



L'ÉTAT DU CLIMAT EN 2021

Ole Hulum

The Global Warming Policy Foundation
Rapport 51

Traduction française



Association des Climato-Réalistes

L'État du Climat en 2021

Ole Humlum

Rapport 51, The Global Warming Policy Foundation

© Copyright 2022, The Global Warming Policy Foundation

À propos de l'auteur

Ole Humlum est ancien professeur de géographie physique au Centre universitaire de Svalbard, en Norvège, et professeur émérite de géographie physique à l'université d'Oslo, en Norvège.

Traduit de l'anglais par l'Association des Climato-Réalistes



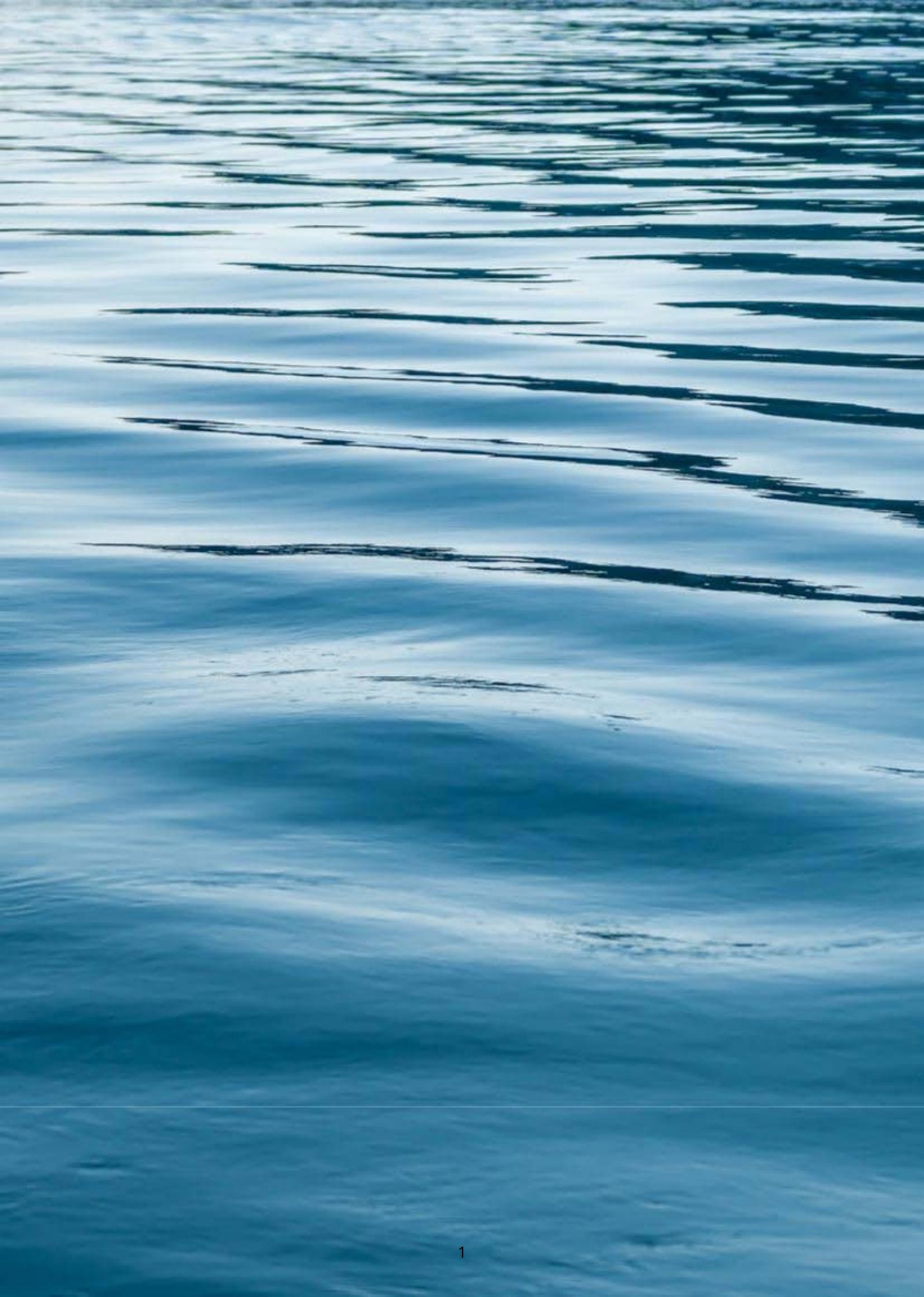
Table des matières

À propos de l'auteur.....	ii
Aperçu général 2021.....	2
Températures de l'air.....	2
Océans.....	2
Le niveau de la mer.....	3
Banquise.....	3
Couverture neigeuse.....	3
Tempêtes et ouragans.....	3
1. Température de l'air.....	4
Températures de surface : schéma spatial.....	4
Basse troposphère : mensuel.....	6
Basse troposphère : moyennes annuelles.....	7
Températures de surface mensuelles.....	8
Surface : moyennes annuelles.....	10
Erreur, cohérence et qualité.....	11
Surface et basse troposphère.....	14
Basse troposphère : terre contre océan.....	15
Changements de température à différentes altitudes.....	16
Températures zonales de l'air.....	17
Températures de l'air polaire.....	18
2. Gaz à effet de serre dans l'atmosphère.....	19
La vapeur d'eau.....	19
Dioxyde de carbone.....	20
3. Températures océaniques.....	22
Anomalies récentes de la température de surface.....	22
Par latitude.....	24
Par profondeur.....	25
Par région et par profondeur.....	27
Changement net de la température des océans entre 2004 et 2020 dans des secteurs sélectionnés.....	28
4. Oscillations océaniques.....	31
Indice d'oscillation australe.....	31
Oscillation décennale du Pacifique.....	31
Oscillation multidécennale de l'Atlantique.....	31
5. Niveau de la mer.....	33
En général.....	33
L'altimétrie satellitaire.....	34
Les marégraphes.....	35
Des modèles pour l'avenir.....	37
6. Neige et glace.....	39
Étendue des banquise arctique et antarctique.....	39
Couverture neigeuse dans l'hémisphère nord.....	41
7. Tempêtes et vent.....	43
Énergie cyclonique accumulée.....	43
Autres observations de tempêtes et de vents.....	45
8. Références.....	46
9. Liens vers les sources de données.....	46
10. Process.....	48
11. À propos de la Global Warming Policy Foundation.....	48
12. À propos de l'Association des Climato-Réalistes.....	48



L'ÉTAT DU CLIMAT EN 2021

Ole Humlum



Aperçu général 2021

Ce rapport est principalement axé sur les observations et non sur les résultats des modèles numériques, à l'exception de la Figure 39. Les références et les sources de données sont listées à la fin du rapport.

