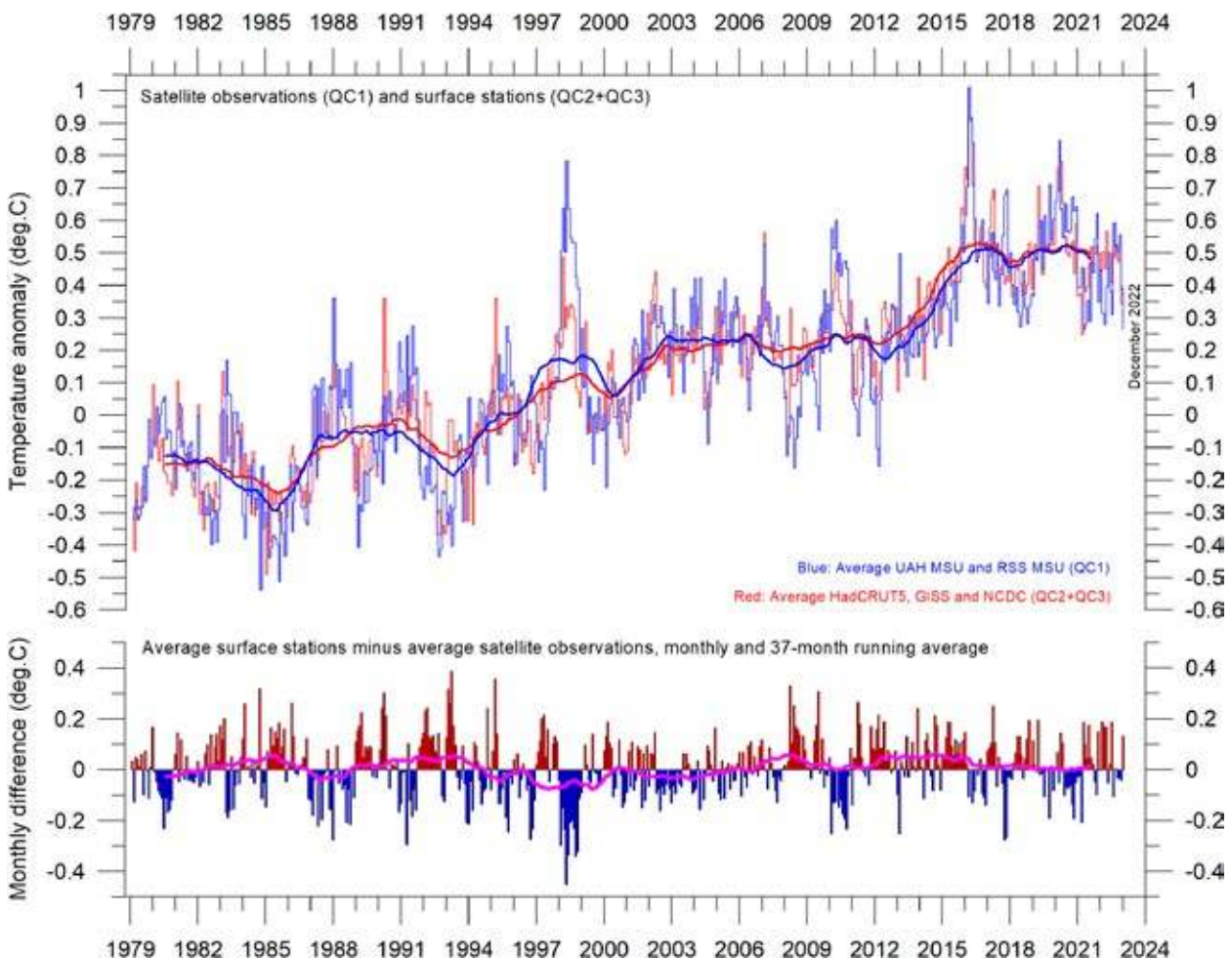


Figure 11 : Températures de surface par rapport aux températures de la troposphère inférieure.

Moyenne des estimations mensuelles de la température de l'air à la surface du globe (HadCRUT, NCDC et GISS) et des estimations de la température de la basse troposphère basées sur les satellites (UAH et RSS). Les lignes fines indiquent la valeur mensuelle, tandis que les lignes épaisses représentent la moyenne mobile simple sur 37 mois, correspondant quasiment à une moyenne mobile sur 3 ans. Le panneau inférieur montre la différence mensuelle entre la température de l'air en surface et les températures satellitaires. Comme la période de référence diffère pour les différentes estimations de température, elles ont toutes été normalisées en les comparant à la valeur moyenne de 30 ans, de janvier 1979 à décembre 2008.

Températures de la basse troposphère : terres et océans

Depuis 1979, la basse troposphère s'est réchauffée beaucoup plus sur les terres que sur les océans (figure 12). Il peut y avoir plusieurs causes à cela, comme les différences de capacité thermique, les variations du rayonnement solaire entrant, la couverture nuageuse et l'utilisation des terres.

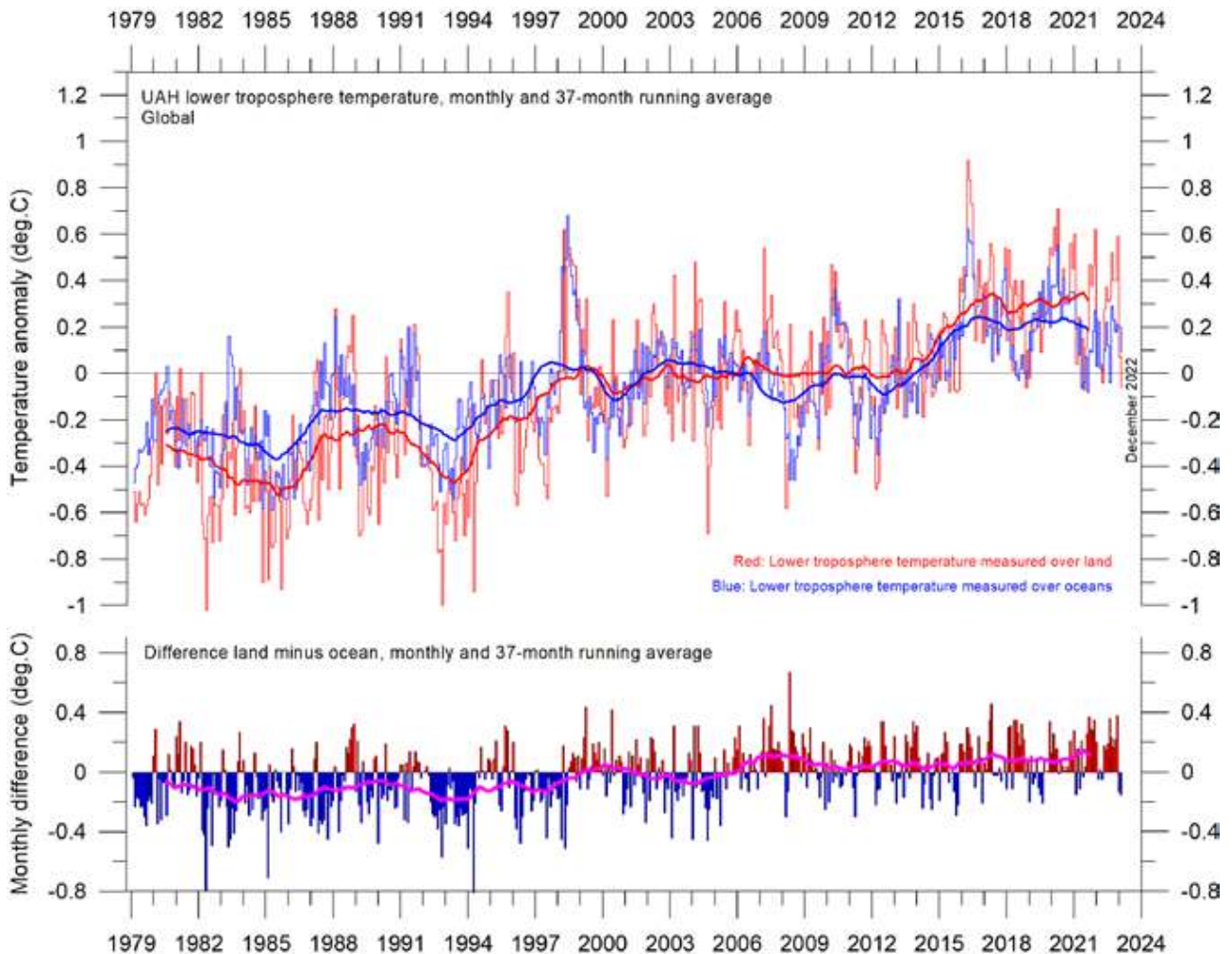


Figure 12 : Températures de la troposphère inférieure sur les terres et les océans

Moyenne mensuelle mondiale des températures de la troposphère inférieure depuis 1979, mesurées au-dessus des terres et des océans, en rouge et en bleu, respectivement, d'après les données de l'Université de l'Alabama à Huntsville (UAH), États-Unis. Les lignes fines représentent la moyenne mensuelle, et la ligne épaisse la moyenne mobile simple sur 37 mois, correspondant quasiment à une moyenne mobile sur 3 ans.

Températures selon l'altitude

Les changements dans le profil vertical de température de l'atmosphère sont intéressants pour plusieurs raisons. L'une d'entre elles est que l'augmentation des températures de la troposphère et la diminution des températures de la stratosphère sont deux éléments centraux de l'hypothèse selon laquelle le réchauffement climatique serait dû à l'augmentation anthropique du dioxyde de carbone atmosphérique induite par les activités humaines.

Les variations de température enregistrées dans la basse troposphère se retrouvent en général à des altitudes plus élevées, jusqu'à environ 10 km d'altitude, y compris les nombreux hauts et bas isolés comme le pic de température induit par le El Niño de 2015-16 (figure 13).

À haute altitude, près de la tropopause, le schéma des variations enregistrées plus bas dans

l'atmosphère peut encore être reconnu, mais pour la période d'enregistrement considérée (depuis 1979), on n'observe pas de tendance claire vers des températures plus élevées ou plus basses.

Plus haut dans l'atmosphère, dans la stratosphère, à 17 km d'altitude, deux pics de température prononcés sont visibles avant le début du siècle. Tous deux peuvent être liés à des éruptions volcaniques majeures, comme l'indique le diagramme. Si l'on ne tient pas compte de ces éruptions, l'enregistrement de la température stratosphérique montre, jusqu'en 1995 environ, une baisse persistante et marquée, attribuée par plusieurs scientifiques à l'effet de la chaleur piégée par le CO₂ dans la troposphère située en dessous.

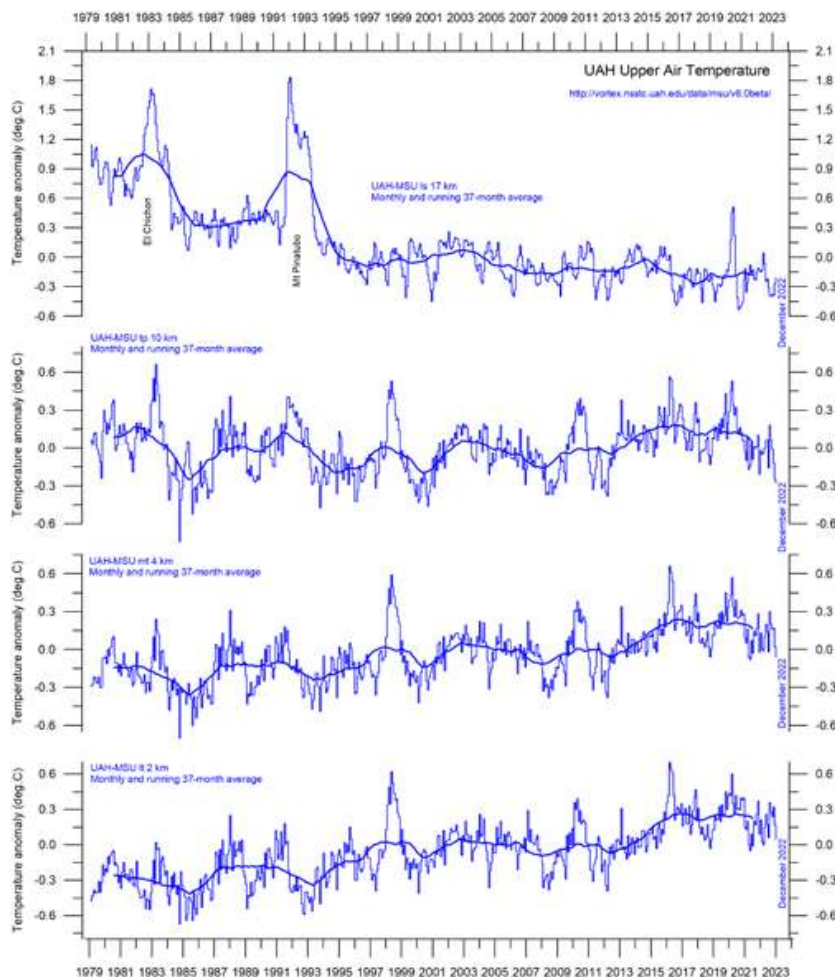


Figure 13 : Température en fonction de l'altitude.

Température moyenne mensuelle globale à différentes altitudes selon l'Université de l'Alabama à Huntsville (UAH), États-Unis. Les lignes fines représentent la moyenne mensuelle, et la ligne épaisse la moyenne mobile simple sur 37 mois, correspondant quasiment à une moyenne mobile sur 3 ans.

Cependant, le déclin marqué de la température stratosphérique se termine essentiellement vers 1995-96, et il y a eu un long plateau de température depuis cette époque. En 2020, cependant, un pic de température marqué, mais de courte durée, a été observé, rapidement

suivi d'une chute de température d'une ampleur similaire. Depuis la fin de l'année 2020, les températures stratosphériques sont essentiellement revenues aux niveaux d'avant 2020.

Températures zonales de l'air

La figure 14 montre que le réchauffement « global » observé après 1980 est un phénomène qui concerne principalement l'hémisphère nord, et s'est surtout manifesté par un changement progressif marqué entre 1994 et 1999. Ce changement rapide de température a toutefois été influencé par l'éruption du Mont Pinatubo de 1992-93 et par l'épisode El Niño de 1997.

La figure montre également comment les effets sur la température des puissants El Niños

équatoriaux de 1997 et 2015-16, ainsi que de l'El Niño modéré de 2019, se sont apparemment étendus à des latitudes plus élevées dans les deux hémisphères, bien qu'avec un certain décalage. L'effet a toutefois été principalement observé dans l'hémisphère nord, et seulement dans une moindre mesure dans l'hémisphère sud. La baisse récente des températures sous les tropiques (20°N-20°S) depuis 2016 est remarquable.

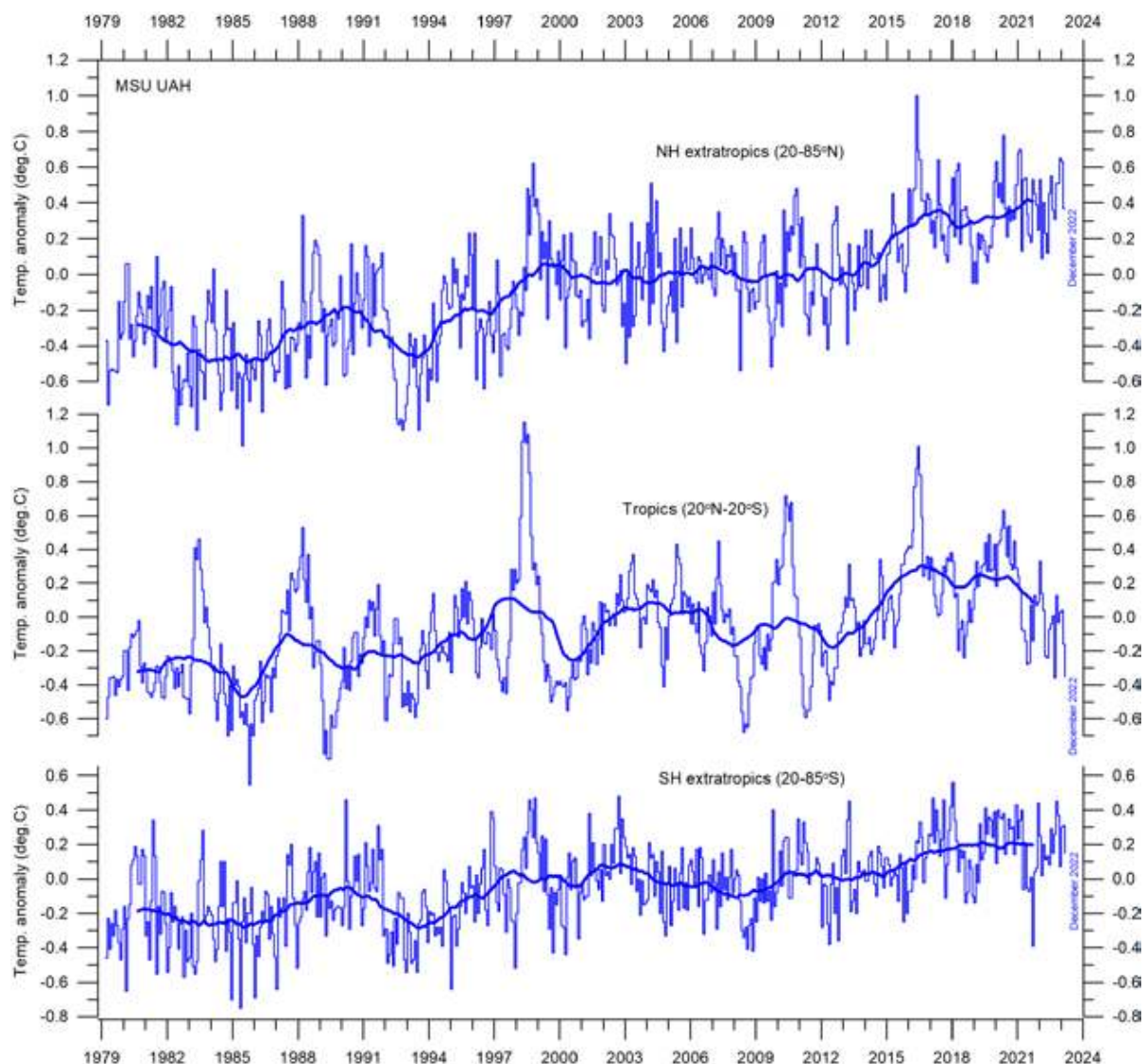


Figure 14 : Températures zonales de l'air.

Température moyenne mensuelle globale de la basse troposphère depuis 1979 pour les tropiques et les régions extra tropicales du nord et du sud, d'après l'Université de l'Alabama à Huntsville, États-Unis. Lignes fines : valeur mensuelle ; lignes épaisses : moyenne mobile sur 3 ans.

Températures de l'air polaire

Dans la région arctique, le réchauffement a été rapide au cours de la période 1994-1996, mais plus lent par la suite (figure 15). En 2016, cependant, les températures ont atteint des sommets pendant plusieurs mois, probablement en raison de la chaleur océanique transmise à l'atmosphère pendant le phénomène El Niño de 2015-16 (voir également la figure 22), qui a ensuite été poussée par advection vers des latitudes plus élevées. Une légère baisse des températures caractérise l'Arctique depuis 2016.

Dans la région de l'Antarctique, les températures sont restées stables depuis le

début de l'enregistrement par satellite en 1979. En 2016-17, un petit pic de température, visible dans les relevés mensuels, pourrait être interprété comme l'effet atténué du récent épisode El Niño.

Les pics de température dans l'Arctique et l'Antarctique liés aux épisodes El Niño, comme indiqué ci-dessus, sont paradoxalement dus à l'évacuation de la chaleur de l'océan Pacifique près de l'équateur. Ils représentent donc un processus de refroidissement de la Terre, lorsqu'ils sont considérés dans un contexte plus large.

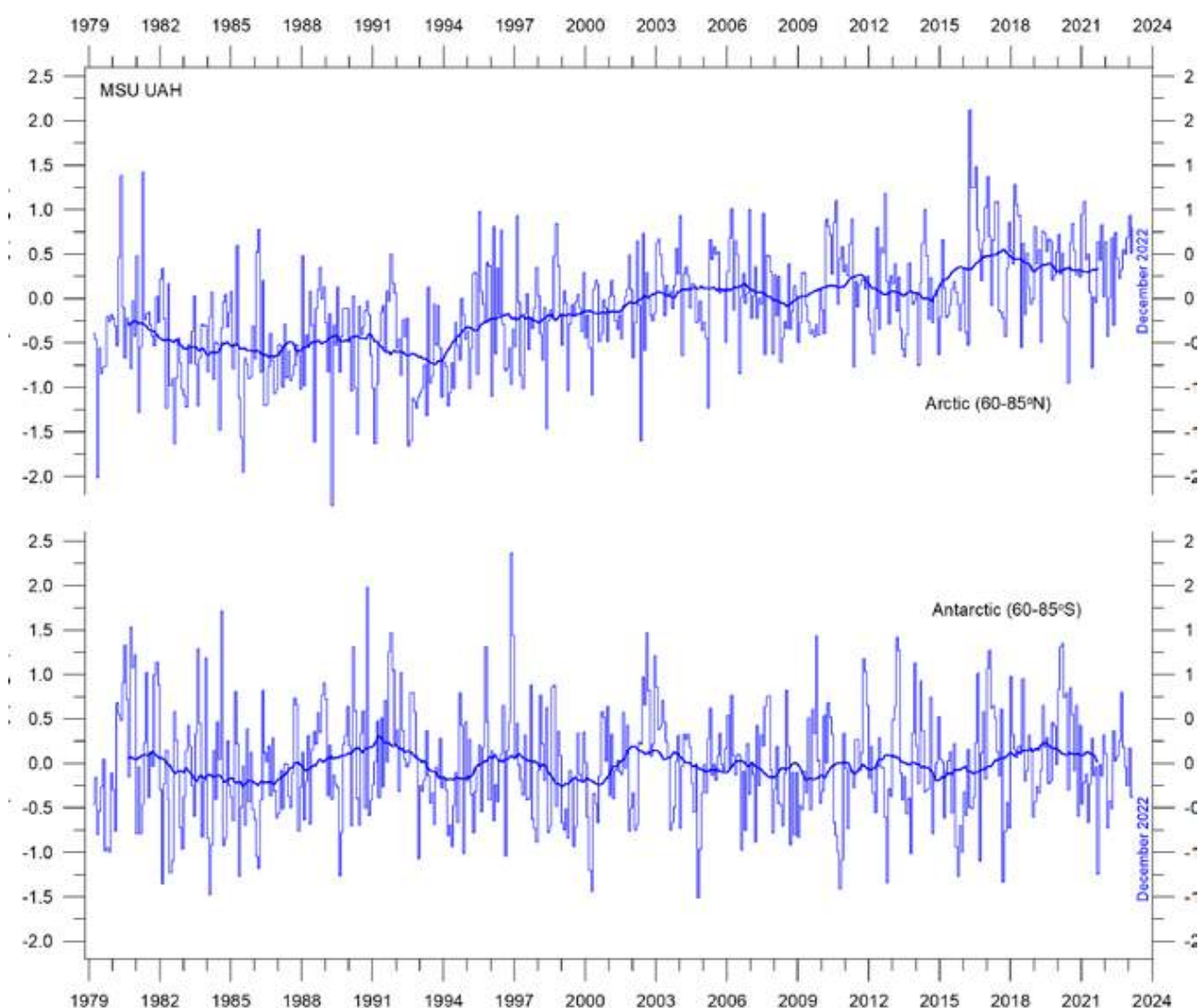


Figure 15 : Températures polaires

Moyenne mensuelle globale des températures de la troposphère inférieure depuis 1979 pour les régions des pôles Nord et Sud, d'après l'Université d'Alabama à Huntsville (UAH), États-Unis. Les lignes épaisses représentent la moyenne simple sur 37 mois.