Températures de l'air

Les températures de l'air mesurées près de la surface de la planète (températures de l'air en surface) sont au centre de nombreuses discussions, mais l'importance d'un réchauffement ou d'un refroidissement observé sur une courte période de temps ne doit pas être surinterprétée. Chaque fois que 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 supérieure, qui se traduisent par un signal dans la température de l'air à l'échelle mondiale. Cependant, ces échanges de chaleur reflètent principalement une redistribution de l'énergie entre l'océan et l'atmosphère, et ne doivent pas être interprétés comme un changement du contenu thermique du système *atmosphère-océan*. L'évaluation de la dynamique des températures océaniques est donc tout aussi importante que celle des changements des températures de l'air en surface.

Si l'on considère les relevés de température de l'air en surface depuis le XIXe siècle, 2021 a été une année chaude, mais cependant plus froide que la plupart des années depuis 2016. Un épisode *La Niña* modéré a eu lieu en 2021, soulignant l'importance des échanges océan-atmosphère. De nombreuses régions arctiques ont connu des températures de l'air record en 2016, mais depuis lors, y compris en 2021, les conditions se sont généralement orientées vers des conditions un peu plus fraîches. Le pic de température dans les hautes latitudes nord en 2016 peut avoir été créé par la chaleur océanique libérée par l'océan Pacifique pendant le fort événement *El Niño* de 2015-16 et transportée ensuite vers la région arctique. Cela souligne à quel point les températures de l'air peuvent être affectées, non seulement par des variations des conditions locales, mais aussi par des variations intervenant dans des régions géographiquement éloignées.

De nombreuses figures de ce rapport se concentrent sur la période commençant 1979, début de l'ère satellitaire qui a rendu accessible des données d'observation avec une couverture presque mondiale, y compris des données de températures. Ces données fournissent une vue détaillée des changements de température au fil

du temps à différentes altitudes dans l'atmosphère. Entre autres phénomènes, ces observations révèlent qu'un plateau de température stratosphérique prévaut depuis 1995.

Depuis 1979, les températures de la basse troposphère ont augmenté à la fois sur les terres et les océans, mais plus nettement sur les terres. L'explication la plus plausible est qu'une grande partie du réchauffement est causée par l'insolation solaire, mais des causes secondaires ont pu aussi jouer un rôle, comme des changements dans la couverture nuageuse et l'utilisation des terres.

Océans

Le programme Argo, qui utilise des flotteurs robotisés pour surveiller la température des océans à différentes profondeurs, assure 18 ans de couverture mondiale, passant d'un réseau relativement clairsemé de 1 000 flotteurs en 2004 à plus de 3 900 en décembre 2021. Depuis 2004, ces flotteurs ont fourni un ensemble unique de données sur la température de l'océan pour des profondeurs allant jusqu'à 1 900 m. Les données dont nous disposons

actuellement ont été mises à jour en août 2020.

Bien que la profondeur des océans soit bien supérieure à 1900 mètres et que les séries de données Argo portent encore sur des périodes relativement courtes, il émerge aujourd'hui de ces observations des caractéristiques intéressantes. Par exemple, depuis 2004, la partie supérieure des océans (1900 mètres) a connu un réchauffement net d'environ 0,07 °C en moyenne mondiale. Le réchauffement net maximal (environ 0,2 °C) concerne les 100 premiers mètres, principalement près de l'équateur, qui reçoit la plus grande quantité de rayonnement solaire. À des profondeurs plus importantes, les flotteurs Argo ne montrent qu'un faible réchauffement net (environ 0,025 °C) entre 2004 et 2020. Le réchauffement est observé dans les océans équatoriaux qui, en raison de la forme sphérique de la planète, représentent une énorme surface.

Simultanément, les océans du nord (55-65°N) ont connu un refroidissement marqué jusqu'à 1400 m de profondeur, et un léger réchauffement au-delà. Les océans du sud (55-65°S) se sont légèrement réchauffés à la plupart des profondeurs depuis 2004, mais principalement près de la surface. Toutefois, comme nous le verrons plus loin dans ce rapport, les moyennes peuvent être trom-

peuses, et l'examen des détails permet une meilleure compréhension des phénomènes.

Le niveau de la mer

Le niveau mondial de la mer est surveillé par altimétrie satellitaire et par mesure directe à l'aide de marégraphes. Alors que les données satellitaires indiquent une élévation du niveau de la mer d'environ 3,3 mm par an ou plus, les données des marégraphes du monde entier indiquent une élévation stable de 1 à 2 mm par an. Les marégraphes n'indiquent aucune accélération (ou décélération) récente de l'élévation du niveau de la mer. La différence marquée (un rapport d'environ 1:2) entre les deux ensembles de données n'a pas d'explication universellement acceptée, mais on sait que les observations par satellite sont incertaines dans les zones proches des côtes (voir, par exemple, *Vignudelli et al. 2019*). Quoi qu'il en soit, les données marégraphiques sont plus utiles pour la planification côtière locale.

Banquise

En 2021, la couverture mondiale de la banquise est restée bien en dessous de la moyenne de l'ère satellitaire, mais elle augmente désormais. Fin 2016, elle avait atteint un minimum marqué, causé (au moins en partie) par des schémas de variation naturelle de la banquise différents aux deux pôles. Ces variations ont connu des minima simultanés en 2016. La tendance à la stabilité ou à l'augmentation de l'étendue de la banquise aux deux pôles a probablement commencé en 2018, et s'est renforcée depuis. La réduction marquée en 2016 de la banquise en Antarctique s'explique par des conditions de vent inhabituelles cette année-là.

Couverture neigeuse

Les variations de la couverture neigeuse mondiale sont principalement dues à des changements dans l'hémisphère nord, où se trouvent la plupart des zones terrestres. La neige de l'hémisphère sud se situe principalement dans l'Antarctique, et la couverture est donc relativement stable. La couverture neigeuse moyenne de l'hémisphère nord est stable depuis le début des observations par satellite, bien que des variations interannuelles locales et régionales puissent être importantes. Depuis 1979, la couverture neigeuse de l'hémisphère Nord en automne est en légère augmentation, celle du milieu de l'hiver est pratiquement stable et celle du printemps est en légère diminution. En 2021, la couverture neigeuse saisonnière de l'hémisphère Nord était proche de la moyenne 1972-2020.

Tempêtes et ouragans

Les données les plus récentes sur l'énergie cyclonique accumulée (ACE) au niveau mondial se situent dans la plage des valeurs observées depuis 1970. En fait, les données ACE sont très variables dans le temps, avec une périodicité significative de 3,6 ans, mais sans tendance claire à la hausse ou à la baisse. Une série plus longue disponible pour le bassin de l'Atlantique indiquerait une oscillation d'une périodicité d'environ 60 ans pour les tempêtes tropicales et l'énergie accumulée par les cyclones. Le nombre de cyclones atterrissant aux États-Unis reste dans la plage des valeurs observées depuis 1851.

1. Température de l'air

Températures de surface : schéma spatial

L'année 2021 a été marquée par un épisode froid *La Niña* (voir ci-dessous davantage de détails). Les températures moyennes mondiales de l'air en surface étaient plus basses que celles des dernières années, et il semble que 2016 ait pu marquer un pic de la température mondiale. Les prochaines années montreront si cette hypothèse est correcte.

L'hémisphère Nord a été marqué par des contrastes régionaux de température, en particulier au nord du 30°N. L'événement le plus marquant aura été l'observation en 2021 de températures moyennes basses en Russie et en Sibérie (par rapport aux dix dernières années), ce qui contraste fortement avec les conditions chaudes qu'ont connues ces régions en 2020. C'est dans ces régions, ainsi qu'en Alaska, que se trouvent les plus grandes zones de pergélisol de la planète.

Près de l'équateur, les températures de l'air en surface ont été généralement proches ou même inférieures à la moyenne des dix dernières années. Dans l'océan Pacifique, des conditions plus

fraîches sont le reflet de l'épisode *La Niña* en cours.

Dans l'hémisphère sud, les températures de l'air en surface ont été proches ou inférieures à celles de la moyenne des dix dernières années. L'Australie en particulier, a connu un refroidissement.

Dans l'Arctique, les zones *Europe-Russie-Sibérie-Alaska* ont été relativement froides, tandis que la plupart des zones Canada-Groenland ont été relativement chaudes.

Dans l'Antarctique, les températures ont été proches ou inférieures à celles de la moyenne décennale.

En résumé, les températures moyennes de l'air à l'échelle mondiale en 2021 étaient encore élevées par rapport à la période instrumentale complète (depuis 1850/1880), mais elles sont en diminution depuis 2016. L'influence de l'épisode *La Niña* dans l'océan Pacifique montre que les températures de l'air à la surface du globe continuent d'être fortement influencées par les phénomènes océanographiques.

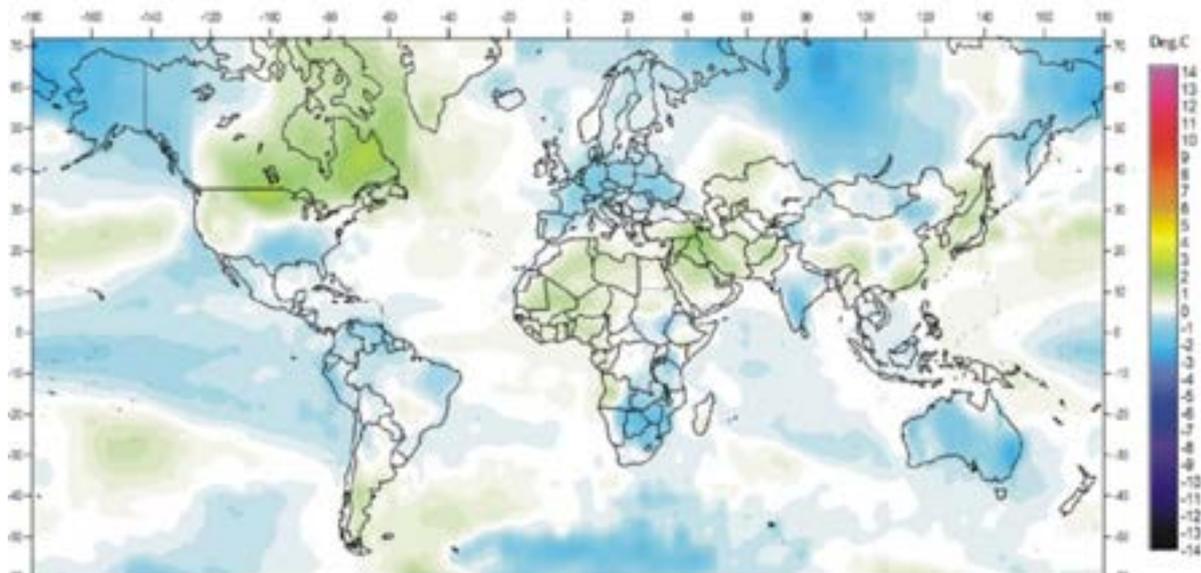


Figure 1 : Températures de l'air à la surface de 2021 comparées à la moyenne des 10 années précédentes.

Les couleurs vert-jaune-rouge indiquent les zones où la température a été supérieure à la moyenne, tandis que les couleurs bleues indiquent les zones où la température a été inférieure à la moyenne.

Source : Anomalies des température de surface télé détectées, AIRS/Aqua L3 Monthly Standard Physical Retrieval 1-degree x 1-degree V007 (<https://airs.jpl.nasa.gov/>), obtenues à partir du portail de données GISS (https://data.giss.nasa.gov/gistemp/maps/index_v4.html).