2. Gaz à effet de serre dans l'atmosphère

Vapeur d'eau

La vapeur d'eau (H_2O) est le principal gaz à effet de serre dans la troposphère. La concentration la plus élevée se situe dans une fourchette latitudinale allant de $50^\circ N$ à $60^\circ S$. Les deux régions polaires de la troposphère sont relativement sèches. H_2O est un gaz à effet de serre beaucoup plus important que le CO_2 , à la fois en raison de son spectre d'absorption et de sa concentration plus élevée.

La figure 16 montre que l'humidité atmosphérique spécifique est stable ou en légère augmentation jusqu'à environ 4-5 km d'altitude. À des niveaux plus élevés de la troposphère (environ 9 km), l'humidité spécifique a diminué pendant toute la durée de l'enregistrement

(depuis 1948), mais avec des variations plus courtes superposées à la tendance à la baisse. Une analyse de la fréquence de Fourier (non montrée ici) suggère que ces changements sont influencés, non seulement par des variations annuelles, mais aussi par un cycle d'une durée d'environ 35 ans.

La diminution globale depuis 1948 de l'humidité spécifique à environ 9 km d'altitude est remarquable, car cette altitude correspond à peu près au niveau où l'effet théorique sur la température de l'augmentation du CO_2 atmosphérique est censé se manifester dans un premier temps.

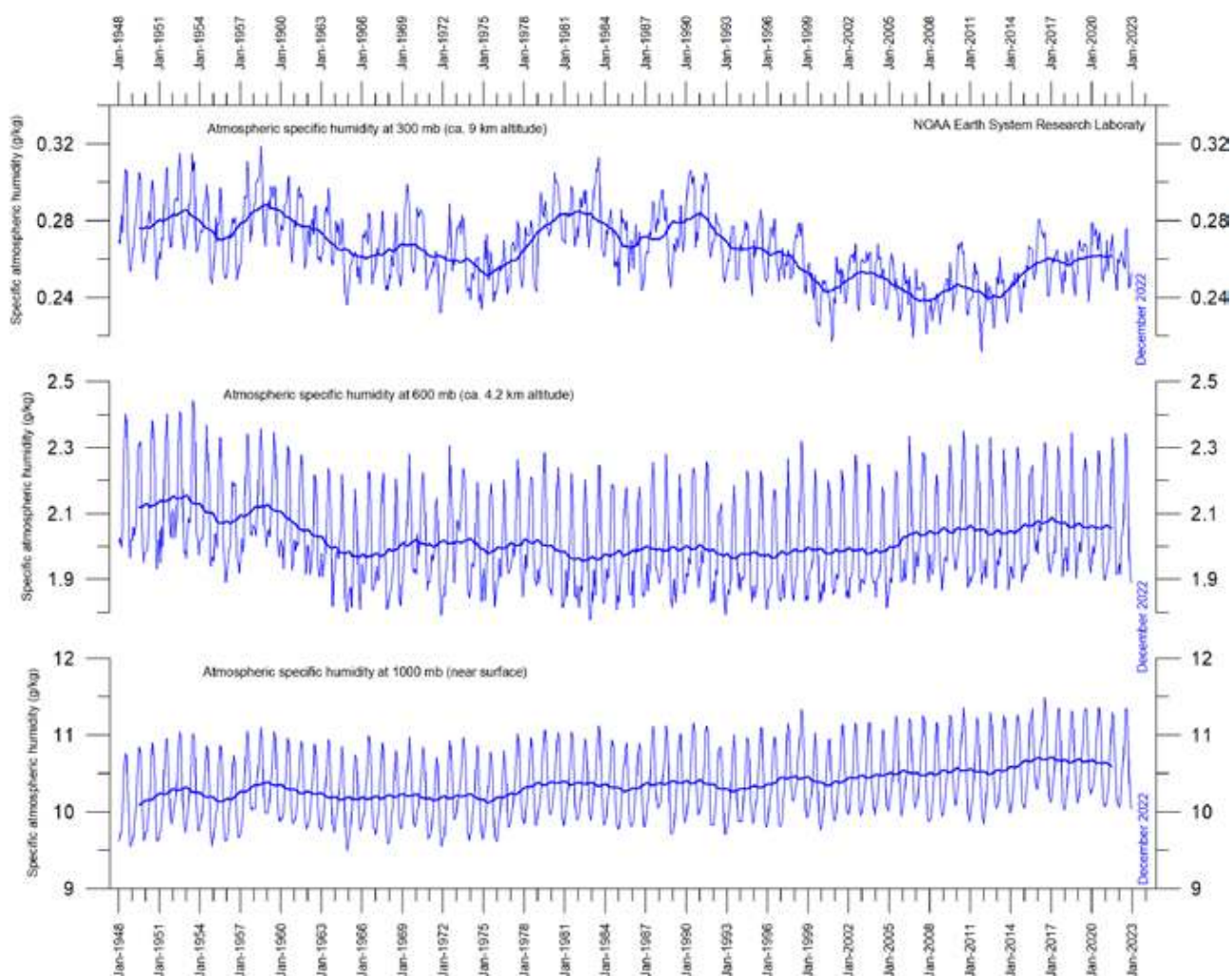


Figure 16 : Humidité.

Humidité atmosphérique spécifique (g/kg) à trois altitudes différentes dans la troposphère depuis janvier 1948. Les lignes bleues fines indiquent les valeurs mensuelles, tandis que les lignes bleues épaisses indiquent la moyenne sur 37 mois (environ 3 ans). Source des données : Earth System Research Laboratory (NOAA).

Dioxyde de carbone

Le dioxyde de carbone (CO_2) est un gaz à effet de serre important, bien que moins important que le H_2O . Depuis 1958, on observe une tendance à l'augmentation de sa concentration dans l'atmosphère, à laquelle se superpose un cycle annuel. Fin 2021, la quantité de CO_2 atmosphérique était proche de 419 parties par million (ppm ; figure 17). Le CO_2 est généralement considéré comme un gaz relativement bien mélangé dans la troposphère.

La variation sur 12 mois du CO_2 troposphérique a augmenté d'environ +1 ppm/an au début de l'enregistrement, à environ +2,6 ppm/an vers la fin de l'enregistrement (Figure 18). Une analyse de la fréquence de Fourier (non montrée ici) montre que la variation

sur 12 mois du CO_2 troposphérique est influencée en particulier par une variation périodique significative d'une durée de 3,6 ans. Il n'y a pas d'effet visible du blocage mondial COVID-19 pour 2020-2021 sur la quantité de CO_2 atmosphérique.

Il est intéressant de considérer la variation des taux de variation annuelle du CO_2 atmosphérique et des températures globales de l'air et de la surface de la mer (figure 19). Les trois taux varient clairement de concert, mais les températures à la surface de la mer ont quelques mois d'avance sur la température globale et 11 à 12 mois d'avance sur le CO_2 atmosphérique. Les changements importants semblent provenir de la surface de la mer.

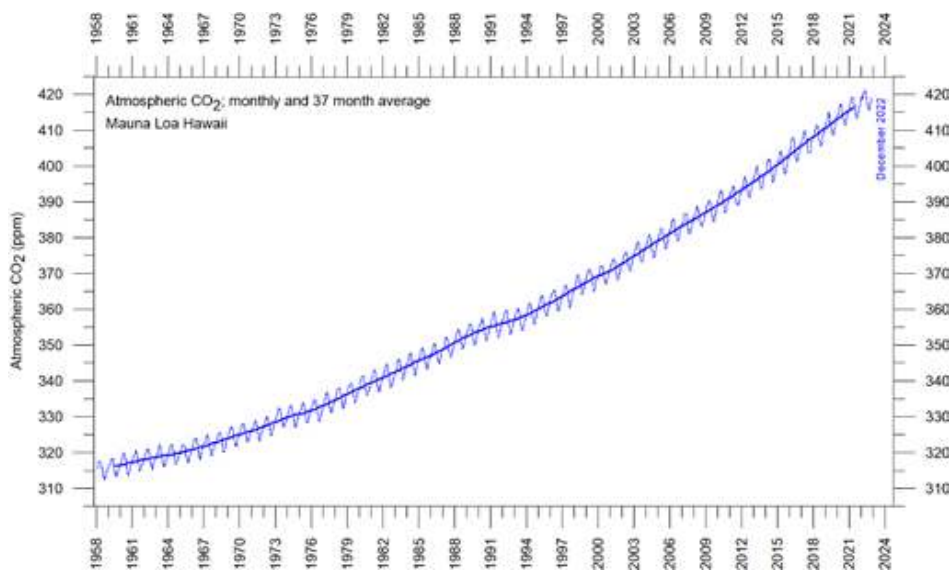


Figure 17 :
L'enregistrement du CO_2
à Mauna Loa

Lignes fines : valeur
mensuelle ; lignes
épaisses : moyenne
mobile sur 37 mois.

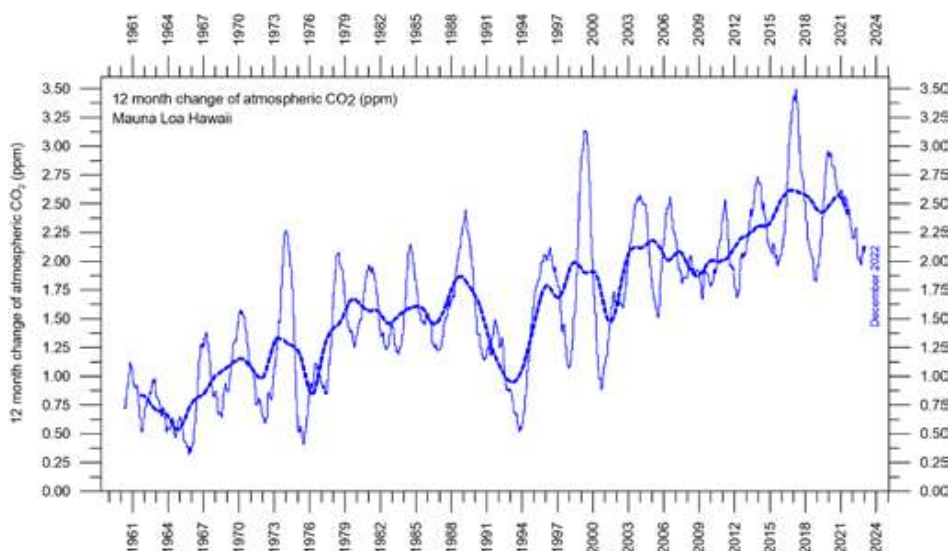


Figure 18 : Variation
annuelle du CO_2

Différence entre deux
moyennes sur 12 mois.
Lignes fines : valeur
mensuelle ; lignes
épaisses : moyenne
mobile sur 3 ans.

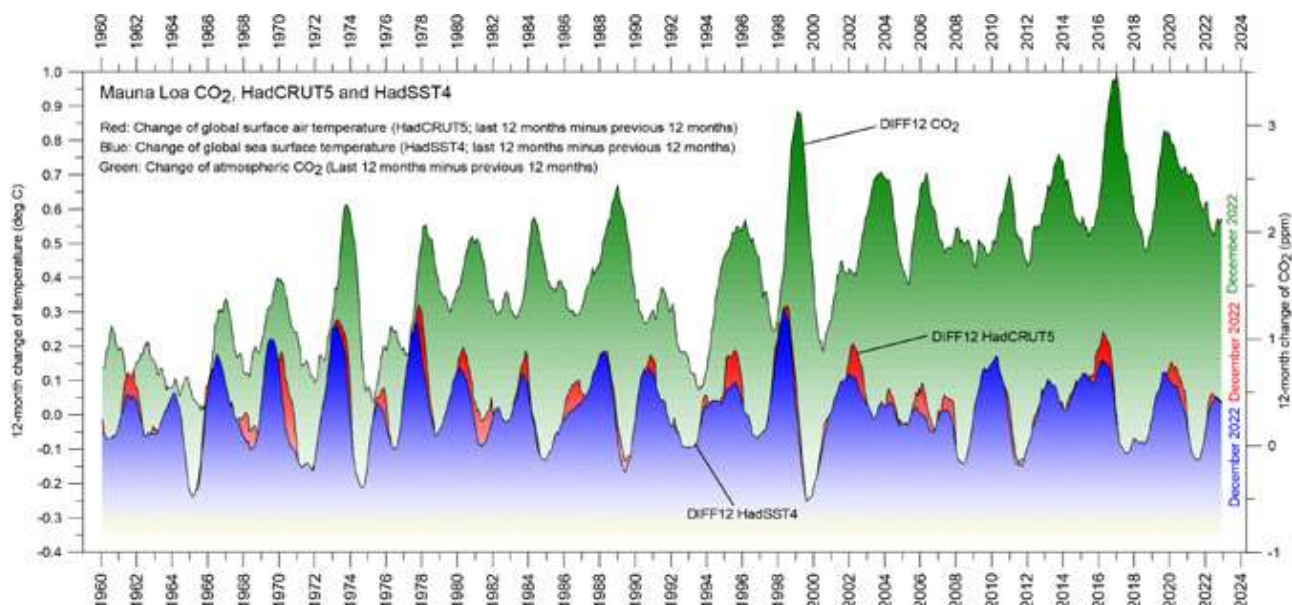


Figure 19 : Corrélation entre les concentrations de dioxyde de carbone et les relevés de température.

Variation annuelle (12 mois) de la concentration atmosphérique globale de CO₂ (Mauna Loa ; vert), de la température globale de surface de la mer (HadSST4 ; bleu) et de la température globale de l'air de surface (HadCRUT5 ; rouge). Tous les graphiques montrent les valeurs mensuelles de DIFF12, la différence entre la moyenne des 12 derniers mois et la moyenne des 12 mois précédents pour chaque série de données.

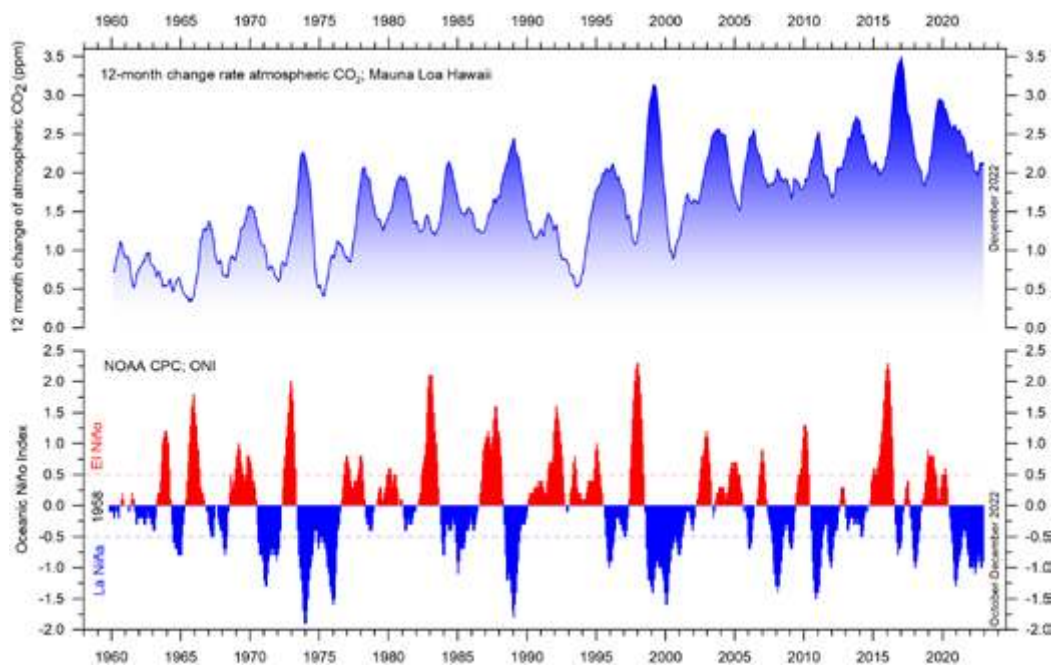


Figure 20 : Croissance du CO₂ et épisodes El Niño et La Niña

Association visuelle entre le taux de croissance annuel du CO₂ atmosphérique (panneau supérieur) et l'indice océanique Niño (panneau inférieur).

La figure 20 montre le changement annuel du CO₂ atmosphérique et son association avec les épisodes La Niña et El Niño, soulignant

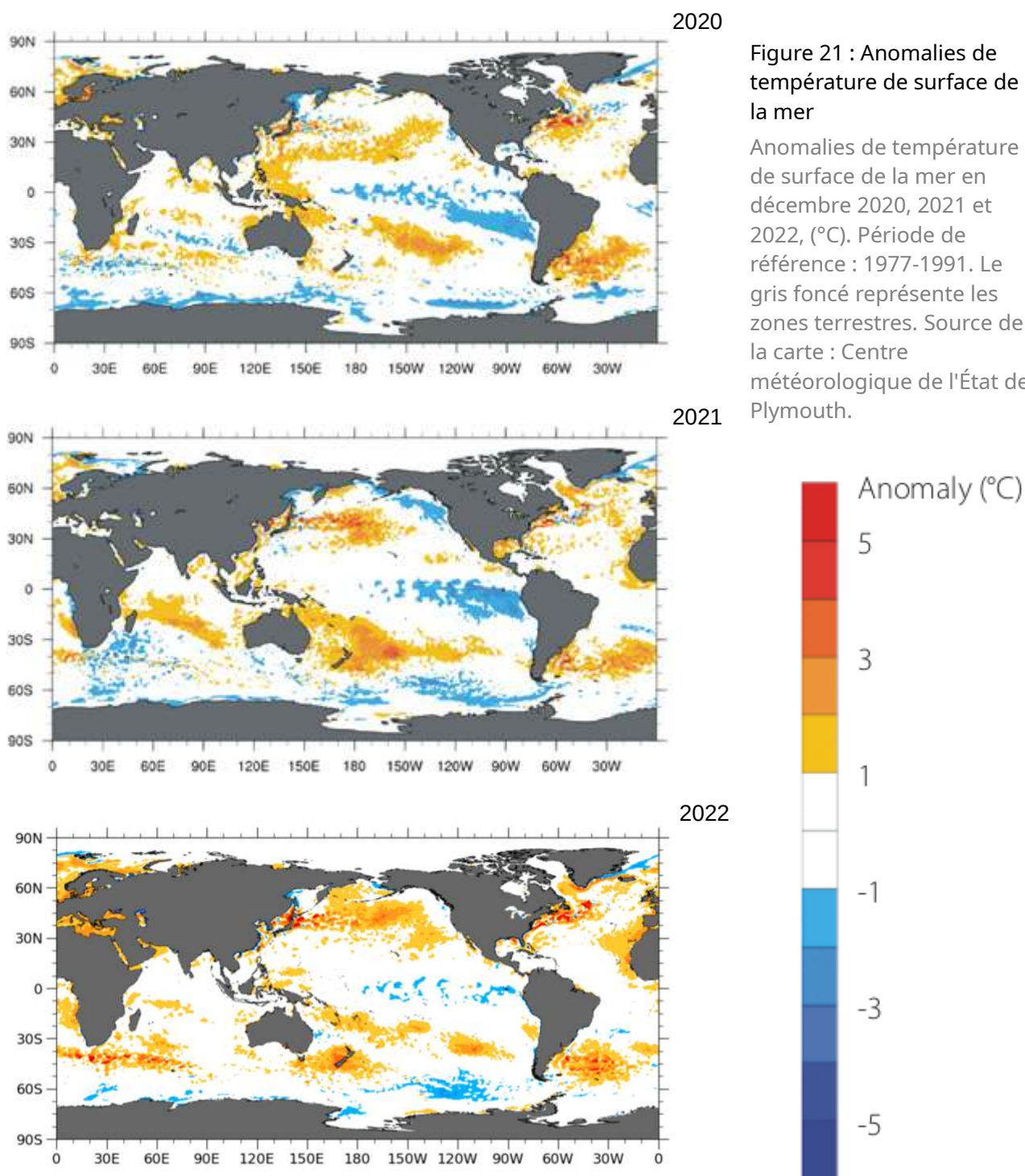
l'importance de la dynamique des océans pour comprendre les changements du CO₂ atmosphérique.