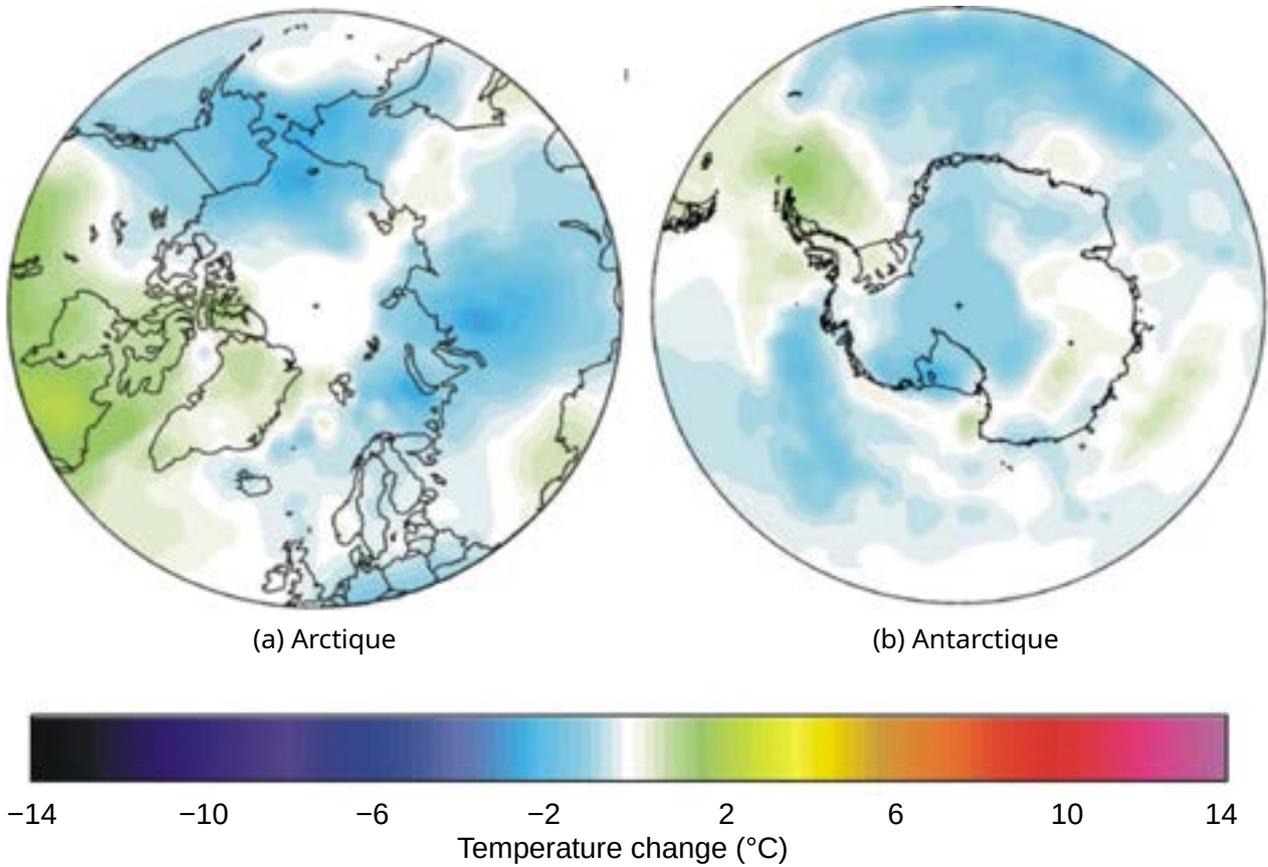


Figure 2 : Températures de l'air à la surface des pôles en 2021 par rapport à la moyenne des 10 années précédentes.

Les couleurs vert-jaune-rouge indiquent les zones où la température a été supérieure à la moyenne, tandis que les couleurs bleues indiquent les zones où la température a été inférieure à la moyenne.

Source : Anomalies de température de surface télé détectées, AIRS/Aqua L3 Monthly Standard Physical Retrieval 1-degree × 1-degree V007 (<https://airs.jpl.nasa.gov/>), obtenues à partir du portail de données du GISS (https://data.giss.nasa.gov/gistemp/maps/index_v4.html).



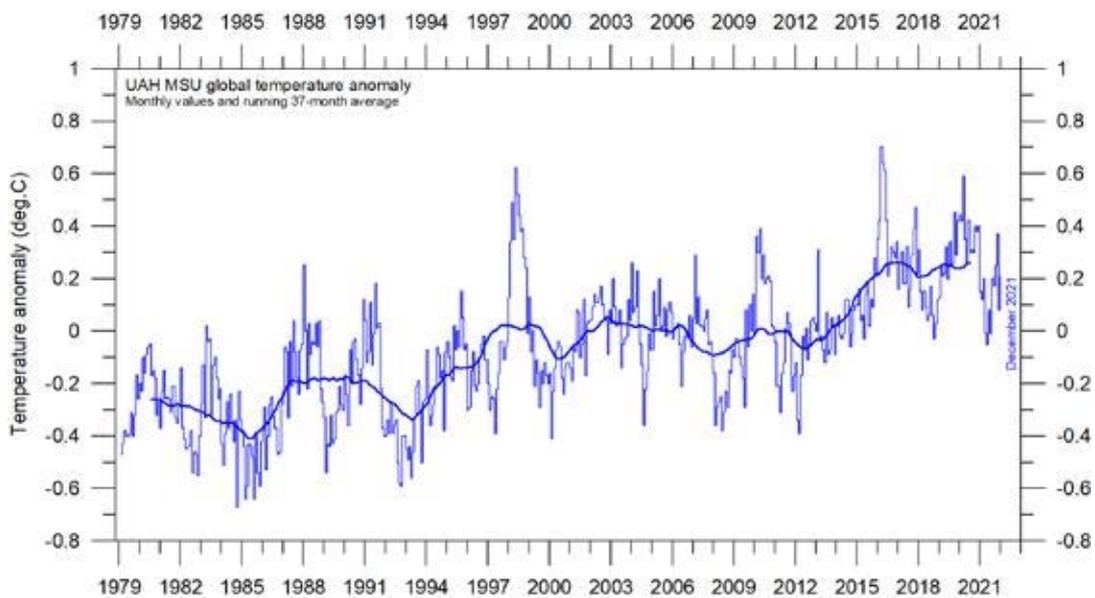
Basse troposphère : mensuel

Les deux enregistrements satellitaires de la température de la basse troposphère montrent clairement le pic de température associé à l'*El Niño* de 2015-16, suivi d'une baisse progressive, et d'un nouveau pic dû à l'*El Niño* modéré de 2019-20. La période en cours est marquée par une nouvelle baisse de température.

La variation globale de la température dans les diagrammes (Figures 3-4) est similaire pour les

deux séries de données, mais l'augmentation globale de la température sur la période 1979-2021 est plus importante pour RSS que pour UAH. Avant l'ajustement assez marqué de la série RSS en 2017, l'augmentation de la température était à peu près identique pour les deux jeux de données.

(a) UAH



(b) RSS

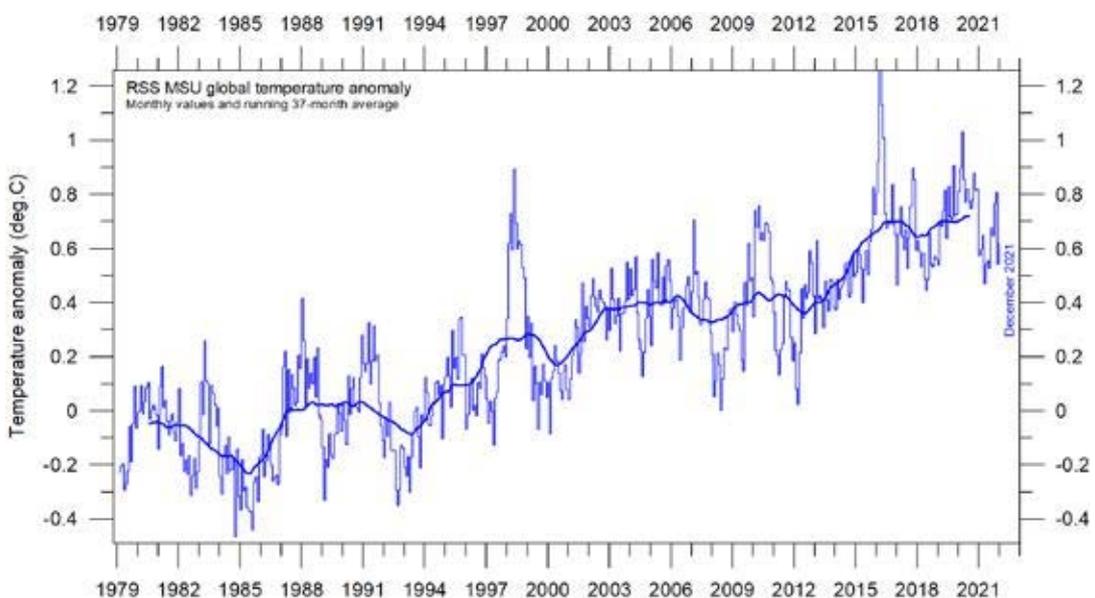


Figure 3 : Températures moyennes mensuelles mondiales de la basse troposphère depuis 1979.

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

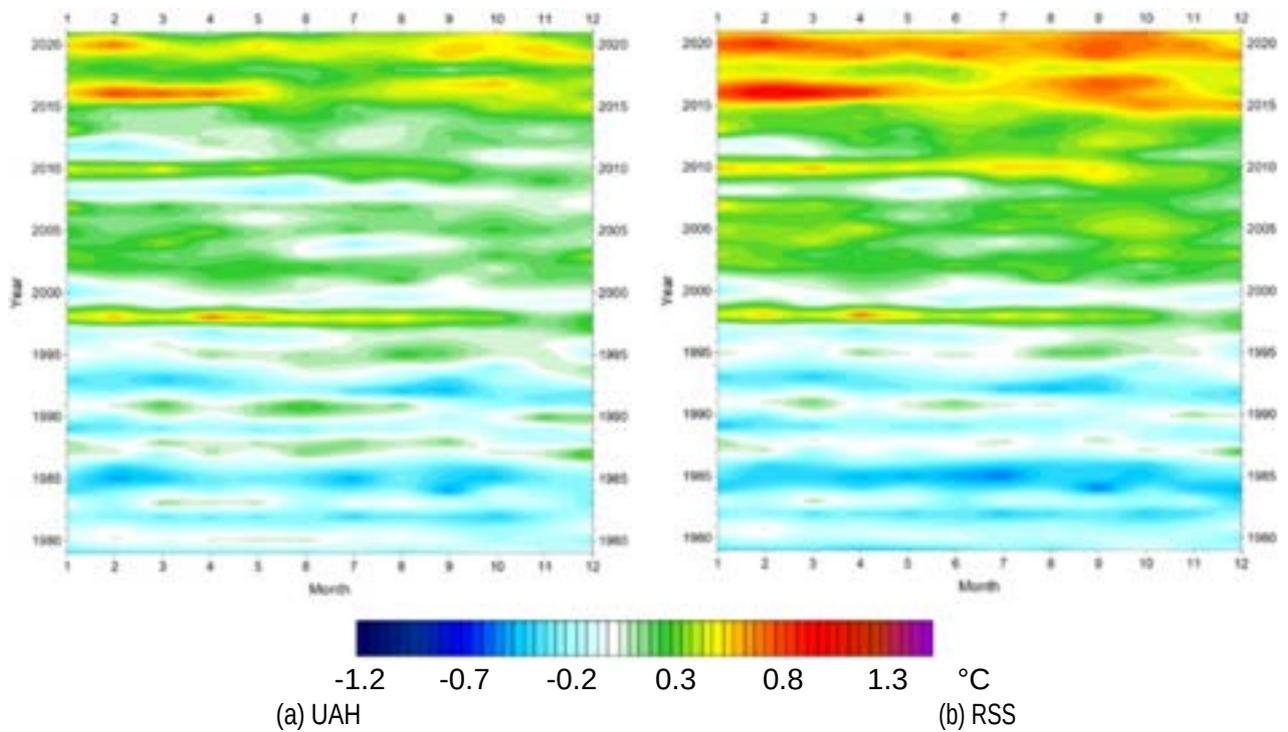


Figure 4 : Évolution temporelle des températures mondiales de la basse troposphère depuis 1979.

Anomalies de température par rapport à 1979-2008. Les effets des *El Niños* de 1998, 2010 et 2015-2016 sont clairement visibles, tout comme la tendance de nombreux *El Niños* à culminer pendant l'hiver de l'hémisphère nord. Les différentes bases de données de température utilisant des périodes de référence différentes, les séries ont été rendues comparables en mettant à zéro leur moyenne individuelle sur 30 ans (1979-2008).

Basse troposphère : moyennes annuelles

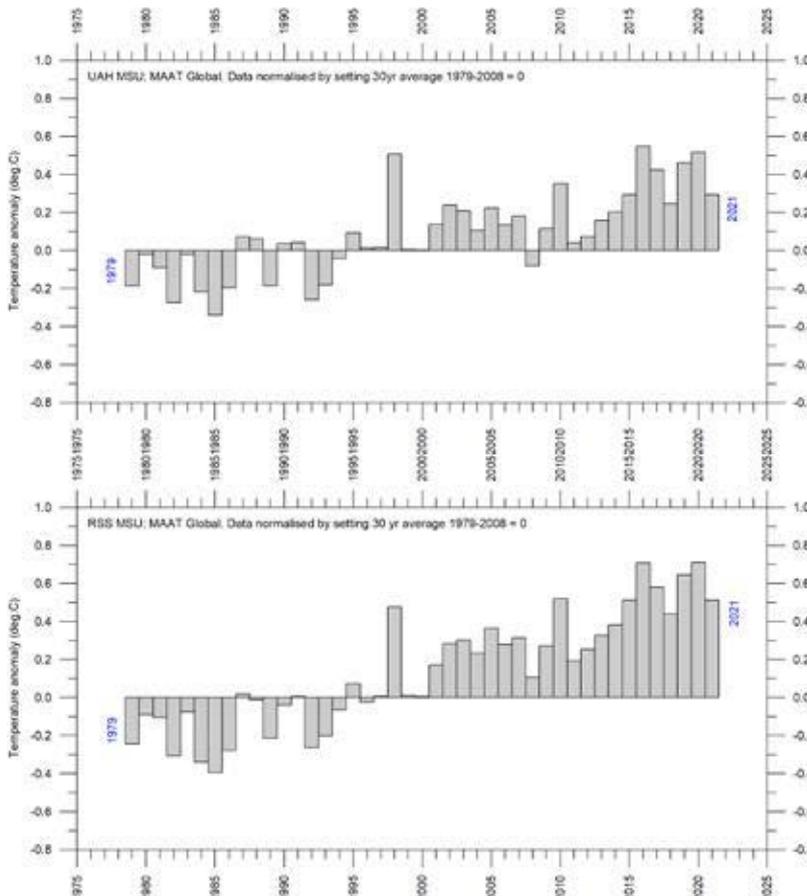


Figure 5 : Températures annuelles moyennes mondiales de l'air dans la basse troposphère depuis 1979.

Températures annuelles moyennes mondiales de l'air dans la basse troposphère depuis 1979.