3. Températures de l'océan

Anomalies récentes de la température de surface

Les trois cartes de la figure 21 montrent l'épisode La Niña modéré qui a caractérisé une grande partie des années 2020 et 2021, et ses effets quelque peu atténués à la fin de l'année 2022. La figure 22 montre tous les épisodes El Niño et La Niña depuis 1950. L'épisode El Niño de 2015-16 est l'un des plus forts depuis le début

des relevés, en 1950, et correspond au pic de température mondiale de 2016 (figures 6, 7 et 12-14). Toutefois, si l'on considère l'ensemble des données, les variations récentes des épisodes El Niño et La Niña ne semblent pas anormales.



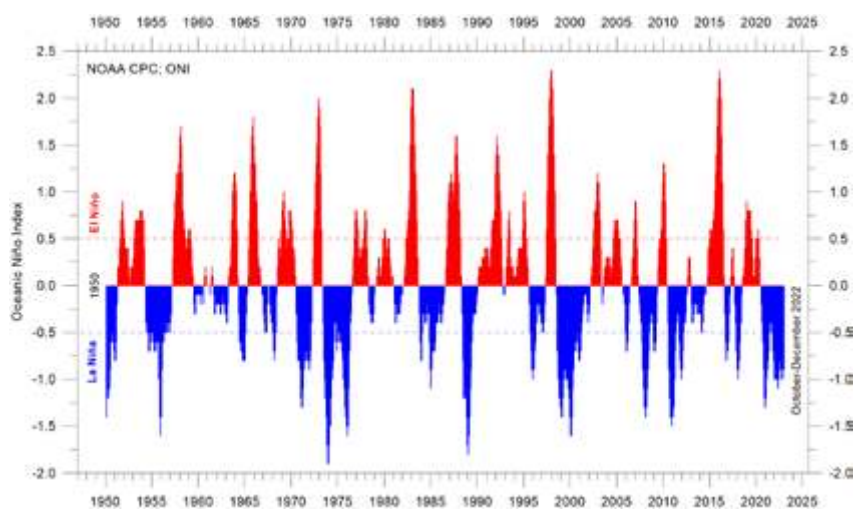
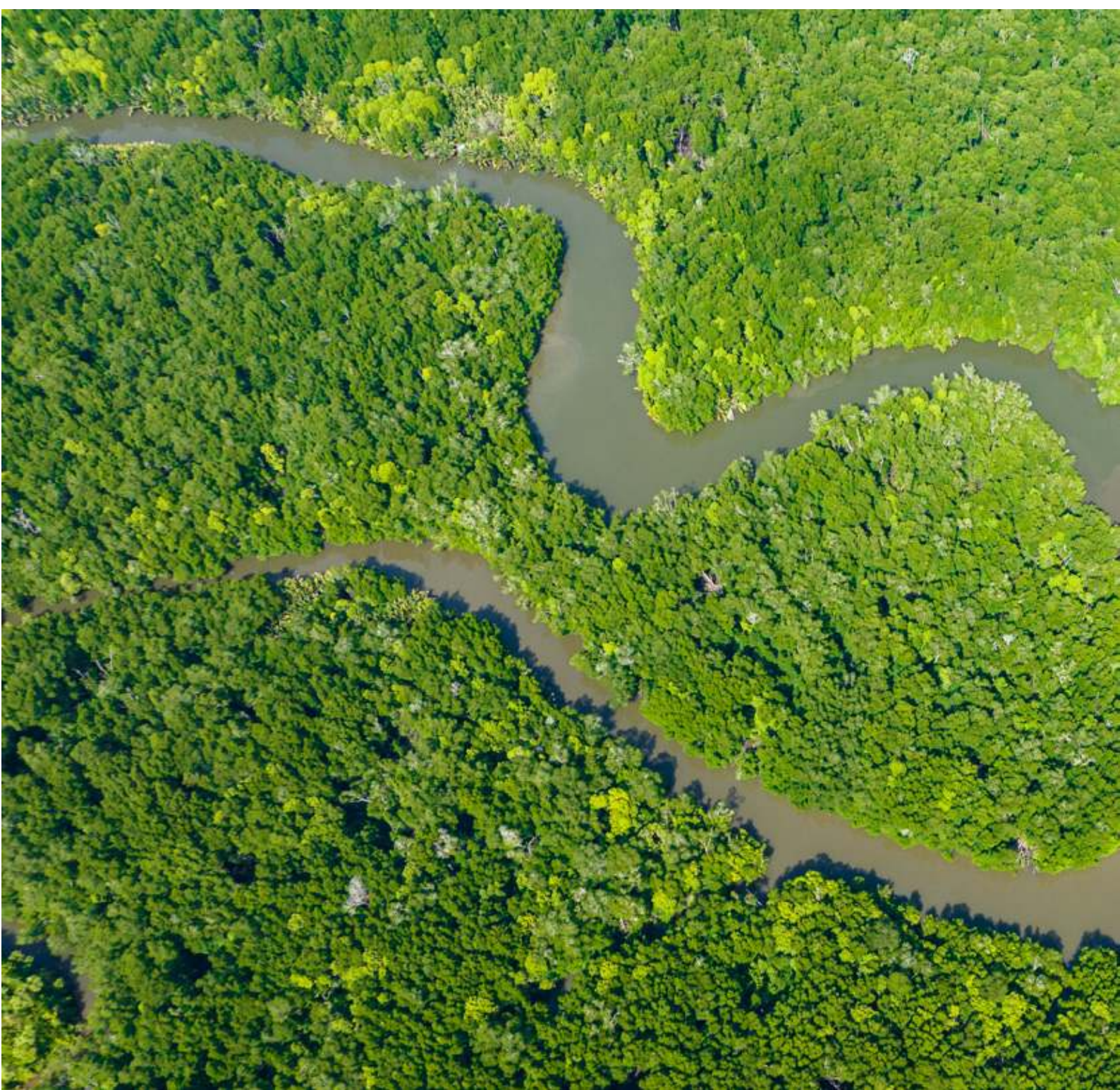


Figure 22 : L'indice El Niño

Épisodes chauds et froids pour l'indice océanique Niño (ONI), défini comme suit : moyenne mobile sur 3 mois des anomalies SST ERSST.v5 dans la région du Niño 3.4 (5°N-5°S, 120°-170°W). Les anomalies sont centrées sur des périodes de référence de 30 ans, mises à jour tous les 5 ans.



Par latitude

Basé sur les observations des flotteurs Argo (Roemmich et Gilson 2009), le schéma récapitulatif mondial ci-dessus (Figure 23) montre qu'en moyenne, la température des océans mondiaux jusqu'à 1900 m de profondeur augmente depuis 2010 environ. On peut également constater que cette augmentation depuis 2013 est principalement due aux

changements océaniques qui se produisent près de l'équateur, entre 30°N et 30°S. En revanche, pour les océans circumarctiques, au nord de 55°N, les températures océaniques intégrées en profondeur ont diminué depuis 2011. Près de l'Antarctique, au sud de 55°S, les températures sont essentiellement stables. À la plupart des latitudes, on observe un rythme annuel clair.

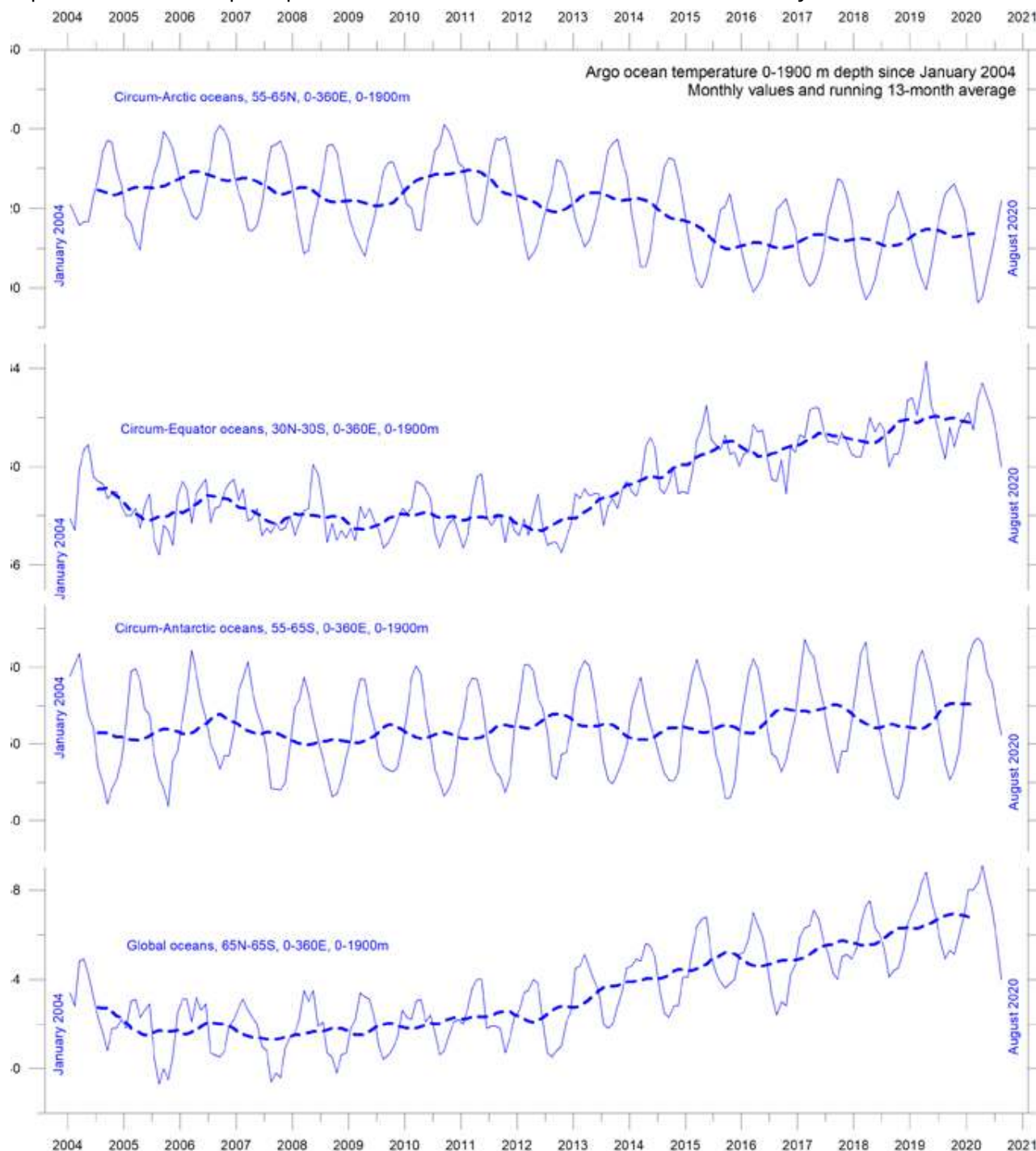


Figure 23 : Températures de l'océan jusqu'à 1900 m

Températures moyennes de l'océan de janvier 2004 à août 2020 à une profondeur de 0 à 1900 m dans des bandes latitudinales sélectionnées, d'après les données Argo. La ligne fine indique les valeurs mensuelles, et la ligne pointillée épaisse indique la moyenne sur 13 mois. Source : Global Marine Argo Atlas : Atlas mondial marin Argo.

Par profondeur

La figure 24 présente les températures océaniques moyennes mondiales à différentes profondeurs. Un rythme annuel peut être suivi jusqu'à environ 100 m de profondeur. Dans les 100 m les plus élevés, les températures ont augmenté depuis 2011 environ. À 200-400 m de profondeur, les températures ont peu évolué au cours de la période d'observation.

Pour les profondeurs inférieures à 400 m, cependant, les températures ont augmenté au

cours de la période d'observation. Il est intéressant de noter que les données suggèrent que cette augmentation a commencé à 1900 m de profondeur vers 2009, et qu'à partir de là, elle s'est progressivement étendue vers le haut. À 600 m de profondeur, l'augmentation actuelle de la température a commencé vers 2012, c'est-à-dire environ trois ans plus tard qu'à 1900 m de profondeur. Le calendrier de ces changements montre que les températures moyennes dans la

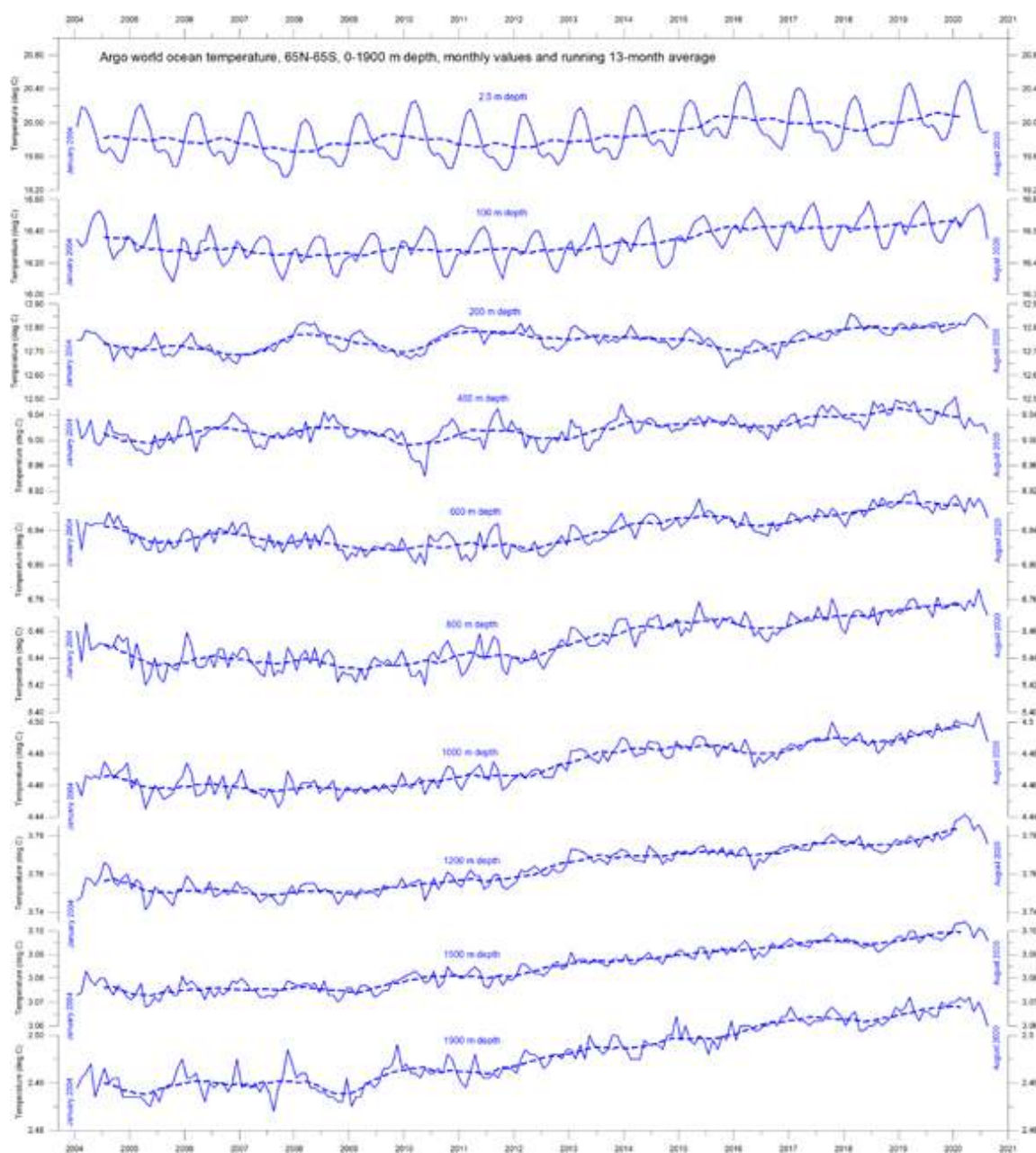


Figure 24 : Températures de l'océan à différentes profondeurs

Températures de l'océan de janvier 2004 à août 2020 à différentes profondeurs entre 65°N et 65°S, d'après les données Argo. La ligne fine indique les valeurs mensuelles et la ligne pointillée la moyenne sur 13 mois. Source : Global Marine Argo Atlas : Atlas mondial marin Argo.

partie supérieure des océans, à 1900 m de profondeur, ne sont pas seulement influencées par les conditions qui règnent à la surface de l'océan ou à proximité, mais aussi par des processus qui se déroulent à des profondeurs supérieures à 1900 m. Par conséquent, une partie du réchauffement actuel des océans semble être due à des changements de la circulation qui ont lieu à des profondeurs inférieures à 1900 m, et n'est donc pas directement liée à des processus qui se déroulent à la surface ou à proximité de la surface. Cette évolution est également illustrée par la figure 25, qui montre les changements nets des températures océaniques mondiales à différentes profondeurs, calculés comme la différence nette entre deux moyennes sur 12 mois : pour janvier-décembre 2004 et pour septembre 2019-août 2020. On constate que les changements nets les plus importants se sont

produits dans les 200 m supérieurs de la colonne d'eau. Cependant, ces valeurs moyennes, bien qu'importantes, cachent également de nombreux détails régionaux intéressants. Ceux-ci sont examinés dans la section suivante.

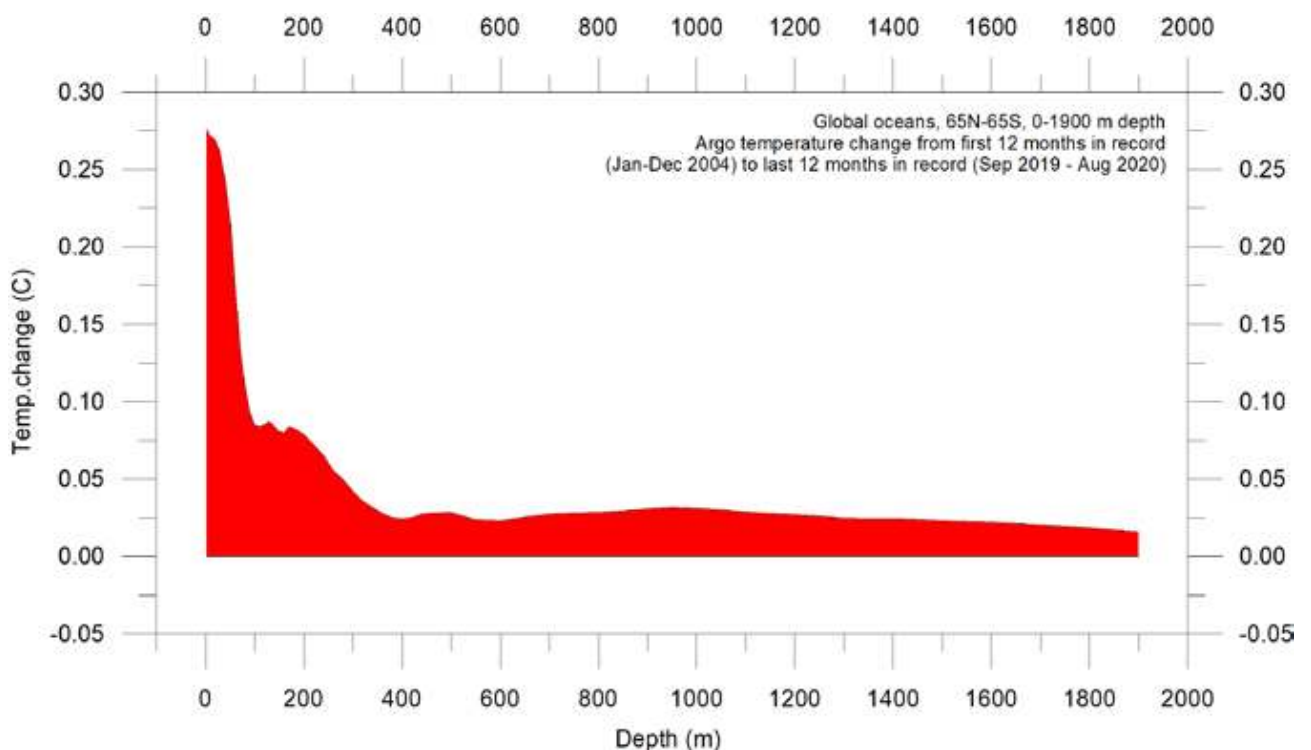


Figure 25 : Changements de température de 0 à 1900 m

Changement net de la température de l'océan mondial depuis 2004, de la surface à 1900 m de profondeur, d'après les données Argo. Source : Global Marine Argo Atlas : Atlas mondial Argo marin.

Par région et par profondeur

La figure 26 montre la variation des changements nets de la température océanique entre les deux mêmes périodes de 12 mois que dans la dernière section, pour différentes profondeurs et pour trois bandes de latitude différentes, représentant respectivement les océans Arctique (55-65°N), Équatorial (30N-30°S) et Antarctique (55-65°S). Le réchauffement net de la surface du globe illustré à la figure 25 affecte les océans équatoriaux et antarctiques, mais pas les océans arctiques. En fait, le refroidissement net est prononcé jusqu'à 1400 m de profondeur pour les océans du Nord. Cependant, une grande partie des terres émergées de la planète se trouve dans l'hémisphère nord, de sorte que la surface (et le volume) des océans "arctiques" est beaucoup plus petite que celle des océans

"antarctiques", qui sont eux-mêmes plus petits que les océans "équatoriaux". En fait, la moitié de la surface de la planète (terre et océan) est située entre 30°N et 30°S.

Néanmoins, le contraste entre les changements nets de température pour les différentes bandes latitudinales est instructif. Pour les deux océans polaires, les données Argo semblent suggérer l'existence d'une bascule bipolaire, telle que décrite par Chylek et al. (2010). Il n'est pas moins intéressant que la température océanique proche de la surface dans les deux océans polaires contraste avec le développement général de la glace de mer dans les deux régions polaires (voir plus loin dans ce rapport).