Températures de surface mensuelles

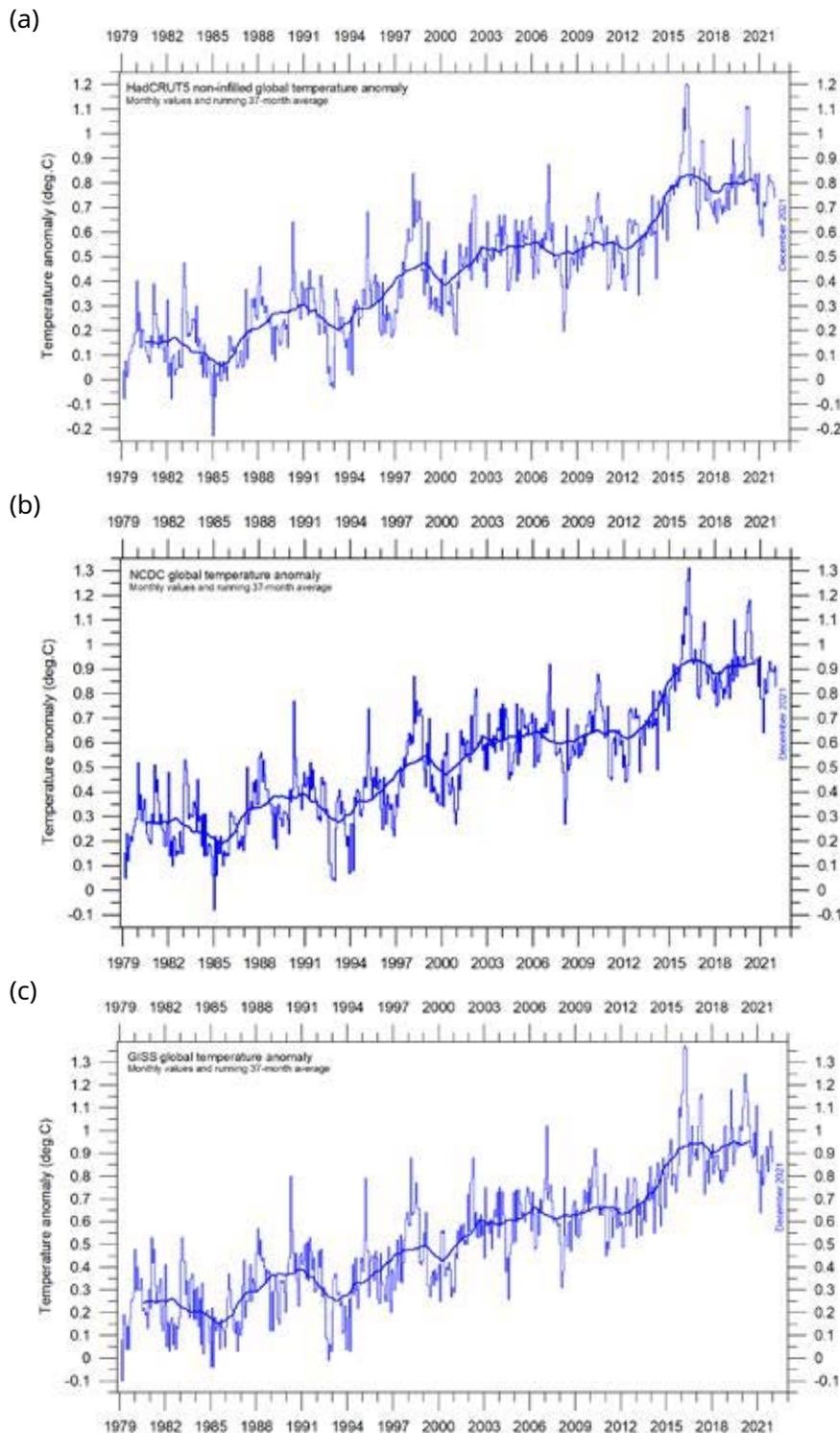
Les trois relevés de température de l'air en surface montrent clairement le pic de température associé à l' 2015-16, la baisse de température qui s'ensuivit et la nouvelle hausse de température due à l'*El Niño* modéré de 2019-20 (Figure 6).

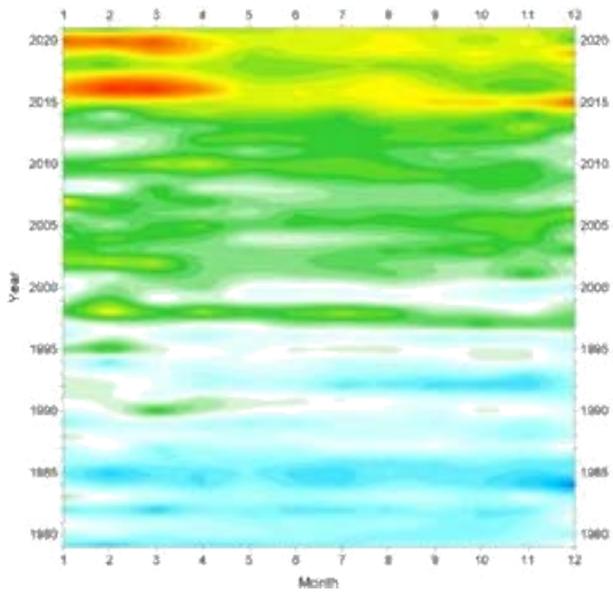
Cependant, ils confirment également que le récent épisode *El Niño* majeur a culminé au début

de 2016 et a été suivi d'un retour progressif vers les conditions qui prévalaient avant 2015, puis d'une nouvelle augmentation en 2019, et enfin de la toute dernière baisse de température. Cette évolution est également illustrée par les Figures 6-7.

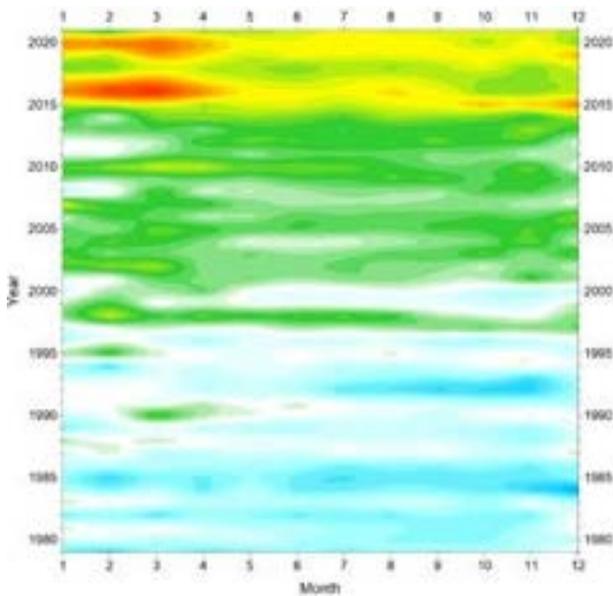
Figure 6 : Températures mensuelles moyennes mondiales de l'air en surface depuis 1979.