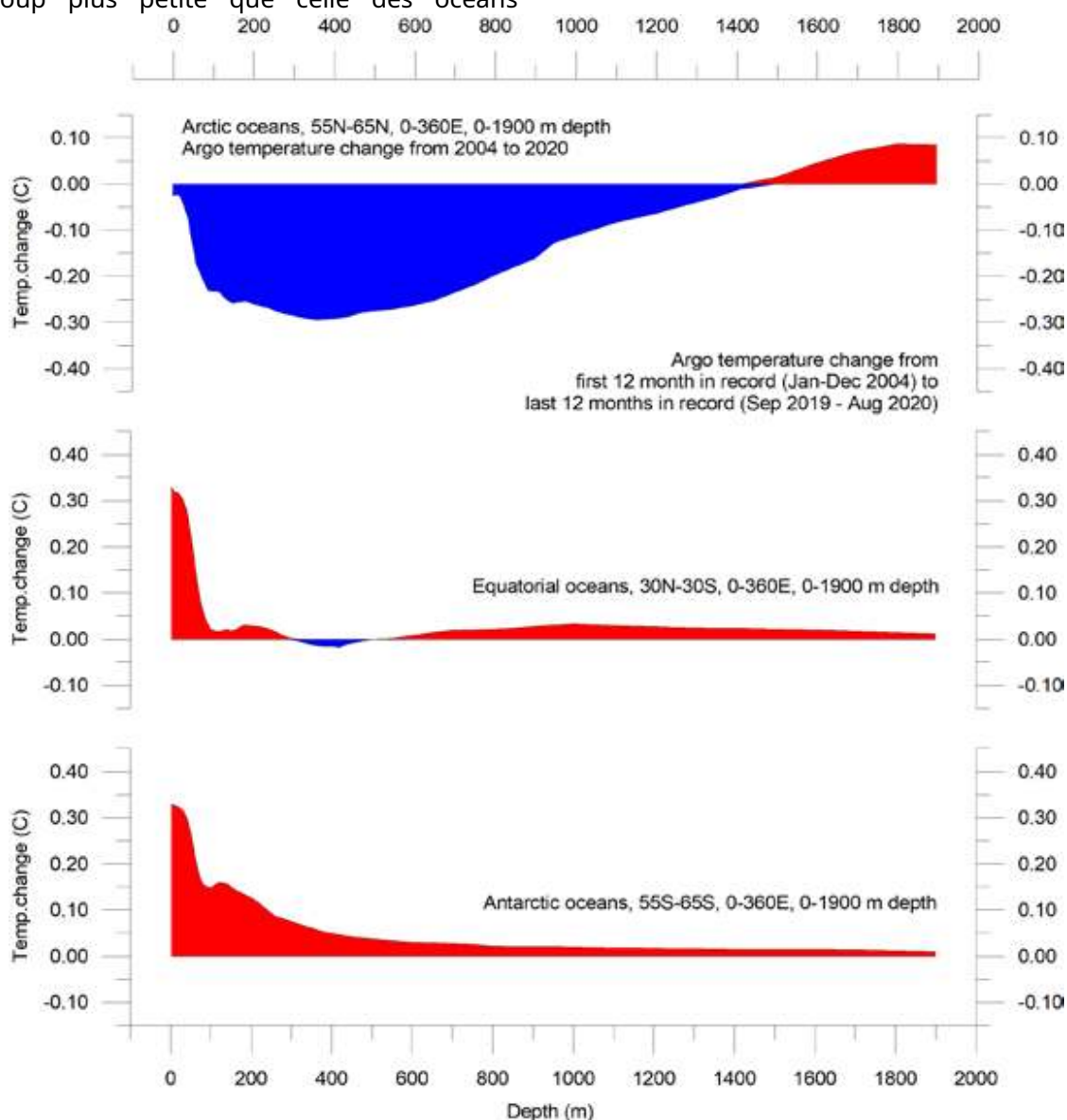


Figure 26 : Changements de température 0-1900 m

Changement net de la température de l'océan mondial depuis 2004, de la surface à 1900 m de profondeur. Source : Global Marine Argo Atlas : Atlas mondial Argo marin.

Changement net de la température de l'océan entre 2004 et 2020 dans certains secteurs

La figure 28a montre les changements nets de température au cours de la période 2004-2019 le long de 20°W, représentant l'océan Atlantique. Pour préparer le diagramme, les températures moyennes de l'océan sur 12 mois pour 2019 ont été comparées aux températures moyennes annuelles pour 2004, représentant les 12 premiers mois de l'enregistrement Argo. Cependant, les données Argo s'étendent jusqu'en août 2020, et donc, pour donner un aperçu des changements les plus récents, le changement net sur 12 mois de septembre 2019 à août 2020 est indiqué dans le diagramme du bas (figure 28b). Les couleurs chaudes indiquent un réchauffement net et les couleurs bleues un refroidissement. En raison de la forme sphérique de la Terre, les latitudes élevées représentent des volumes d'océan plus petits que les latitudes plus basses près de l'équateur. En gardant cette réserve à l'esprit, les données le long du transect atlantique révèlent néanmoins plusieurs caractéristiques intéressantes.

Le trait le plus marquant du profil 2004-2019 est un refroidissement net marqué de la surface au nord de l'équateur, en particulier au nord de

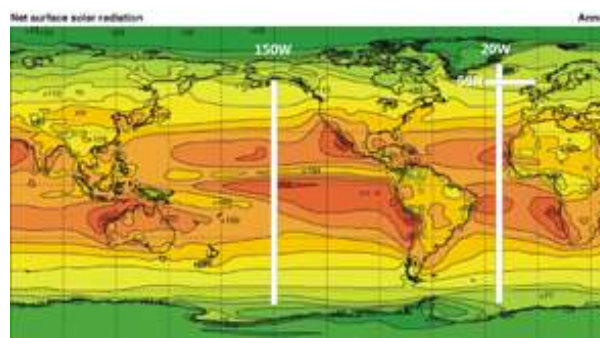


Figure 27 : Localisation des trois profils

Moyenne annuelle du rayonnement solaire net de surface (W/m²), et localisation des trois profils discutés ci-dessous.

45°N. Les couches plus profondes, jusqu'à 1500 m de profondeur, sont concernées. Au niveau et au sud de l'équateur, le réchauffement net domine à la surface, mais il y a un refroidissement net à 50-300 m de profondeur. Le réchauffement net maximal est observé entre 5°N et 25°S et concerne les eaux peu profondes, jusqu'à environ 50 m. Un réchauffement est également observé aux latitudes comprises entre 10°S et 45°S, entre 200 et 1200 m de profondeur.

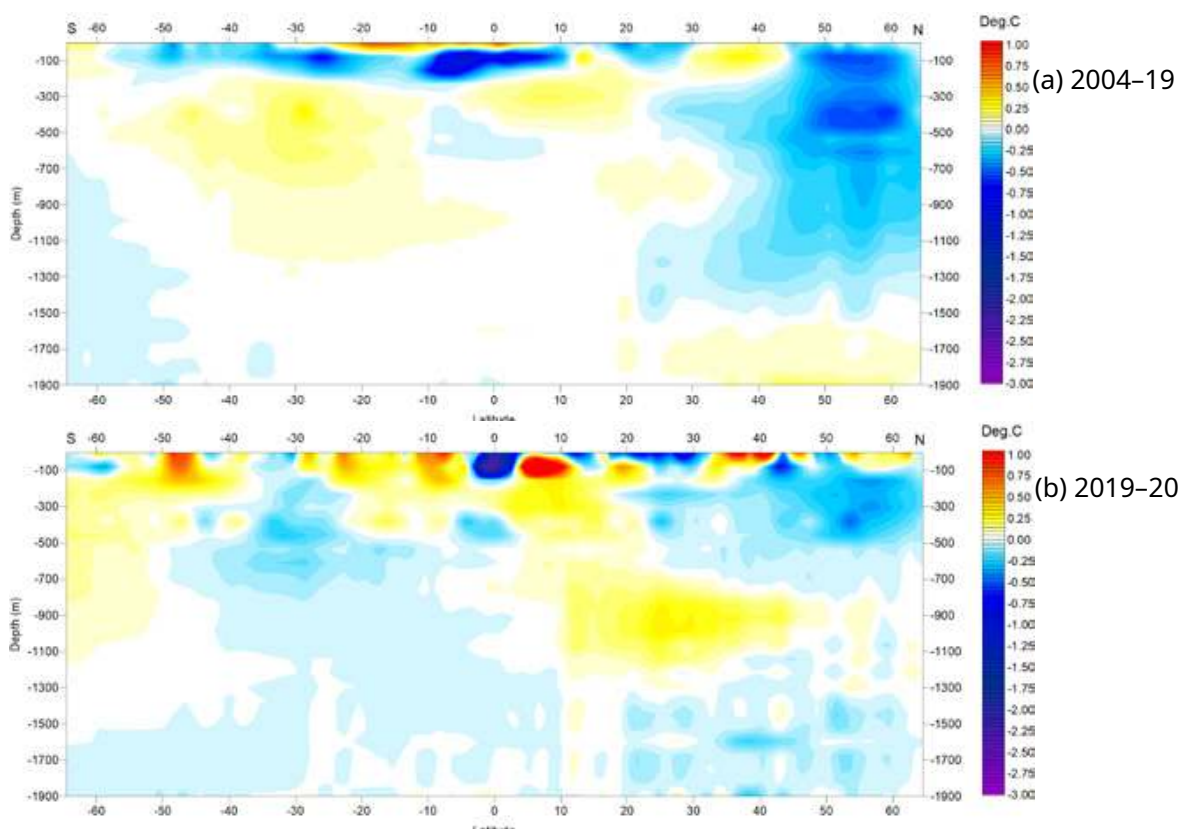


Figure 28 : Changement de température le long du profil atlantique, 0-1900 m

(a) 2004-2020 et (b) 19 septembre-20 août. Voir la figure 27 pour la localisation géographique du transect. Source des données : Global Marine Argo Atlas.

L'évolution de la température au cours des 12 derniers mois de l'enregistrement (figure 28b) présente un schéma plus complexe, en particulier près de la surface. Cependant, le réchauffement en profondeur de l'Atlantique Sud semble s'affaiblir, tandis que le refroidissement de l'Atlantique Nord semble s'être poursuivi, à l'exception des profondeurs comprises entre 800 et 1100 m.

La dynamique des températures sur un transect de 59°N à travers le courant de l'Atlantique Nord, juste au sud des îles Féroé, est particulièrement intéressante, car cette zone est importante pour le temps et le climat d'une grande partie de l'Europe. La figure 29 montre une série temporelle à 59°N, de 30°W à 0°W, et de la surface à 800 m de profondeur. Cela représente essentiellement une section des masses d'eau affectées par le courant de l'Atlantique Nord.

Figure 29 : Changement de température le long du profil du courant de l'Atlantique Nord, 0-800 m

Voir la figure 28 pour la localisation géographique du transect. Source des données : Global Marine Argo Atlas.

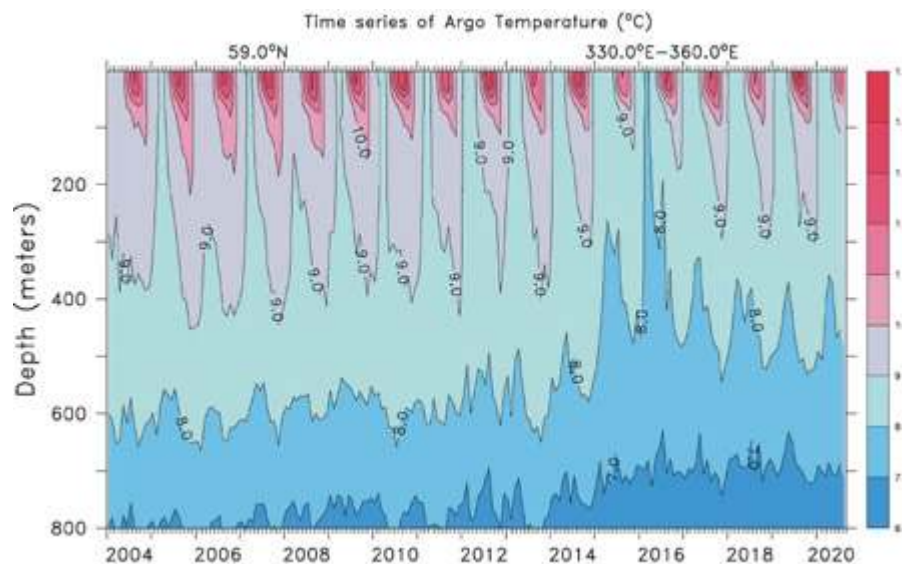
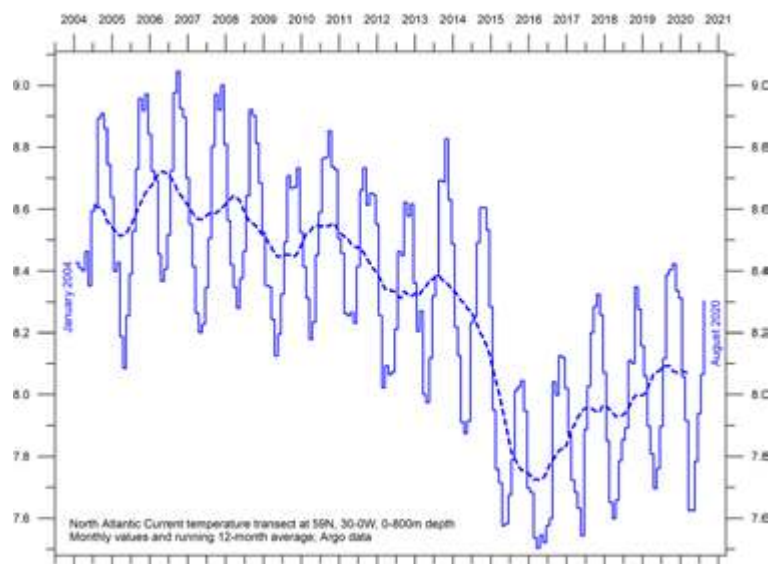


Figure 30 : Température intégrée en profondeur pour le profil du courant de l'Atlantique Nord

Voir la figure 28 pour la localisation géographique du transect. Source des données : Global Marine Argo Atlas.



Les températures océaniques supérieures à 9°C sont indiquées par des couleurs rouges.

Cette série temporelle, bien que relativement courte, présente une dynamique remarquable. La prédominance des eaux chaudes (supérieures à 9°C) a apparemment atteint son apogée au début de l'année 2006, après quoi les températures ont progressivement diminué jusqu'en 2016. Depuis lors, une reprise partielle des températures a eu lieu. Le changement observé, du pic au creux, sur une période d'environ 11 ans, pourrait suggérer un cycle de température de 22 ans, mais nous devons attendre que la série Argo soit plus longue avant de tirer des conclusions.

La figure 30 présente les mêmes données chronologiques (59°N, 330-0°W, 0-800 m de profondeur, 2004-2020) sous la forme d'un graphique de données intégrées à la profondeur.

La figure 31 est analogue à la figure 28, mais pour un transect le long de 150°W, représentant ainsi l'océan Pacifique (les observations sur les volumes représentés aux hautes et basses latitudes restent valables).

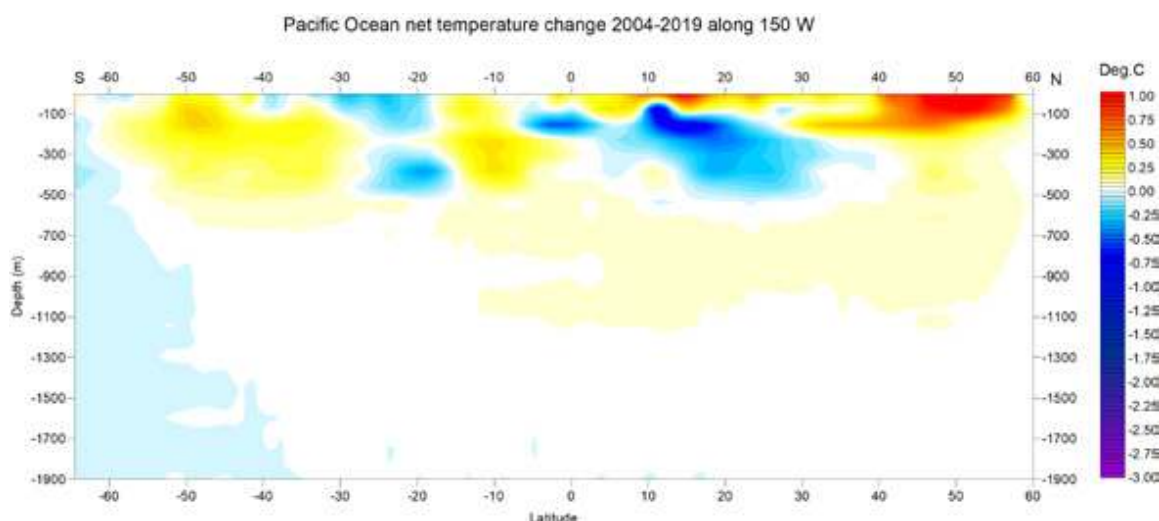
La figure 31a représente les changements pour la période 2004-2019 et révèle un léger refroidissement net affectant presque toutes les profondeurs jusqu'à 1900 m au sud de 55°S. Ce phénomène contraste avec un réchauffement net global jusqu'à 1000 m au nord de 55°S. Le réchauffement net a été particulièrement important entre 40°N et 60°N, jusqu'à 200 m de profondeur. En revanche, un refroidissement net caractérise les profondeurs entre 100 et 500 m entre 5°S et 30°N, et entre 20°S et 30°S.

Au cours des 12 derniers mois dans le cordon Argo (figure 31b), le refroidissement domine à

toutes les profondeurs entre 45°S et 30°N. Au moins une partie de cette évolution récente de la température peut probablement être liée à l'apparition de La Niña vers la fin de l'année 2020 (Figure 22).

Ni les diagrammes longitudinaux de l'Atlantique ni ceux du Pacifique ne révèlent dans quelle mesure les changements nets affichés sont dus à la dynamique océanique opérant à l'est et à l'ouest des deux profils considérés. C'est pourquoi ils ne doivent pas être surinterprétés. Ils suggèrent cependant un contraste intéressant, le Pacifique se réchauffant principalement, surtout au nord de l'équateur, et se refroidissant au sud, alors que l'inverse est vrai pour l'Atlantique : refroidissement au nord et réchauffement au sud.

(a) 2004-19



(b) 2019-20

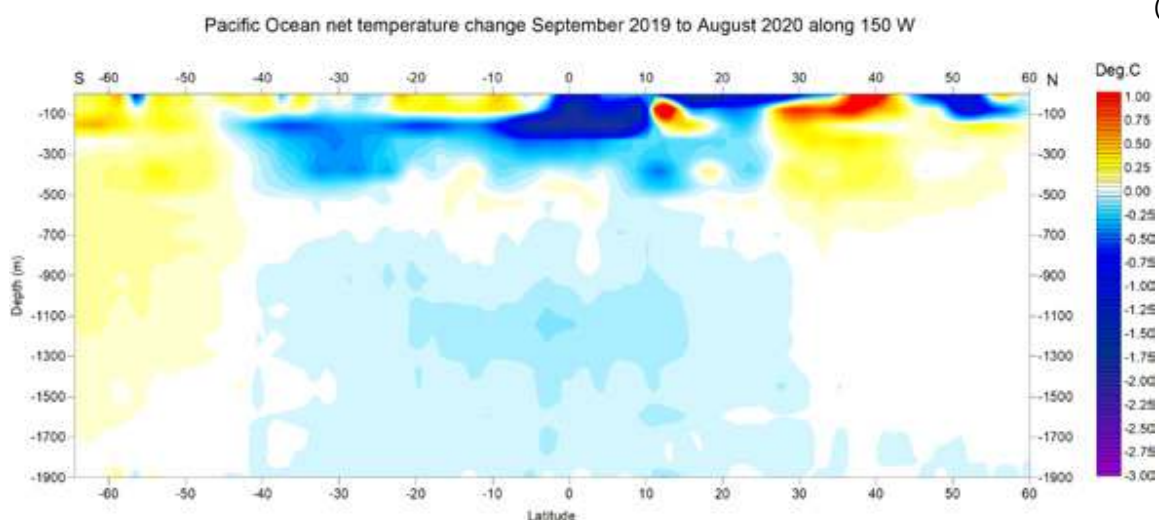


Figure 31 : Changement de température le long du profil du Pacifique, 0-1900 m

(a) 2004-2020 et (b) 19 septembre-20 août. Voir la figure 28 pour la localisation géographique du transect. Source des données : Global Marine Argo Atlas.

4. Oscillations océaniques

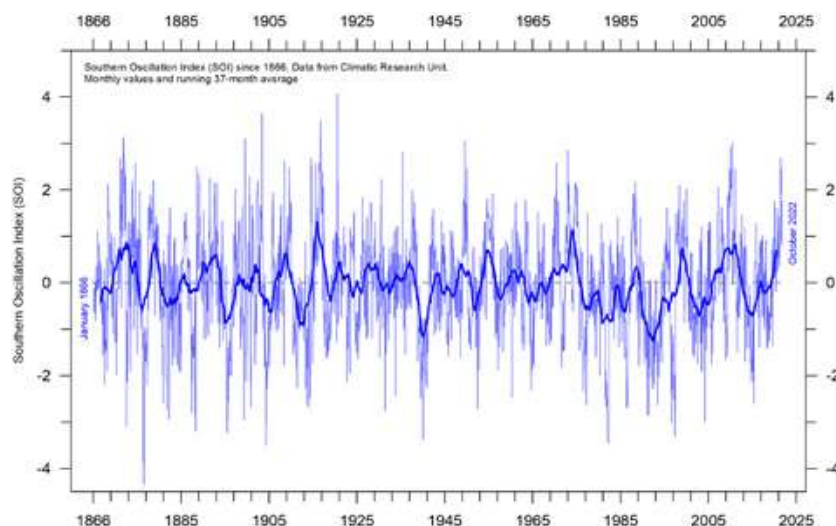
Indice d'oscillation australe

L'oscillation australe peut être considérée comme la composante atmosphérique des épisodes El Niño/La Niña. Des valeurs négatives durables de l'indice SOI (figure 32) indiquent souvent des épisodes El Niño. Ces valeurs négatives s'accompagnent généralement d'un réchauffement persistant du centre et de l'est de l'océan Pacifique tropical, d'une diminution de la force des alizés du Pacifique et d'une réduction des précipitations sur l'est et le nord de

l'Australie. Les valeurs positives du SOI sont généralement associées à des alizés du Pacifique plus forts et à des températures de surface de la mer plus élevées au nord de l'Australie, ce qui indique des épisodes La Niña. Les eaux du centre et de l'est de l'océan Pacifique tropical deviennent alors plus froides. L'est et le nord de l'Australie reçoivent généralement des précipitations accrues pendant ces périodes.