(a) *HadCRUT4* (b) *NCDC* (c) *GISS*. La ligne épaisse est la moyenne mobile sur 37 mois, correspondant à la moyenne mobile d'une période de 3 ans.

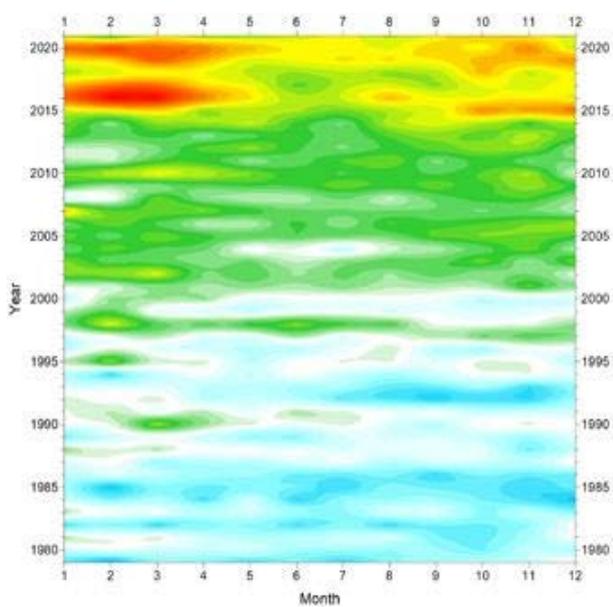




(a) HadCRUT



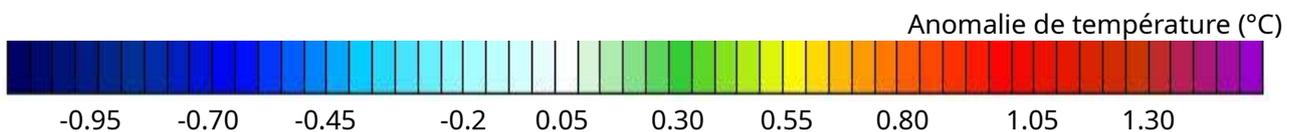
(b) NCDC



© GISS

Figure 7 : Évolution temporelle des températures mensuelles moyennes de l'air à la surface du globe.

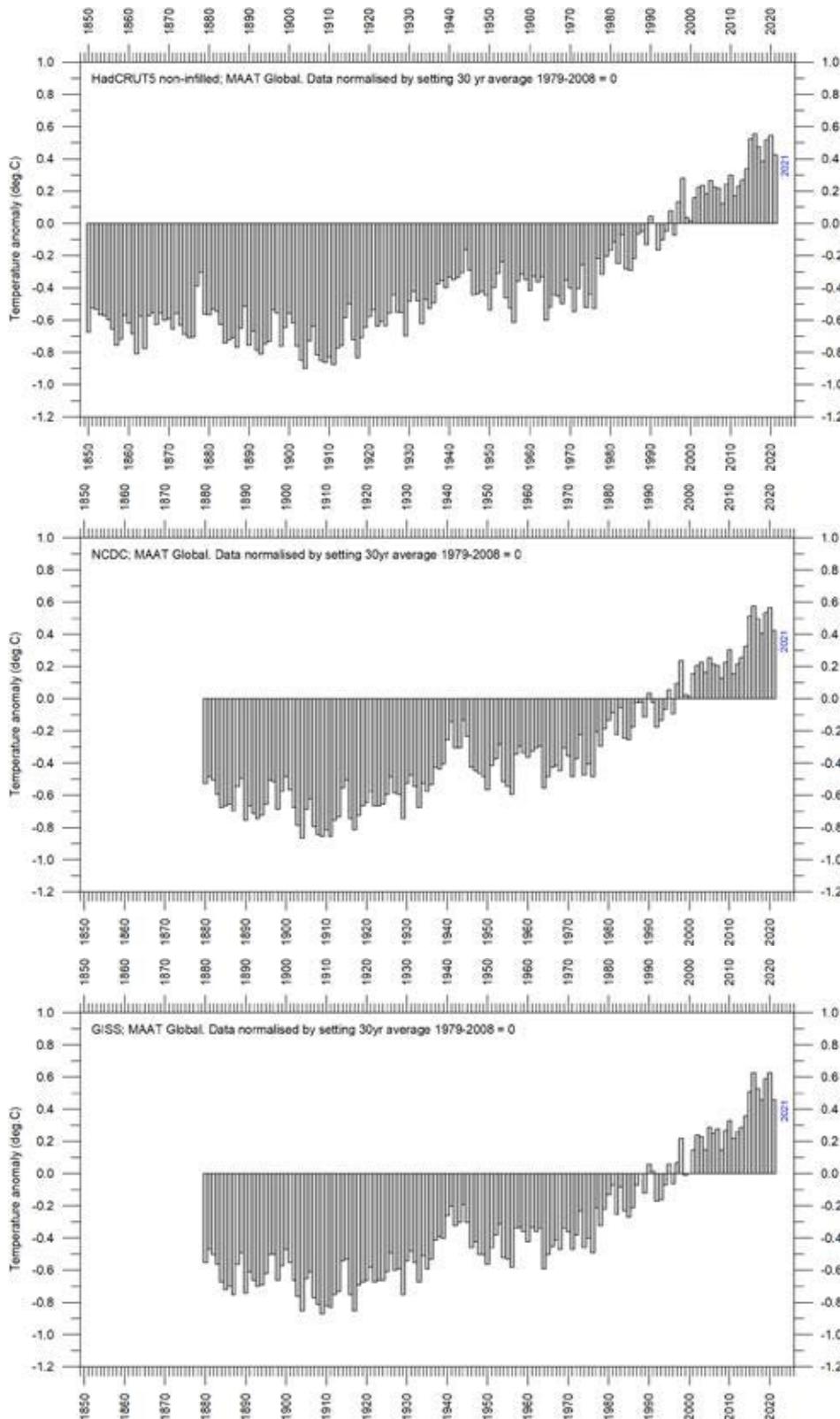
(a) HadCRUT (b) NCDC (c) GISS. Anomalie de température (°C) par rapport à 1979-2008.



Surface : moyennes annuelles

Les trois estimations de la température moyenne de l'air en surface montrent que l'année 2021 a été plus froide que la plupart des années depuis 2016 (Figure 8). Comme nous l'avons déjà

noté, l'année 2021 a été influencée par un épisode *La Niña* qui se déroule dans l'océan Pacifique (voir Figure 23).