Figure 32 : Anomalie annuelle du SOI depuis 1866

La ligne fine représente les valeurs annuelles, tandis que la ligne épaisse est la moyenne mobile simple sur 5 ans. Source : Climatic Research Unit, University of East Anglia : Unité de recherche climatique, Université d'East Anglia.



Oscillation décennale du Pacifique

L'ODP (figure 33) est un modèle de variabilité climatique du Pacifique de longue durée, semblable à El Niño, dont les données remontent à janvier 1900. Ses causes sont actuellement inconnues, mais même en l'absence d'une compréhension théorique, la prise en compte de sa variabilité améliore les prévisions climatiques saisonnières et annuelles pour l'Amérique du Nord, car elle a une forte tendance à persister sur plusieurs saisons et plusieurs années. L'ODP semble également être à peu près en phase avec les changements de température globale. Elle est donc importante du point de vue de l'impact sociétal, car elle montre que les conditions climatiques "normales" peuvent varier sur des périodes comparables à la durée d'une vie humaine.

L'ODP illustre bien la façon dont les températures mondiales sont liées aux températures de la surface de la mer dans l'océan Pacifique, le plus grand océan de la planète. Lorsque les températures de surface de la mer sont relativement basses (phase négative de l'ODP), comme ce fut le cas de 1945 à 1977, la température de l'air mondiale diminue. Lorsque les températures de surface de la mer sont élevées (phase positive de l'ODP), comme ce fut le cas de 1977 à 1998, la température de l'air à la surface du globe augmente (figures 12 à 14).

Une analyse de la fréquence de Fourier (non montrée ici) montre que l'enregistrement de l'ODP est influencé par un cycle de 5,7 ans, et peut-être aussi par un cycle plus long d'environ 53 ans.

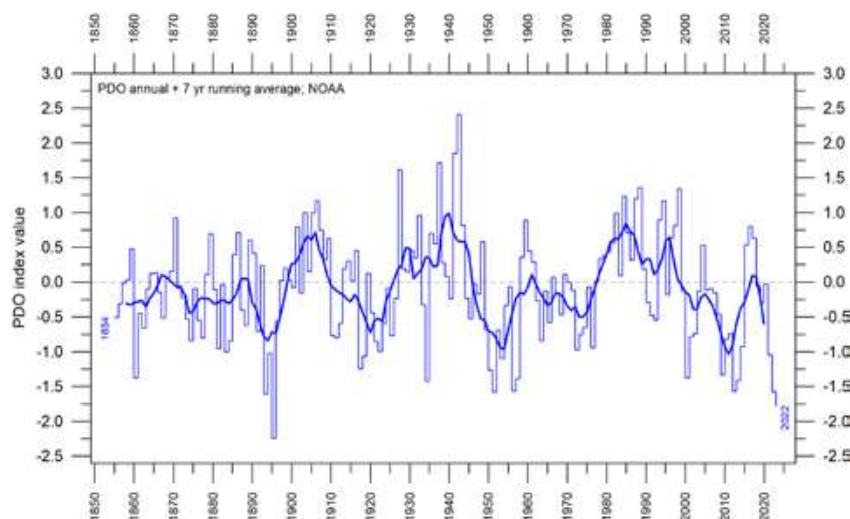
Oscillation multidécaennale de l'Atlantique

L'oscillation multidécaennale de l'Atlantique (AMO ; figure 34) est un mode de variabilité qui se produit dans le champ de température de surface de la mer de l'océan Atlantique Nord. L'AMO est essentiellement un indice des températures de surface de la mer (SST) dans

l'Atlantique Nord. L'indice AMO semble être en corrélation avec les températures de l'air et les précipitations dans une grande partie de l'hémisphère nord. L'association semble être élevée pour le nord-est du Brésil, les précipitations sahéliennes africaines et le climat

Figure 33 : Valeurs annuelles de l'oscillation décennale du Pacifique (OPD ou PDO en anglais) selon le Physical Sciences Laboratory, NOAA.

La ligne fine montre les valeurs annuelles de l'ODP, et la ligne épaisse est la moyenne mobile simple sur 7 ans. Source : Valeurs PDO du Laboratoire des sciences physiques de la NOAA : ERSST V5 <https://psl.noaa.gov/pdo/>



estival de l'Amérique du Nord et de l'Europe. L'indice AMO semble également être associé à des changements dans la fréquence des sécheresses en Amérique du Nord et se reflète dans la fréquence des ouragans violents dans l'Atlantique.

À titre d'exemple, l'indice AMO peut être relié à l'occurrence passée de grandes sécheresses dans le Midwest et le Sud-Ouest des États-Unis. Lorsque l'AMO est élevée, ces sécheresses ont tendance à être plus fréquentes ou plus longues, et vice-versa pour les valeurs faibles. Deux des sécheresses les plus graves du XXe siècle aux

États-Unis - celle des années 1950 et celle du "Dust Bowl" des années 1930 - se sont produites pendant une période de valeurs maximales de l'AMO, qui a duré de 1925 à 1965. D'autre part, la Floride et le nord-ouest du Pacifique ont tendance à connaître un effet inverse, une AMO élevée dans ces régions étant associée à des précipitations relativement importantes.

Une analyse de Fourier (non montrée ici) montre que l'enregistrement de l'AMO présente un cycle d'une durée d'environ 67 ans et, dans une moindre mesure, un cycle de 3,5 ans.

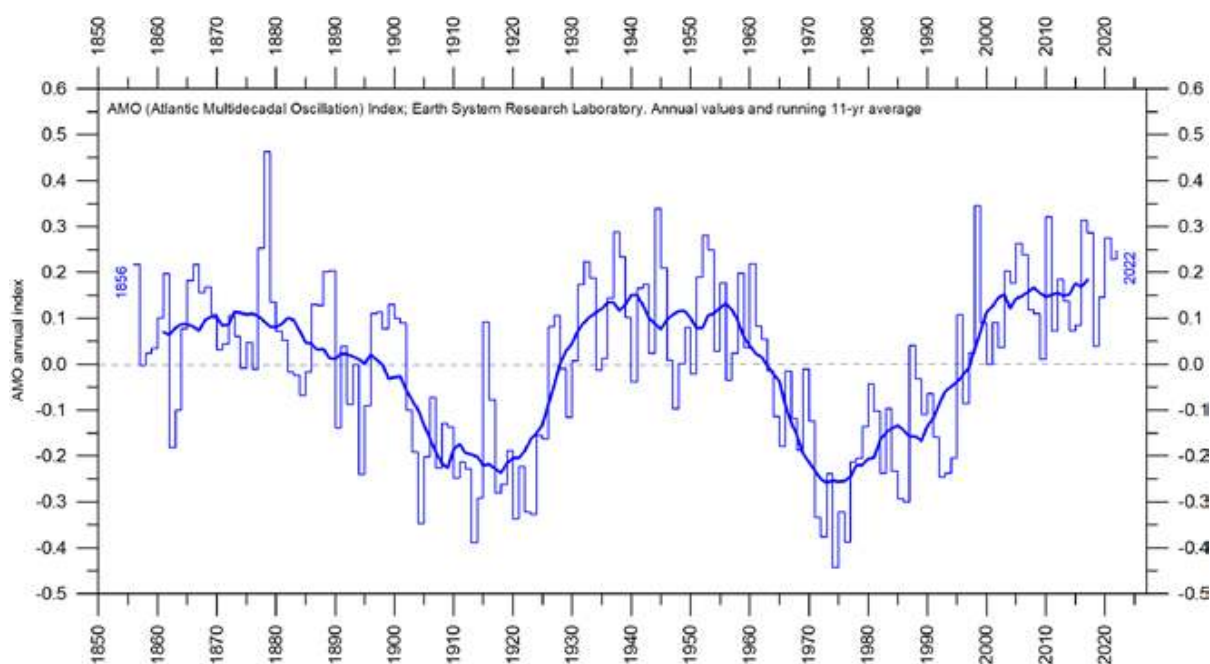


Figure 34 : L'oscillation multidécennale de l'Atlantique

Valeurs annuelles de l'indice de l'oscillation multidécennale de l'Atlantique (AMO), détriangées et non lissées, depuis 1856. La ligne bleue fine indique les valeurs annuelles, et la ligne épaisse est la moyenne simple sur 11 ans. Source des données : Earth System Research Laboratory, NOAA, États-Unis.

5. Niveau de la mer

En général

Le niveau des mers à l'échelle mondiale, régionale et locale évolue en permanence. Au cours du dernier maximum glaciaire, il y a environ 20 à 25 000 ans, le niveau global des mers était inférieur d'environ 120 m au niveau actuel. Depuis la fin du "petit âge glaciaire", il y a environ 100 à 150 ans, le niveau global des mers a augmenté en moyenne de 1 à 2 mm par an, selon les données des marégraphes.

L'évolution du niveau de la mer à l'échelle mondiale (ou eustatique) est mesurée par rapport à un niveau de référence idéalisé, le géoïde, qui est un modèle mathématique de la surface de la planète Terre (Carter et al. 2014). Le niveau global de la mer est fonction du volume des bassins océaniques et du volume d'eau qu'ils contiennent. Les changements du niveau global de la mer sont causés par quatre mécanismes principaux, mais pas seulement :

- Les changements dans la pression atmosphérique locale et régionale et le vent, ainsi que les changements de marée introduits par la Lune.
- Les changements de volume des bassins océaniques dus aux forces tectoniques (géologiques).
- Changements de la densité de l'eau de l'océan causés par les variations des courants, de la température de l'eau et de la salinité.
- Les variations du volume d'eau causées par les changements dans le bilan de masse des glaciers terrestres.

D'autres mécanismes influencent également le niveau de la mer : le stockage des eaux souterraines, le stockage dans les lacs et les rivières, l'évaporation, etc.

Les changements de volume des bassins océaniques sont trop lents pour être significatifs au cours de la vie humaine et ce sont donc les mécanismes 3 et 4 qui sont à l'origine des préoccupations actuelles concernant l'élévation du niveau de la mer.

L'augmentation de la température n'est en soi qu'un facteur mineur contribuant à l'élévation du niveau de la mer, parce que l'eau de mer a un coefficient de dilatation relativement faible et parce que, sur les échelles de temps qui nous intéressent, tout réchauffement est largement confiné aux quelques centaines de mètres supérieurs de la surface de l'océan.

La croissance ou la désintégration de la glace de mer n'a pas d'influence sur le niveau de la mer. En revanche, la fonte des glaces terrestres - y compris les glaciers de montagne et les inlandsis du Groenland et de l'Antarctique - est plus importante. Comme nous l'avons déjà indiqué, le niveau de la mer était inférieur d'environ 120 m lors du dernier maximum glaciaire. Au cours de l'interglaciaire le plus récent, il y a environ 120 000 ans, les températures mondiales et donc le niveau de la mer étaient plus élevés qu'aujourd'hui, car des parties importantes de la calotte glaciaire du Groenland ont fondu.

Toutefois, à l'échelle régionale et locale, la pression atmosphérique, le vent et le géoïde doivent également être pris en compte. Par exemple, les changements dans le volume de la calotte glaciaire du Groenland affecteront le géoïde dans les régions adjacentes ; si la masse diminue, la surface du géoïde sera déplacée vers le centre de la Terre et le niveau des mers dans la région baissera. Cela se produira même si le volume global d'eau dans les océans mondiaux augmente à mesure que la glace des glaciers disparaît.

En Europe du Nord, un autre facteur doit être pris en compte pour estimer le niveau futur de la mer. Il y a 20 à 25 000 ans, la Norvège, la Suède, la Finlande et Danemark étaient totalement ou partiellement recouvertes par la calotte glaciaire européenne. Aujourd'hui encore, l'effet de cette charge glaciaire est visible dans l'élévation isostatique continue du sol dans la région, de plusieurs millimètres par an. Sur de nombreux sites, cette élévation fait plus que compenser la lenteur de l'élévation du niveau de la mer à l'échelle mondiale, de sorte que l'on enregistre une baisse nette du niveau de la mer par rapport à la terre.

Le mouvement relatif du niveau de la mer par rapport à la terre est ce qui importe pour la planification côtière, et c'est ce que l'on appelle la "variation relative du niveau de la mer". C'est ce qui est enregistré par les marégraphes.

De l'altimétrie satellitaire

L'altimétrie par satellite est un type de mesure relativement nouveau, qui fournit des informations uniques et précieuses sur les changements de la topographie détaillée de la surface des océans, avec une couverture quasi mondiale. Cependant, elle n'est probablement pas un outil précis pour estimer les changements absolus du niveau de la mer à l'échelle mondiale, en raison de problèmes d'interprétation des données satellitaires d'origine.

Le plus important est l'ajustement isostatique glaciaire (GIA), une correction pour le transfert de masse à grande échelle et à long terme des océans vers la terre, qui résulte de la cire et du déclin des grandes nappes glaciaires du Quaternaire en Amérique du Nord et en Europe du Nord. Ce transfert de masse considérable

entraîne des changements dans la charge de surface, ce qui se traduit par des modifications viscoélastiques.

Ce transfert de masse important entraîne des changements dans la charge de surface, ce qui se traduit par un écoulement viscoélastique du manteau et des effets élastiques dans la croûte supérieure. Il est difficile de corriger les données satellitaires pour cet effet, car aucune technique ou réseau d'observation ne peut fournir suffisamment d'informations. Les chercheurs doivent donc recourir à la modélisation, et les réponses qu'ils obtiennent dépendent du type de modèle de déglaciation (pour la dernière glaciation) et du type de modèle croûte-manteau supposé. Pour cette raison (et d'autres facteurs), les estimations de l'évolution du niveau de la mer

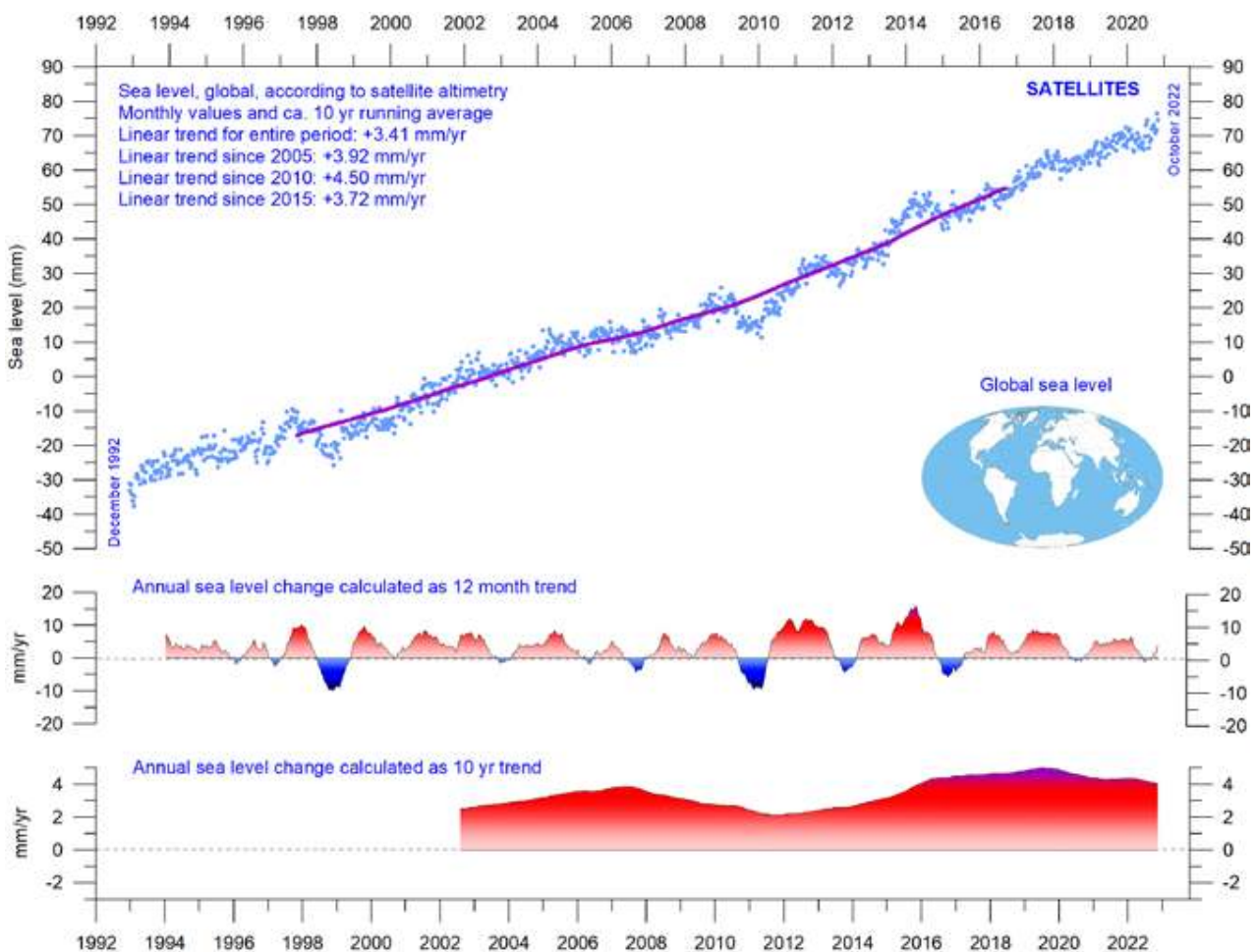


Figure 35 : Évolution du niveau de la mer depuis décembre 1992

Les deux panneaux inférieurs montrent la variation annuelle du niveau de la mer, calculée pour des fenêtres temporelles de 1 et 10 ans, respectivement. Ces valeurs sont tracées à la fin de l'intervalle considéré. Source : Colorado Center for Astro dynamics : Centre de recherche en astrodynamique du Colorado à l'université du Colorado à Boulder. Les points bleus représentent les observations individuelles (sans l'effet calculé du GIA), et la ligne violette représente la moyenne sur 121 mois (environ 10 ans).

à l'échelle mondiale basées sur l'altimétrie satellitaire varient quelque peu.

Dans la figure 35, l'estimation de l'élévation globale du niveau de la mer est d'environ 3,4 mm/an (depuis 1992), après suppression de l'effet estimé du GIA. Les tendances linéaires

calculées depuis 2005, 2010 et 2015 ne suggèrent pas d'accélération récente, et le panneau inférieur de la figure 35 suggère plutôt qu'un pic d'élévation du niveau de la mer a été atteint vers 2019.

Des marégraphes

Les marégraphes sont situés sur des sites côtiers et mesurent le mouvement net de la surface locale de l'océan par rapport à la terre. Ces mesures (voir, par exemple, la figure 36) sont des informations essentielles pour la planification côtière locale et sont directement applicables à la planification des installations côtières, contrairement à l'altimétrie par satellite.

Sur un site côtier donné, le mouvement net mesuré du niveau local de la mer côtière comprend deux composantes locales :

- la variation verticale de la surface de l'océan
- la variation verticale de la surface terrestre.

Par exemple, un marégraphe peut enregistrer une augmentation apparente du niveau de la mer de 3 mm/an. Si les mesures géodésiques montrent que la terre s'enfonce de 2 mm/an, l'élévation réelle du niveau de la mer n'est que de 1 mm/an (3 moins 2 mm/an). Dans un contexte de changement global du niveau de la mer, la valeur de 1 mm/an est pertinente, mais dans un contexte de planification côtière locale, la valeur marégraphique de 3 mm/an est celle qui est utile pour les autorités locales de planification.

Pour construire une série temporelle de mesures du niveau de la mer à chaque marégraphe, les moyennes mensuelles et annuelles doivent être ramenées à un niveau de

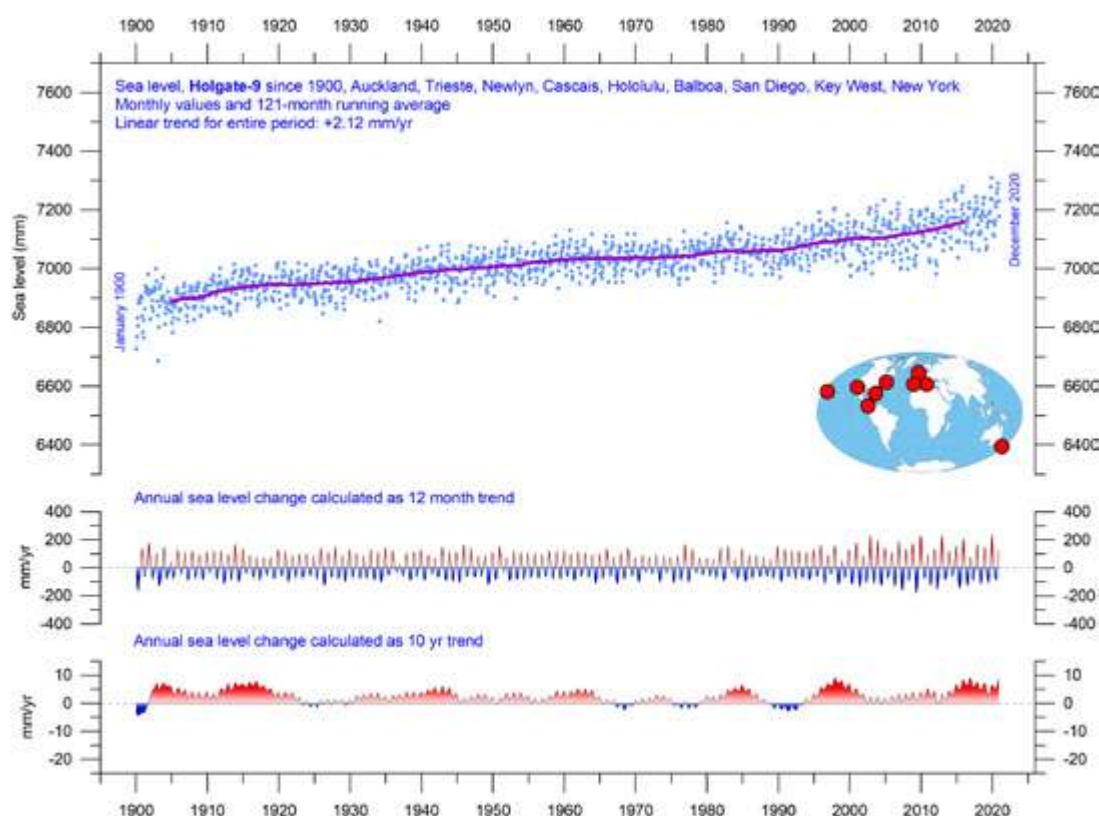


Figure 36 : Données marégraphiques mensuelles de Holgate-9 provenant de PSMSL Data Explorer

Les Holgate-9 sont une série de marégraphes situés dans des sites géologiquement stables. Les deux panneaux inférieurs montrent la variation annuelle du niveau de la mer, calculée pour des fenêtres temporelles de 1 et 10 ans, respectivement. Ces valeurs sont tracées à la fin de l'intervalle considéré. Source : Centre d'astrodynamique du Colorado : Centre de recherche en astrodynamique du Colorado à l'université du Colorado à Boulder. Les points bleus représentent les observations individuelles, et la ligne violette représente la moyenne sur 121 mois (environ 10 ans).

référence commun. Cette réduction est effectuée par le Service permanent du niveau moyen des mers (PSMSL), à partir des données fournies par les autorités nationales. Le niveau de référence local révisé (RLR) de chaque station est défini à environ 7000 mm sous le niveau moyen de la mer. Ce choix arbitraire a été fait il y a de nombreuses années pour éviter les nombres négatifs dans les valeurs moyennes mensuelles et annuelles du RLR qui en résultent.

Peu d'endroits sur Terre sont totalement stables, et la plupart des marégraphes sont situés sur des sites soumis à un soulèvement ou à un enfoncement tectonique (changement vertical de la surface terrestre). Cette instabilité verticale généralisée a plusieurs causes et affecte l'interprétation des données des différents marégraphes. De nombreux efforts sont donc déployés pour corriger les mouvements tectoniques locaux.

C'est pourquoi les données des marégraphes situés dans des sites tectoniques stables

présentent un intérêt particulier. Un exemple d'enregistrement long et continu provenant d'un tel site est celui de Korsør, au Danemark (figure 37). Cet enregistrement indique une élévation stable du niveau de la mer d'environ 0,83 mm par an depuis 1897, sans aucun signe d'accélération récente.

Les données des marégraphes du monde entier suggèrent une élévation moyenne du niveau de la mer d'environ 1 à 2 mm par an, alors que les données dérivées des satellites (figure 35) suggèrent une élévation d'environ 3,4 mm par an, voire plus. La différence notable (environ 1:2) entre les deux ensembles de données est remarquable mais n'a pas d'explication généralement acceptée. On sait toutefois que les observations par satellite se heurtent à des difficultés dans les zones proches de la côte. Vignudelli et al. (2019) fournissent un aperçu actualisé des limites actuelles de l'altimétrie satellitaire classique dans les régions côtières.

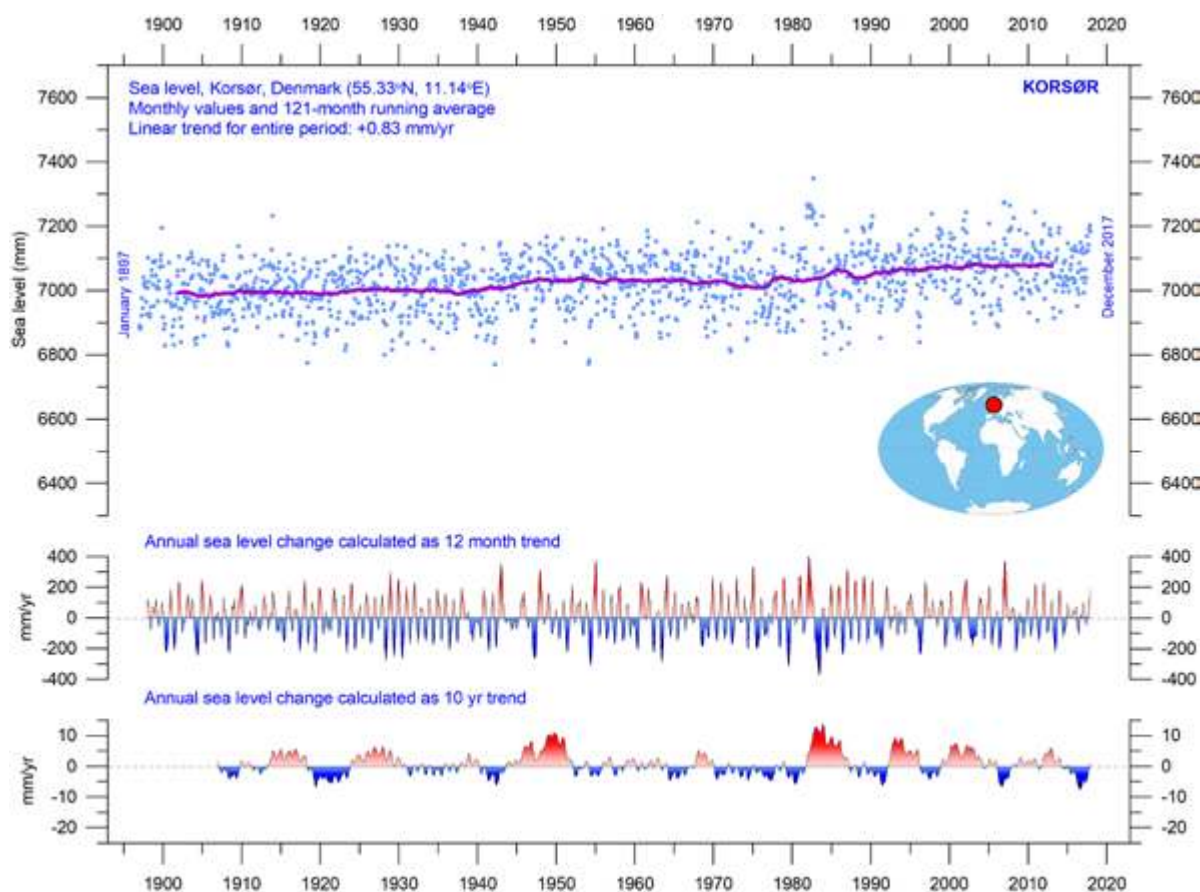


Figure 37 : Données marégraphiques mensuelles de Korsør (Danemark)

Tiré de PSMSL Data Explorer. Les points bleus représentent les observations mensuelles individuelles, et la ligne violette représente la moyenne sur 121 mois (environ 10 ans). Les deux panneaux inférieurs montrent la variation annuelle du niveau de la mer, calculée pour des fenêtres temporelles de 1 et 10 ans, respectivement. Ces valeurs sont tracées à la fin de l'intervalle considéré.

Modélisé pour l'avenir

La question du changement du niveau de la mer, et en particulier l'identification d'une hypothétique contribution humaine à ce changement, est un sujet complexe. Compte tenu de la controverse scientifique et politique qui entoure la question, le grand intérêt du public pour ce domaine est tout à fait compréhensible.

Une publication récente du GIEC, le 6^e rapport d'évaluation du groupe de travail I, a été publiée le 9 août 2021. Les données modélisées pour les projections mondiales et régionales du niveau de la mer entre 2020 et 2150 sont disponibles dans l'outil de projection du niveau de la mer du 6^e rapport d'évaluation du GIEC (voir le lien à la fin du présent rapport). Le GIEC modélise l'évolution future de plusieurs facteurs, tels que le changement de masse des glaciers, le mouvement vertical des terres, la température et le stockage de l'eau. Les projections modélisées du niveau de la mer pour différents scénarios d'émissions sont calculées par rapport à une ligne de base définie par les observations pour la période 1995-2014.

Il est intéressant de comparer les données modélisées avec les données observées sur le niveau de la mer. La figure 38 le montre pour un endroit, à savoir Oslo. Il y a 20 à 25 000 ans, la ville de Norway était totalement recouverte par l'inlandsis européen, avec plus de 2 km de glace au-dessus de la ville au moment de la glaciation maximale. Aujourd'hui, l'effet de cette charge glaciaire est clairement démontré par le fait que le sud de la Norvège subit une élévation isostatique continue du sol de plusieurs millimètres par an. Dans de nombreux sites touchés par la dernière glaciation (Weichselien/Wisconsin), ce mouvement isostatique continu fait plus que compenser la lenteur de l'élévation du niveau de la mer à l'échelle mondiale, de sorte que l'on enregistre une baisse nette du niveau de la mer par rapport à la terre.

Oslo ayant été recouverte d'une épaisse couche de glace lors de la dernière glaciation, elle est aujourd'hui affectée par une forte élévation isostatique des terres. Si le taux d'évolution du niveau de la mer observé à Oslo se maintient (sur la base d'environ 110 ans d'observations), en 2100, le niveau relatif de la mer (par rapport à la terre) aura baissé d'environ 27 cm par rapport à 2020 (figure 38). Cependant, selon le GIEC, il aura

augmenté d'environ 17,5 cm. Il prévoit une augmentation assez soudaine en 2020, qui contraste avec la baisse stable du niveau de la mer d'environ -3,39 mm/an enregistrée depuis 1914. Les données observées (mesurées) et modélisées se chevauchent désormais de 3 ans (figure 38). La période de chevauchement est encore courte, mais elle semble suggérer une baisse ininterrompue du niveau de la mer à Oslo depuis 2020, contrairement à la projection du modèle (ligne bleue de la figure 38).

Quelques réflexions s'imposent à ce stade. Le changement progressif de la dynamique du niveau relatif de la mer à Oslo (et dans de nombreux autres sites côtiers) en 2020 semble assez peu plausible et suggère que les données modélisées ne décrivent pas correctement la dynamique du monde réel. Ceci est remarquable, car les projections modélisées du niveau de la mer pour les différents scénarios du SSP sont calculées par rapport à une ligne de base définie par les observations de 1995 à 2014, pour chaque station. Les modélisateurs doivent donc avoir vu les données observées.

Selon le 6^e rapport d'évaluation, on estime que les activités humaines ont provoqué un réchauffement planétaire d'environ 1,0°C par rapport aux niveaux préindustriels, avec une fourchette probable de 0,8 à 1,2°C (Résumé à l'intention des décideurs, A.1.3). Il est donc particulièrement surprenant que l'effet modélisé de ce changement affecte pour la première fois le niveau de la mer sous la forme d'un changement progressif en 2020. Si les modélisateurs avaient plutôt étalonné leurs données sur le niveau de la mer à partir d'une date antérieure, par exemple 1950, ce qui aurait été tout à fait possible, le contraste entre les données observées et les données modélisées serait apparu de façon immédiate.

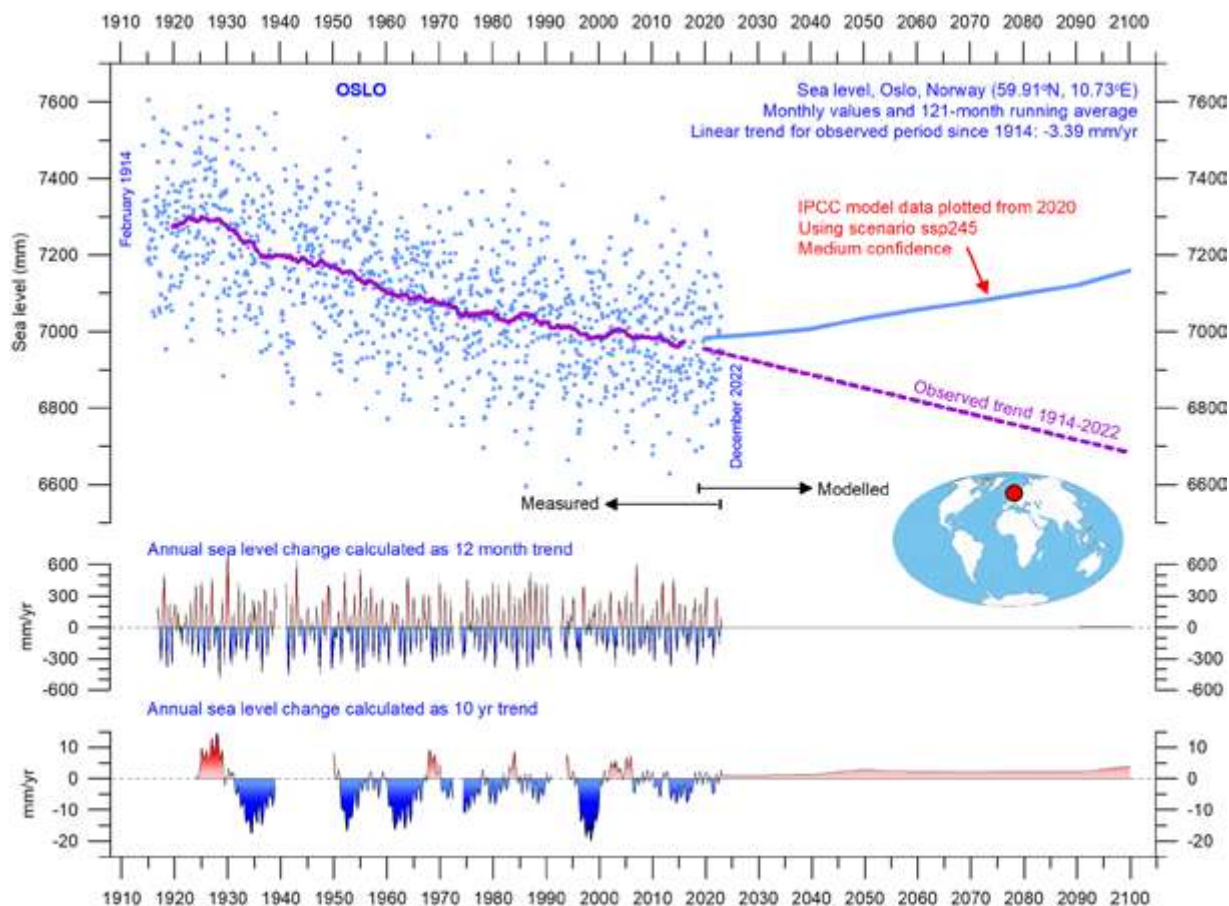


Figure 38 : Niveau de la mer observé et modélisé pour Oslo.

Les points bleus représentent les observations marégraphiques mensuelles individuelles (PSMSL Data Explorer) 1914-2019, et la ligne violette représente la moyenne sur 121 mois (environ 10 ans). Les données modélisées pour l'avenir sont représentées par une ligne bleue continue 2020-2100, en utilisant le scénario modéré SSP2-4.5 (IPCC 2020). Les deux panneaux inférieurs montrent la variation annuelle du niveau de la mer, calculée pour des fenêtres temporelles de 1 et 10 ans, respectivement. Ces valeurs sont tracées à la fin de l'intervalle considéré.

6. Neige et glace

Les deux graphiques de l'étendue moyenne de la glace de mer sur 12 mois de la figure 39 montrent une évolution contrastée entre les deux pôles au cours de la période 1979-2020. La tendance à la réduction de l'étendue de la glace de mer dans l'hémisphère nord est clairement illustrée par le trait bleu, tout comme l'augmentation simultanée dans l'hémisphère sud jusqu'en 2016. À bien des égards, cette observation et les précédentes présentées dans ce rapport suggèrent que l'année 2016 pourrait bien marquer un changement important dans le système climatique mondial.

L'étendue de la glace de mer en Antarctique a diminué très rapidement au cours du printemps 2016 dans l'hémisphère sud, beaucoup plus rapidement qu'au cours de tous les printemps précédents de l'ère satellitaire (depuis 1979). Un fort recul des glaces s'est produit dans tous les secteurs de l'Antarctique, mais il a été le plus

important dans les mers de Weddell et de Ross. Dans ces secteurs, de forts vents de surface du nord (chauds) ont repoussé la glace de mer vers le continent antarctique. Le contexte des conditions de vent particulières en 2016 a été discuté par divers auteurs (par exemple Turner et al. 2017 et Phys.org 2019), et semble être un phénomène lié à la variabilité naturelle du climat. L'enregistrement satellitaire de la glace de mer est encore court et ne représente pas entièrement les variations naturelles qui se produisent sur plus d'une ou deux décennies.

Ce que l'on peut déduire de ces données encore courtes est néanmoins instructif. Les deux graphiques de la moyenne sur 12 mois de la figure 40 montrent des variations récurrentes superposées aux tendances générales. Cette variation plus courte concerne la glace de mer arctique, qui est fortement influencée par une variation périodique de 5,3 ans, tandis que pour

l'Antarctique, une variation périodique d'environ 4,5 ans est importante. Ces deux variations ont atteint leur minimum simultanément en 2016, ce qui explique au moins en partie le minimum simultané de l'étendue de la glace de mer mondiale.

Dans les années à venir, les variations identifiées ci-dessus pourraient à nouveau induire une augmentation de l'étendue de la glace de mer aux pôles, avec comme résultat possible une augmentation dérivée de l'étendue moyenne de la glace de mer sur 12 mois à l'échelle mondiale. En fait, cela pourrait déjà se

produire dans l'Arctique et dans l'Antarctique (figure 39). Toutefois, dans les années à venir, les minima et les maxima de ces variations ne se produiront pas de manière synchrone en raison de la durée différente de leurs périodes, et les minima (ou maxima) mondiaux pourraient donc être moins prononcés qu'en 2016.

La figure 40 illustre l'étendue et l'épaisseur globales de la glace de mer arctique entre la fin de 2021 et la fin de 2022. L'épaisseur de la glace de mer a augmenté le long des côtes du Canada et du Groenland en 2022.

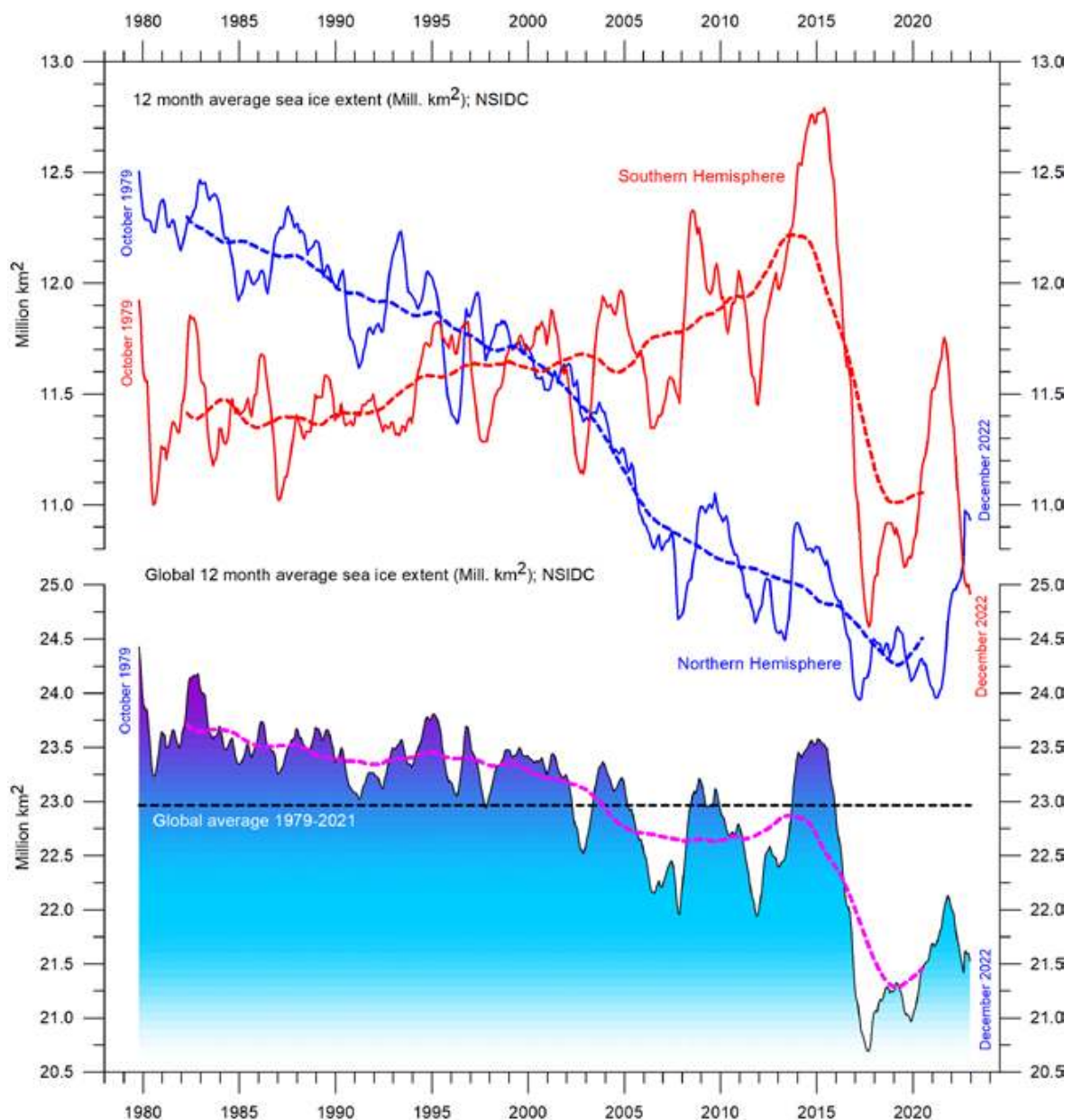


Figure 39 : Étendue de la glace de mer à l'échelle mondiale et hémisphérique depuis 1979

Moyennes mobiles sur 12 mois. La valeur d'octobre 1979 représente la moyenne mensuelle de novembre 1978-octobre 1979, la valeur de novembre 1979 représente la moyenne de décembre 1978-novembre 1979, etc. Les lignes pointillées représentent une moyenne de 61 mois (environ 5 ans). Le dernier mois inclus dans les calculs sur 12 mois est indiqué à droite dans le diagramme. Source des données : National Snow and Ice Data Center (NSIDC).

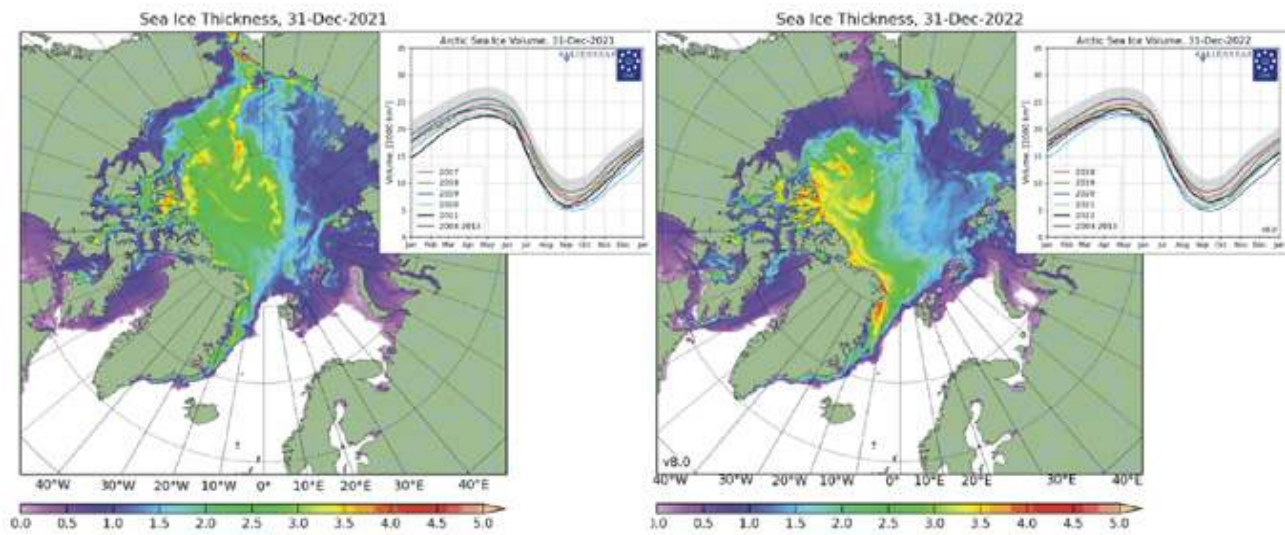


Figure 40 : Glace de mer arctique 2021 versus 2022

Étendue et épaisseur de la glace de mer arctique au 31 décembre 2021 (à gauche) et 2022 (à droite) et cycles saisonniers du volume total calculé de la glace de mer arctique, selon l'Institut météorologique danois (DMI). Le volume moyen de glace de mer et l'écart-type pour la période 2004-2013 sont indiqués en gris dans les diagrammes.

Couverture neigeuse de l'hémisphère nord

Les variations de la couverture neigeuse mondiale sont principalement le résultat des changements qui se produisent dans l'hémisphère nord (figure 41), où se trouvent toutes les grandes zones terrestres. La couverture neigeuse de l'hémisphère sud est essentiellement contrôlée par la calotte glaciaire de l'Antarctique et est donc relativement stable.

La couverture neigeuse de l'hémisphère nord est soumise à d'importantes variations locales et régionales d'une année sur l'autre (figure 42). Cependant, la tendance générale (depuis 1972) est à la quasi-stabilité, comme l'illustre la figure 43.

Pendant l'été de l'hémisphère Nord, la couverture neigeuse se réduit généralement à environ 2 400 000 km² (principalement contrôlée par la taille de la calotte glaciaire du Groenland), mais pendant l'hiver, elle augmente pour atteindre environ 50 000 000 km², ce qui représente pas moins de 33% de la superficie totale des terres de la planète. Si l'on considère les changements saisonniers (figure 43), la couverture neigeuse de l'hémisphère nord a légèrement augmenté en automne, est stable au milieu de l'hiver et diminue légèrement au printemps. En 2022, l'étendue de la couverture neigeuse de l'hémisphère nord était proche de la moyenne 1972-2021 (figure 44).

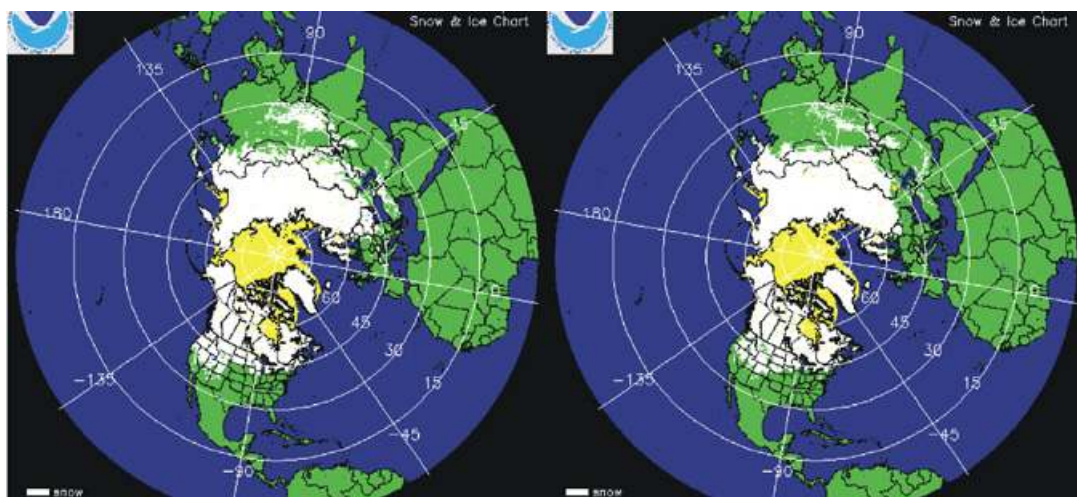


Figure 41 : Neige et glace de mer dans l'hémisphère nord

Couverture neigeuse (blanc) et glace de mer (jaune) au 31 décembre 2021 (gauche) et 2022 (droite). Source de la carte : National Ice Center (NIC).

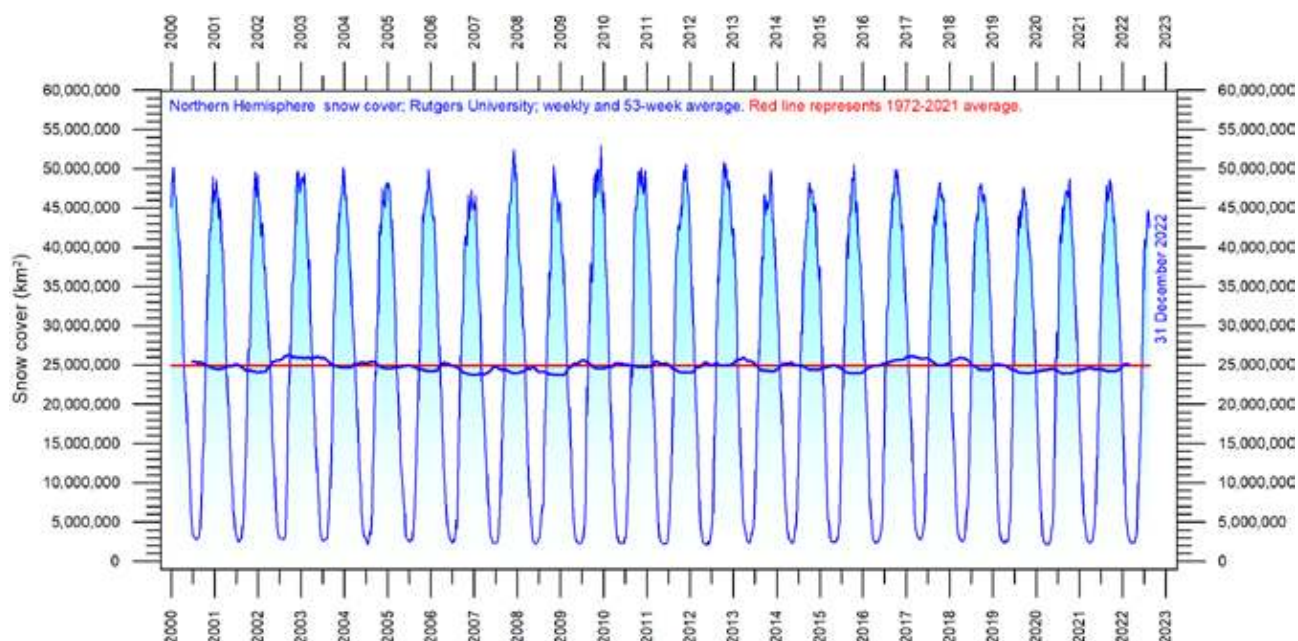


Figure 42 : Couverture neigeuse hebdomadaire dans l'hémisphère nord depuis 2000

Source : Rutgers University Global Snow Laboratory. La ligne bleue fine correspond aux données hebdomadaires et la ligne bleue épaisse à la moyenne sur 53 semaines (environ 1 an). La ligne rouge horizontale est la moyenne 1972-2020.

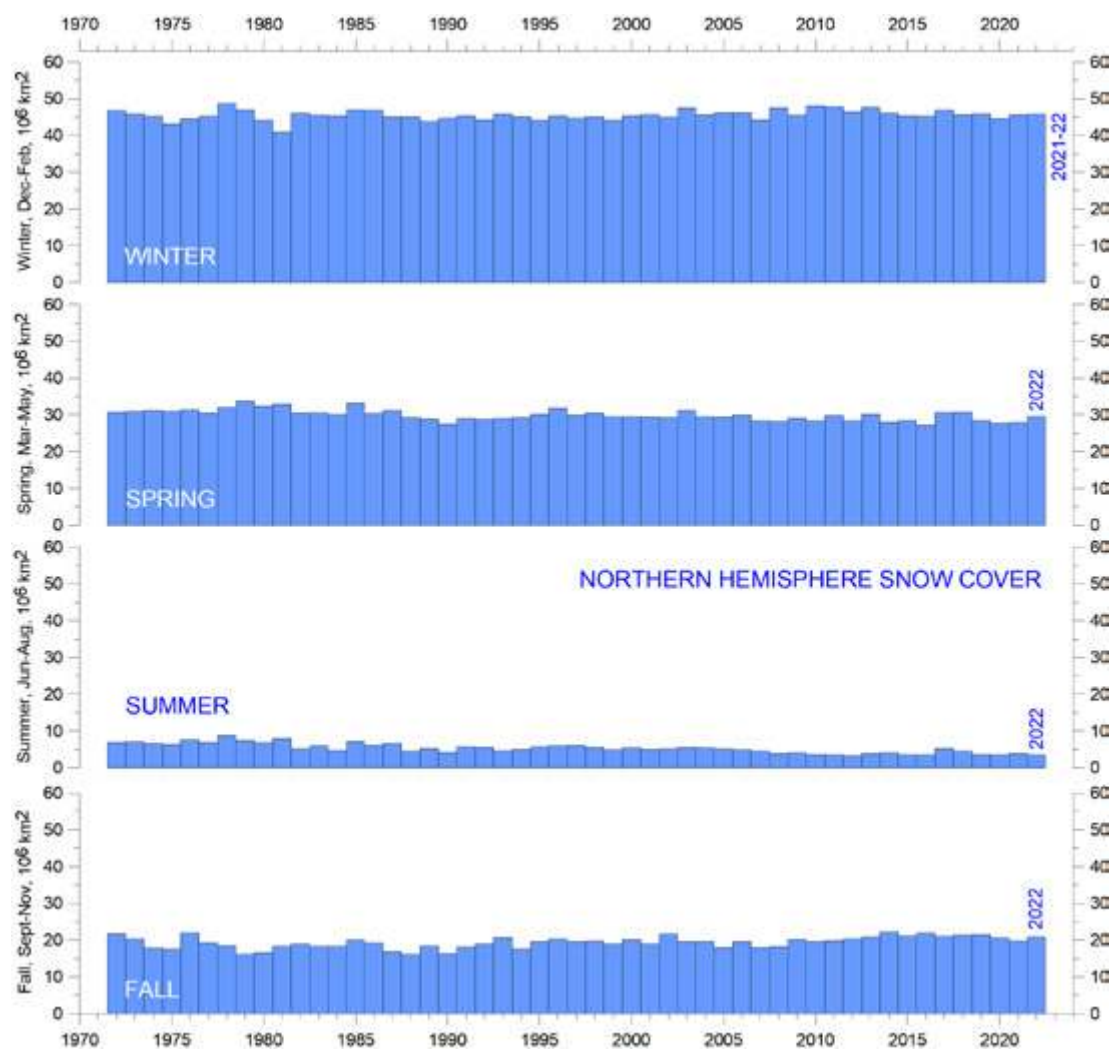


Figure 43 : Couverture neigeuse saisonnière de l'hémisphère nord depuis 1972

Source : Laboratoire mondial de la neige de l'Université Rutgers.

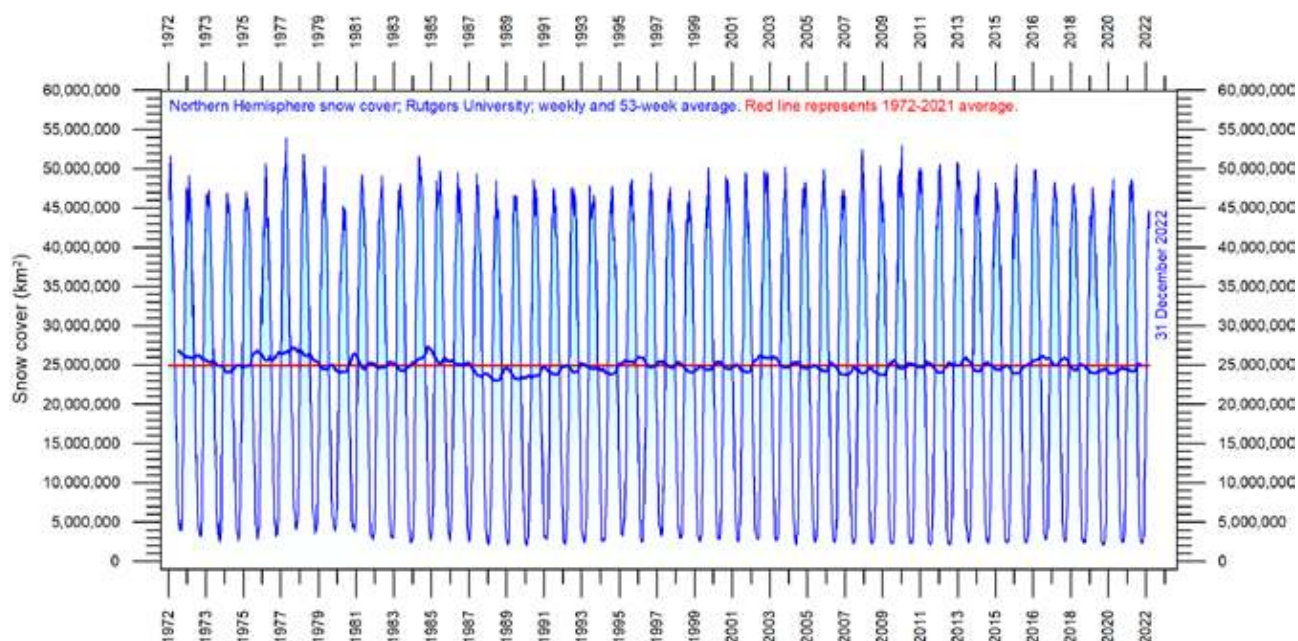


Figure 44 : Couverture neigeuse hebdomadaire dans l'hémisphère nord depuis 1972

Source : Laboratoire mondial de la neige de l'Université Rutgers. La ligne bleue fine représente les données hebdomadaires, et la ligne bleue épaisse la moyenne mobile sur 53 semaines (environ 1 an). La ligne rouge horizontale représente la moyenne 1972-2020.

7. Tempête tropicale et ouragans

Énergie cyclonique accumulée

L'énergie cyclonique accumulée (ACE) est une mesure utilisée par la NOAA pour exprimer l'activité des cyclones tropicaux individuels et des saisons cycloniques tropicales entières. L'ACE est calculée comme le carré de la vitesse du vent toutes les six heures, et est ensuite mise à l'échelle par un facteur de 10 000 pour la facilité d'utilisation, en utilisant une unité de 10^4 nœuds². L'ACE d'une saison est la somme de l'ACE de chaque tempête, et englobe donc le nombre, la force et la durée de toutes les tempêtes tropicales de la saison. Les données ACE et la dynamique des cyclones en cours sont détaillées dans Maue (2011).

Le potentiel de dommages d'un ouragan est proportionnel au carré ou au cube de la vitesse maximale du vent, et l'ACE n'est donc pas seulement une mesure de l'activité des cyclones tropicaux, mais aussi une mesure du potentiel de dommages d'un cyclone individuel ou d'une saison. Les données existantes (figure 45) ne suggèrent pas d'activité cyclonique anormale au cours des dernières années.

Les données mondiales de l'ACE depuis 1970 présentent un schéma variable dans le temps, mais sans tendance claire, comme les diagrammes pour l'hémisphère Nord et l'hémisphère Sud (panneaux de la figure 45). Une analyse de Fourier (non montrée ici) indique une oscillation significative d'une durée d'environ 3,6 ans et suggère également une seconde oscillation d'une durée de 11,5 ans, mais la série de données est encore trop courte pour tirer des conclusions définitives.

La période 1989-1998 a été caractérisée par des valeurs élevées. D'autres pics ont été observés en 2004, 2015 et 2018, et les périodes 1973-1988, 1999-2003 et 2006-2014 ont été caractérisées par une activité relativement faible. Les pics de 1997/98 et 2016 coïncident avec de forts événements El Niño dans l'océan Pacifique (figure 22). Les valeurs ACE de l'hémisphère Nord (panneau central de la figure 45) dominent le signal global (panneau inférieur) et, par conséquent, les pics et les creux sont similaires aux données globales, sans aucune tendance

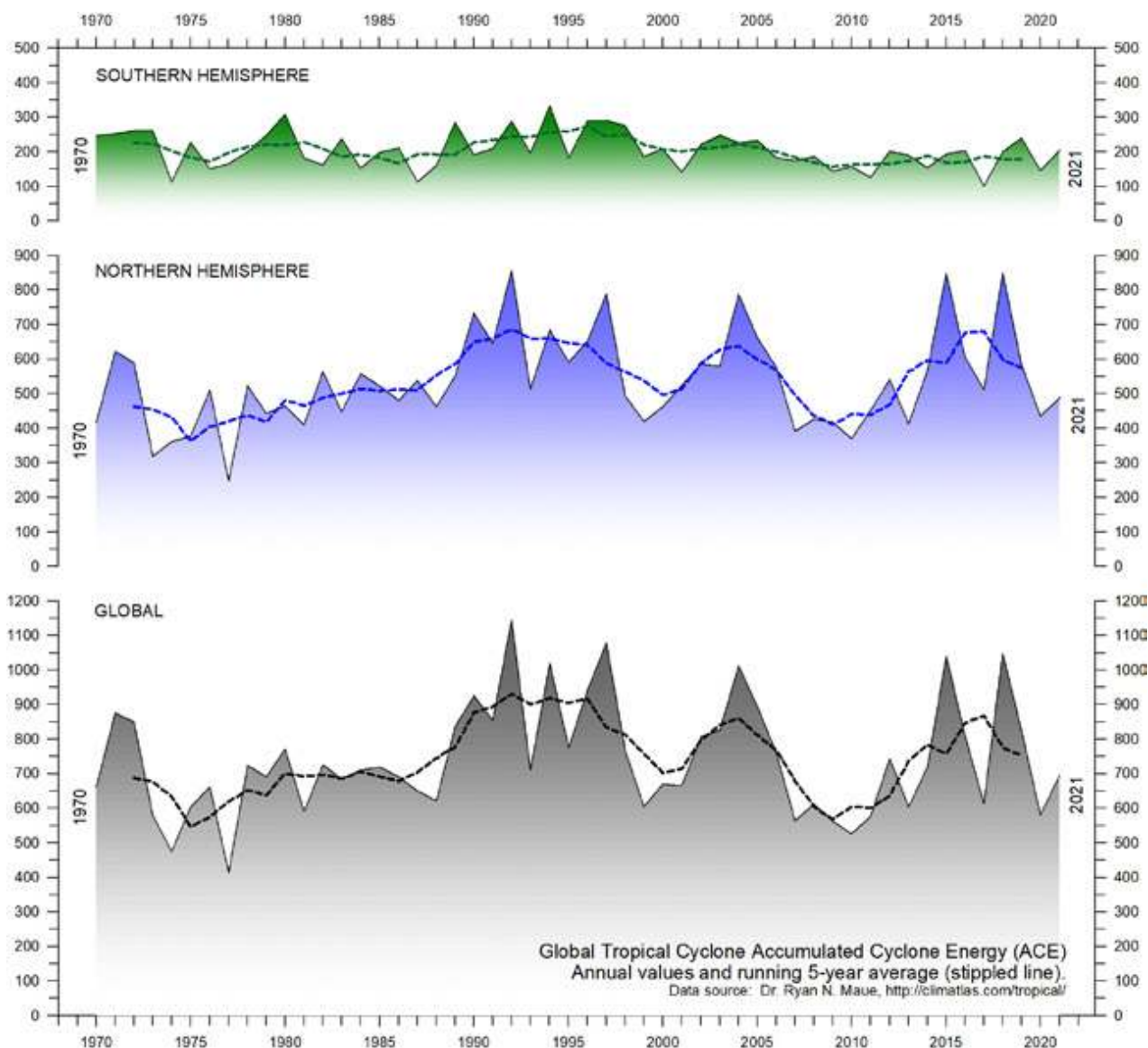


Figure 45 : Energie cyclonique annuelle cumulée au niveau mondial

Source: Ryan Maue.

claire sur la durée de l'enregistrement. L'hémisphère nord connaît une saison cyclonique principale de juin à novembre. Les valeurs ACE de l'hémisphère sud (panneau supérieur de la figure 45) sont généralement inférieures à celles de l'hémisphère nord, et la principale saison cyclonique s'étend de décembre à avril.

La série de données ACE du Laboratoire océanographique et météorologique de l'Atlantique remontent à 1850. Une analyse de Fourier (non montrée ici) pour le bassin de l'Atlantique (Figure 46) montre que la série ACE

est influencée par des variations périodiques d'environ 55,8 ans et 7,8 ans. La saison des ouragans du bassin atlantique présente souvent une activité supérieure à la moyenne lorsque les conditions La Niña sont présentes dans le Pacifique à la fin de l'été (août-octobre), comme ce fut le cas en 2017 (Johnstone et Curry, 2017). La série de données du bassin du Pacifique oriental est beaucoup plus courte, commençant en 1971, et est influencée par des périodes de 27,0 ans et de 2,4 ans. Un pic ACE a apparemment été atteint en 2015-18.

Autres observations de tempêtes et de vents

Le nombre d'ouragans ayant atterri dans la partie continentale des États-Unis est illustré à la figure 47. La série montre des variations considérables d'une année à l'autre, mais il n'est pas possible de détecter une tendance claire dans le temps. Une analyse de Fourier (non montrée ici) révèle une période statistiquement significative d'environ 3,2 ans.

L'examen des observations effectuées par les stations météorologiques côtières situées à des endroits particulièrement exposés au vent permet de se faire une idée de l'évolution des conditions de vent dominantes. Le phare de Lista, dans l'extrême sud de la Norvège, en est un exemple. Il est situé sur un cap exposé à l'extrême sud-ouest de la Norvège continentale, ce qui lui permet d'enregistrer les conditions de vent dans la mer du Nord adjacente et dans le secteur européen de l'Atlantique Nord. Il dispose

d'un enregistrement mensuel des vents remontant à janvier 1931, comme le montre la figure 48. Il en ressort que les vents les plus forts ont été enregistrés peu après la Seconde Guerre mondiale et qu'ils ont quelque peu diminué depuis, reflétant dans une certaine mesure l'enregistrement des atterrissages d'ouragans américains (figure 47), c'est-à-dire sur la rive opposée de l'Atlantique Nord.

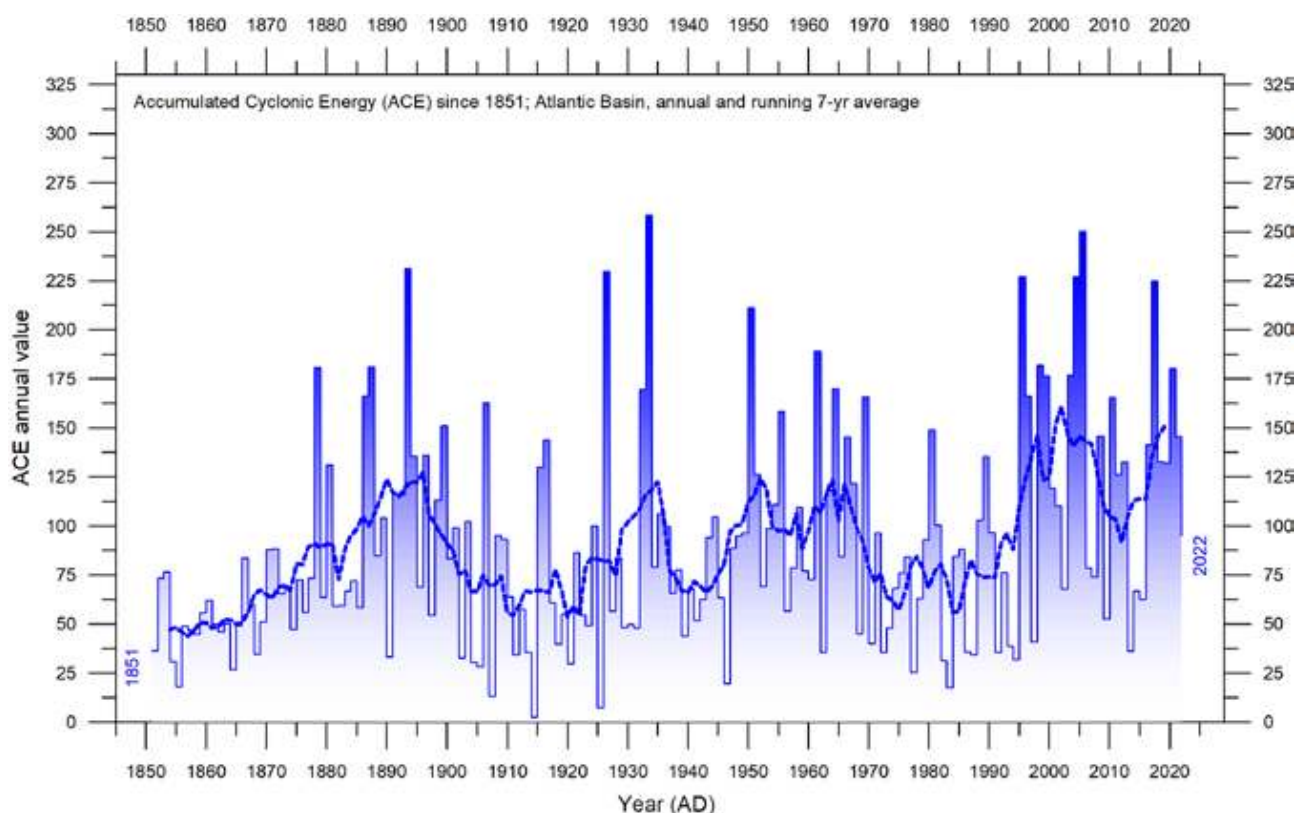


Figure 46 : ACE du bassin atlantique depuis 1851

Les lignes fines indiquent les valeurs annuelles de l'ACE, et la ligne épaisse indique la moyenne mobile sur 7 ans. Source des données : Laboratoire océanographique et météorologique de l'Atlantique (AOML), Division de la recherche sur les ouragans. Veuillez noter que ces données ne sont pas encore mises à jour au-delà de 2020.

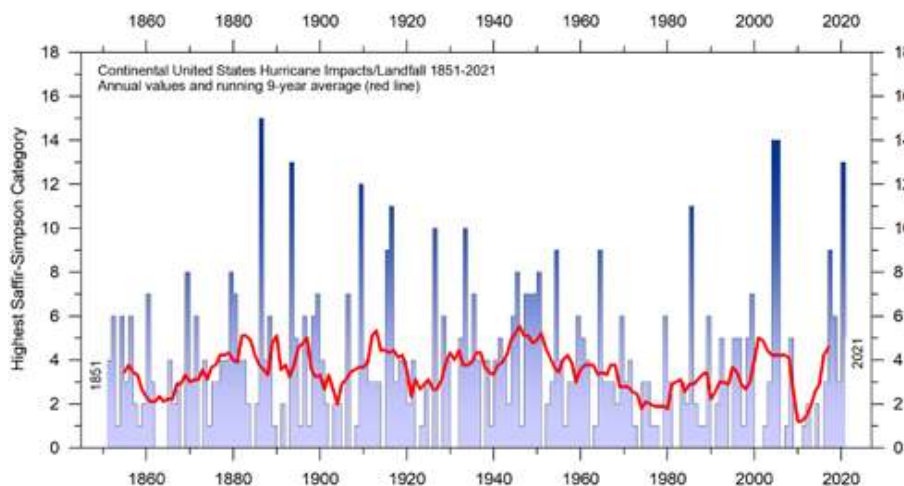


Figure 47 : Atterrissages d'ouragans dans la partie continentale des États-Unis 1851-2018

L'impact le plus élevé sur l'échelle de Saffir-Simpson pour les ouragans aux États-Unis est basé sur l'estimation des vents de surface maximums soutenus produits sur la côte. Source des données : Division de recherche sur les ouragans, NOAA. Veuillez noter que cette série de données n'a pas encore été mise à jour au-delà de 2018.

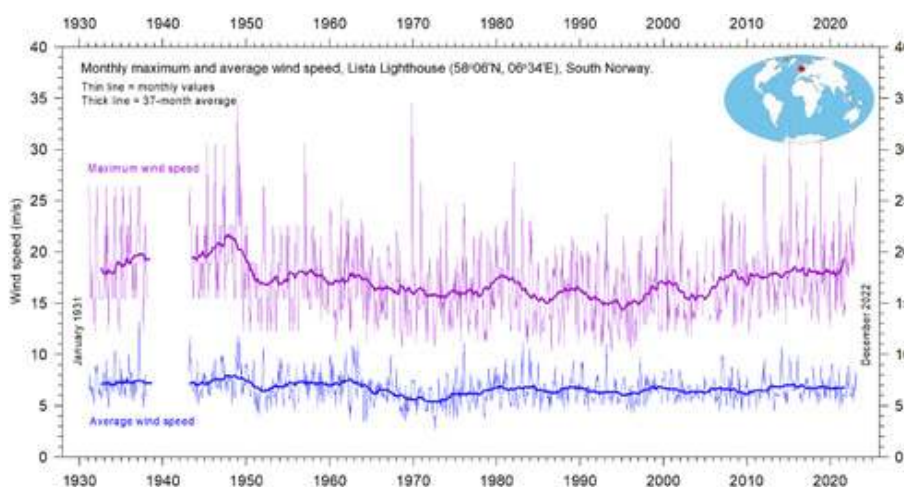


Figure 48 : Vitesse maximale et moyenne mensuelle du vent depuis janvier 1931 mesurée au phare de Lista, Norvège méridionale

Le phare de Lista est situé sur un cap exposé à l'extrême sud-ouest de la Norvège continentale, ce qui lui permet d'enregistrer les conditions de vent dans la mer du Nord adjacente et dans le secteur européen de l'Atlantique Nord. Source des données : SeKlima.

Written references

- Carter R.M., de Lange W., Hansen, J.M., Humlum O., Idso C., Kear, D., Legates, D., Mörner, N.A., Ollier C., Singer F. and Soon W. 2014. Commentary and Analysis on the Whitehead & Associates 2014 NSW Sea-Level Report. Policy Brief, NIPCC, 24. September 2014, 44 pp.
<http://climatechangereconsidered.org/wp-content/uploads/2014/09/NIPCC-Report-on-NSW-Coastal-SL-9z-corrected.pdf>.
- Chylek, P., Folland, C. K., Lesins, G., and Dubey, M. K. 2010. Twentieth century bipolar seesaw of the Arctic and Antarctic surface air temperatures. *Geophysical Research Letters*, 37: L08703, doi:10.1029/2010GL042793.
- Holgate, S.J. 2007. On the decadal rates of sea level change during the twentieth century. *Geophysical Research Letters*, 34: L01602, doi:10.1029/2006GL028492.
- Johnstone, J. and Curry, J. 2017. Causes and Predictability of the Exceptionally Active 2017 Atlantic Hurricane Season. Climate Forecast Applications Network (CFAN). https://curryja.files.wordpress.com/2017/11/hurricane_review_2017-final.pdf.
- Maue, R.L. 2011. Recent historically low global tropical cyclone activity. *Geophysical Research Letters*, 38, L14803, doi:10.1029/2011GL047711.
- Roemmich, D. and J. Gilson, 2009. The 2004–2008 mean and annual cycle of temperature, salinity, and steric height in the global ocean from the Argo Program. *Progress in Oceanography*, 82: 81–100.
- Turner et.al. 2017. Unprecedented springtime retreat of Antarctic sea ice in 2016. *Geophysical Research Letters*, 44(13): 6868–6875. <https://doi.org/10.1002/2017GL073656>.
- Vignudelli et al. 2019. Satellite Altimetry Measurements of Sea Level in the Coastal Zone. *Surveys in Geophysics*, 40: 1319–1349. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10712-019-09569-1>.

Data sources

All sources were accessed January-February 2023.

ACE data: https://en.wikipedia.org/wiki/Accumulated_cyclone_energy.

AMO, Earth System Research Laboratory, NOAA, USA: <https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/timeseries/AMO/>.

Atlantic Oceanographic and Meteorological Laboratory, Hurricane Research Division: <http://www.aoml.noaa.gov/hrd/tcfaq/E11.html>.

Continental United States Hurricane Impacts/Landfalls: https://www.aoml.noaa.gov/hrd/hurdat/All_U.S._Hurricanes.html.

Colorado Center for Astro dynamics Research: <http://sealevel.colorado.edu/>.

Danish Meteorological Institute (DMI): <http://ocean.dmi.dk/arctic/icethickness/thk.uk.php>. Earth System Research Laboratory (ESRL): <https://www.esrl.noaa.gov/psd/map/clim/olr.shtml>. SeKlima : <https://seklima.met.no/observations/>.

GISS temperature data: <https://data.giss.nasa.gov/gistemp/>.

Global Marine Argo Atlas: http://www.argo.ucsd.edu/Marine_Atlas.html.

Goddard Institute for Space Studies (GISS): <https://www.giss.nasa.gov/>.

HadCRUT temperature data: <http://hadobs.metoffice.com/>.

Hurricane Research Division, NOAA: <http://www.aoml.noaa.gov/hrd/tcfaq/E23.html>.

Hurricane Research Division, Continental United States Hurricane Impacts/Landfalls: https://www.aoml.noaa.gov/hrd/hurdat/All_U.S._Hurricanes.html.

National Ice Center (NIC). http://www.natice.noaa.gov/pub/ims/ims_gif/DATA/cursnow.gif.

National Snow and Ice Data Center (NSIDC): http://nsidc.org/data/seaice_index/index.html.

NCDC temperature data: <https://www.ncdc.noaa.gov/monitoring-references/faq/>.

Ocean temperatures from Argo floats: <http://www.argo.ucsd.edu/>.

Oceanic Niño Index (ONI): http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensos-tuff/ensoyears.shtml.

Outgoing long wave radiation (OLR): <https://www.esrl.noaa.gov/psd/map/clim/olr.shtml>.

PDO, NOAA Physical Sciences Laboratory: <https://psl.noaa.gov/pdo/>.

Permanent Service for Mean Sea Level: <http://www.psmsl.org/>.

Phys.org 2019: <https://phys.org/news/2019-01-antarctica-sea-ice-climate.html>.

Plymouth State Weather Center: <http://vortex.plymouth.edu/sfc/sst/>.

PSMSL Data Explorer: <http://www.psmsl.org/data/obtaining/map.html>.

Rutgers University Global Snow Laboratory: <http://climate.rutgers.edu/snowcover/index.php>.

RSS temperature data: <http://www.remss.com/measurements/upper-air-temperature>.

Sea level from satellites: <https://sealevel.colorado.edu/data/2020rel1-global-mean-sea-level-sea-sonal-signals-retained>.

Sea level from tide-gauges: <http://www.psmsl.org/data/obtaining/map.html>.

Sea level modelled: IPCC AR6 Sea Level Projection Tool: https://sealevel.nasa.gov/data_tools/17.

Sea ice extent Danish Meteorological Institute (DMI): <http://ocean.dmi.dk/arctic/icethickness/thk.uk.php>.

Southern Oscillation Index (SOI): <http://crudata.uea.ac.uk/cru/data/soi/>.

Maue ACE data: climatlas.com/tropical/.

UAH temperature data: http://www.nsstc.uah.edu/data/msu/v6.0/tlt/uahncdc_lt_6.0.txt.

Processus d'évaluation

Le GWPF publie des articles dans un certain nombre de formats différents, avec un processus d'évaluation différent pour chacun d'entre eux.

- Nos rapports GWPF, qui sont des documents phares, sont tous révisés par notre Conseil consultatif académique.
- Les briefings et notes du GWPF sont des documents plus courts et sont révisés en interne et/ou en externe selon les besoins.

Une partie de la fonction du processus de révision est de s'assurer que tout matériel publié par le GWPF est d'un niveau académique approprié, et servira l'objectif éducatif du GWPF. En tant qu'organisation caritative, nous reconnaissons que le matériel éducatif doit donner à tout lecteur la possibilité de comprendre et d'explorer différentes perspectives sur un sujet.

Cela signifie que, pour la plupart des publications, nous invitons également à une révision externe de la part d'une partie qui, nous l'espérons, adoptera un point de vue différent de celui de l'auteur de la publication. Nous proposons de publier tout commentaire substantiel à côté de l'article principal, à condition que nous soyons convaincus qu'il améliorera l'expérience éducative du lecteur. Nous espérons ainsi encourager un débat ouvert et actif sur les domaines importants dans lesquels nous travaillons.

Ce processus de révision amélioré pour les articles du GWPF a pour but de pousser le contenu et l'analyse au-delà d'une révision typique pour une revue académique :

- Un plus grand nombre d'évaluateurs potentiels peuvent être impliqués
- Le nombre de commentaires substantiels sera généralement supérieur à celui d'un examen par les pairs d'une revue, et
- L'identité de l'auteur est connue des évaluateurs potentiels.

En tant qu'organisation dont les publications font parfois l'objet de critiques affirmées ou imprudentes, ce processus d'évaluation vise à améliorer l'expérience éducative de tous les lecteurs, en permettant que des points soient soulevés et examinés dans leur contexte et en respectant les normes requises pour un débat informé et instructif. Nous attendons donc de toutes les parties concernées qu'elles traitent les évaluations avec le plus grand sérieux.

La responsabilité finale de la publication incombe au président du conseil d'administration et au directeur du GWPF. Mais dans tous les cas, les opinions exprimées sont celles de l'auteur. Le GWPF n'a jamais eu d'autre position corporative que celle dictée par ses objectifs éducatifs.

À propos du GWPF (Global Warming Policy Foundation)

Les gens sont naturellement préoccupés par l'environnement et veulent des politiques qui le protègent tout en améliorant le bien-être humain ; des politiques qui ne nuisent pas, mais qui aident. Le Global Warming Policy Foundation (GWPF) se consacre à la recherche de politiques pratiques. Notre objectif est d'élever le niveau d'apprentissage et de compréhension par le biais d'une recherche et d'une analyse rigoureuses, afin d'alimenter un débat équilibré entre le public intéressé et les décideurs. Nous visons à créer une plateforme éducative sur laquelle un terrain d'entente peut être établi, en aidant à surmonter la polarisation et l'esprit partisan. Nous visons à promouvoir une culture de débat, de respect et de soif de connaissances.

À propos de l'Association des Climato-Réalistes

L'« **Association des Climato-Réalistes** » est une association française qui a pour objet de promouvoir un débat ouvert et libre sur l'évolution du climat et les questions sociétales et environnementales qui s'y rapportent, en favorisant l'expression sous toutes ses formes d'avis rigoureux et argumentés. Elle vise à sensibiliser le citoyen aux enjeux du climat et des politiques énergétiques menées au nom de la lutte contre le réchauffement climatique. L'association est apolitique et totalement libre dans l'expression de ses idées. Elle s'attache à diffuser une information fiable recueillie auprès de sources sérieuses.

THE GLOBAL WARMING POLICY FOUNDATION

Director

Benny Peiser

Honorary President

Lord Lawson

BOARD OF TRUSTEES

Dr Jerome Booth (Chairman)

The Hon. Tony Abbott

Lord Frost

Kathy Gyngell

Professor Michael Kelly FRS

Terence Mordaunt

Graham Stringer MP

Professor Fritz Vahrenholt

ACADEMIC ADVISORY COUNCIL

Professor Christopher Essex (Chairman)

Professor Wade Allison

Professor Anthony Barrett

Professor J. Ray Bates

Sir Ian Byatt

Dr John Constable

Professor Vincent Courtillot

Professor John Dewey

Professor Peter Dobson

Professor Peter Edwards FRS

Professor Samuel Furfari

Christian Gerondeau

Professor Larry Gould

Professor William Happer

Professor Ole Humlum

Professor Gautam Kalghatgi

Professor Terence Kealey

Bill Kininmonth

Brian Leyland

Professor Richard Lindzen

Professor Ross McKittrick

Professor Robert Mendelsohn

Professor Garth Paltridge

Professor Ian Plimer

Professor Gwythian Prins

Professor Paul Reiter

Professor Peter Ridd

Dr Matt Ridley

Sir Alan Rudge

Professor Nir Shaviv

Professor Henrik Svensmark

Dr David Whitehouse

Rapports récents du GWPF

20	Laframboise	Peer Review: Why Scepticism is Essential
21	Constable	Energy Intensive Users: Climate Policy Casualties
22	Lilley	£300 Billion: The Cost of the Climate Change Act
23	Humlum	The State of the Climate in 2016
24	Curry et al.	Assumptions, Policy Implications and the Scientific Method
25	Hughes	The Bottomless Pit: The Economics of CCS
26	Tsonis	The Little Boy: El Niño and Natural Climate Change
27	Darwall	The Anti-development Bank
28	Booker	Global Warming: A Case Study in Groupthink
29	Crockford	The State of the Polar Bear Report 2017
30	Humlum	State of the Climate 2017
31	Darwall	The Climate Change Act at Ten
32	Crockford	The State of the Polar Bear Report 2018
33	Svensmark	Force Majeure: The Sun's Role in Climate Change
34	Humlum	State of the Climate 2018
35	Peiser (ed)	The Impact of Wind Energy on Wildlife and the Environment
36	Montford	Green Killing Machines
37	Livermore	Burnt Offering: The Biomess of Biomass
38	Kelly	Decarbonising Housing: The Net Zero Fantasy
39	Crockford	The State of the Polar Bear Report 2019
40	Darwall	The Climate Noose: Business, Net Zero and the IPCC's Anticapitalism
41	Goklany	The Lancet Countdown on Climate Change: The Need for Context
42	Humlum	The State of the Climate 2019
43	Alexander	Weather Extremes: Are They Caused by Global Warming?
44	Constable	Hydrogen: The Once and Future Fuel?
45	Kessides	The Decline and Fall of Eskom: A South African Tragedy
46	Goklany	Impacts of Climate Change: Perception and Reality
47	Constable	A Little Nudge with a Big Stick
48	Crockford	The State of the Polar Bear Report 2020
49	Alexander	Weather Extremes in 2020
50	Humlum	The State of the Climate 2020
51	Humlum	The State of the Climate 2021
52	Constable	Europe's Green Experiment
53	Montford	Adaptation: The Rational Climate Policy
54	Alexander	Extreme Weather: The IPCC's Changing Tune
55	Ridd	Coral in a Warming World: Causes for Optimism
56	Humlum	The State of the Climate 2022