(a) HadCRUT

(b) NCDC

(c) GISS

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

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

Erreur, cohérence et qualité

Les températures de l'air en 2021 ont été élevées relativement à la durée totale des différentes séries de données (depuis 1850, 1880 ou, pour les satellites, 1979). Les relevés de température de surface sont une combinaison de données sur la surface de la mer, recueillies à partir de navires en mouvement ou par d'autres moyens, et de données provenant de stations terrestres dont la qualité est en partie inconnue et dont le degré de représentativité pour leur région est inconnu également. En effet, de nombreuses stations terrestres ont été déplacées géographiquement au cours de leur période de fonctionnement, les instruments ont été modifiés et la plupart des stations sont influencées par les changements constants de leur environnement (végétation, bâtiments, etc.). Les enregistrements de température par satellite présentent également des problèmes spécifiques, mais ceux-ci sont généralement de nature plus technique et sont donc probablement plus faciles à corriger. En outre, l'échantillonnage des températures par les satellites est plus régulier et plus complet à l'échelle mondiale, et donne donc une meilleure représentation que les enregistrements 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 une 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 :

L'exactitude est définie par le degré de proximité d'une valeur mesurée par rapport à la valeur « réelle ».

La précision est la répétabilité, attribut selon lequel des mesures répétées dans des conditions inchangées indiquent la même valeur, vraie ou non.

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 2021 avant mars ou avril 2022, 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 des températures de l'air de la surface du globe du GISS, qui remonte à 1880. L'effet net global est un réchauffement de la partie ancienne et récente de l'enregistrement et un refroidissement de la période intermédiaire, en gros de 1900 à 1970. Les changements dans les valeurs annuelles sont parfois très importants, allant de $+0,15$ à $-0,15$ °C environ.

Pour illustrer l'effet de ces changements « administratifs » d'une manière différente, la Figure 10 montre comment les températures de l'air à la surface du globe pour janvier 1910 et janvier 2000 (mois indiqués dans la Figure 15) ont changé depuis mai 2008, toujours selon l'enregistrement du GISS.

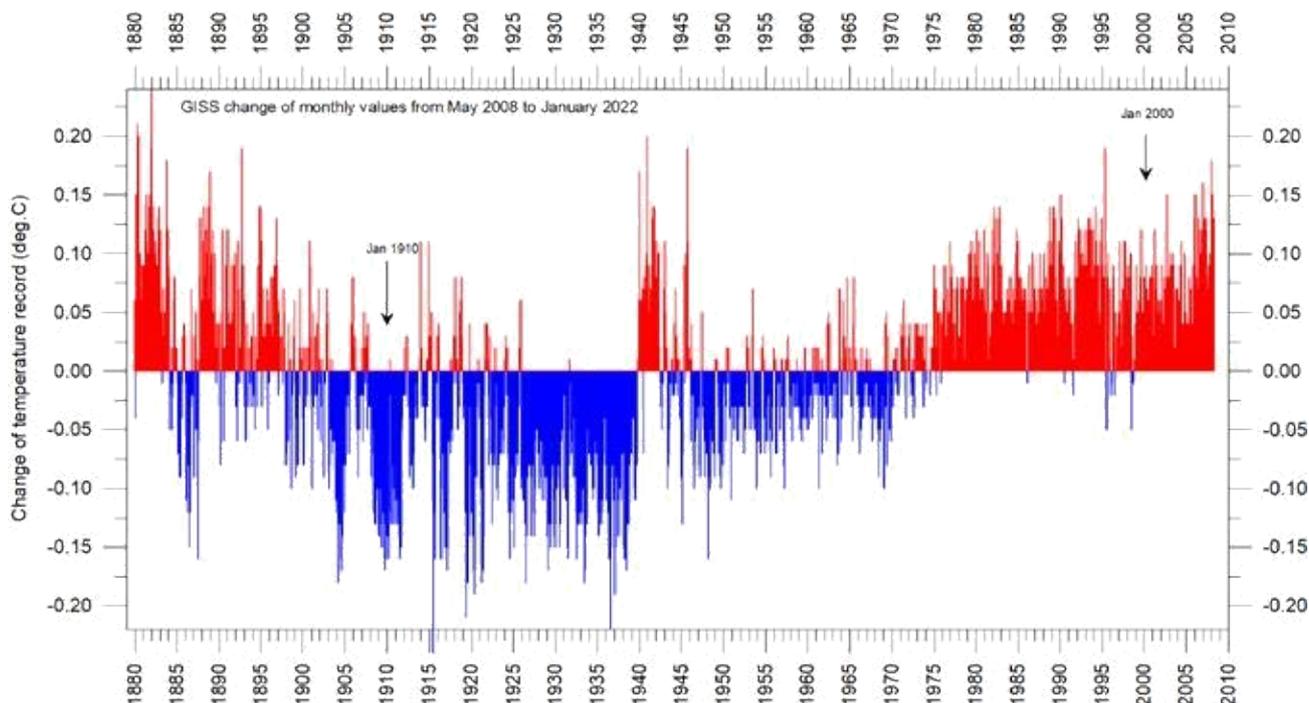


Figure 9 : Ajustements effectués depuis le 17 mai 2008 dans les données de températures de surface du GISS.

La différence de température entre janvier 1915 et janvier 2000 est passée de 0,45 °C (comme indiqué en mai 2008) à 0,67 °C (comme indiqué en janvier 2022). Cela représente une augmentation d'environ 49 % sur cette période, ce qui signifie qu'environ la moitié de l'augmentation apparente de la température mondiale entre janvier 1910 et janvier 2000 est due aux ajustements « administratifs » des données originales effectués depuis mai 2008. Il est évident que de telles modifications sont importantes lorsqu'on évalue la qualité globale de divers relevés de température, ainsi que d'autres sources d'erreur standard. En fait, l'ampleur des modifications « administratives » peut dépasser la marge d'erreur formelle.

En 2021, une nouvelle version de la base de données *HadCRUT* a été introduite. *HadCRUT5* se décline en deux sous-versions, appelées respectivement *HadCRUT5 analysis* et *HadCRUT5non-infilled*. Toutes deux fournissent des anomalies historiques de température de surface à l'échelle mondiale par rapport à une période de référence 1961-1990. Comme pour la version précédente *HadCRUT4*, les données *HadCRUT5* sont moyennées sur une grille régulière, aucune valeur n'étant fournie dans les cellules de la grille ne contenant aucune observation. Pour *HadCRUT5analysis*, une méthode statistique a ensuite été utilisée pour modéliser la couverture dans les cellules de grille sans observations, afin de fournir

un ensemble de données plus complet au niveau mondial. Pour *HadCRUT5non-infilled*, ce n'est pas le cas (comme pour *HadCRUT4*). La Figure 11 ci-dessous montre les différences entre *HadCRUT4*, *HadCRUT5non-infilled* et *HadCRUT5analysis*.

L'effet global du changement de version de *HadCRUT4* à *HadCRUT5* est un refroidissement apparent de la période 1880-1975, et un réchauffement apparent des périodes avant 1880 et après 1975. Le réchauffement et le refroidissement apparents sont d'environ +0,1 et -0,1°C, respectivement (Figure 11). Le changement de version donne l'impression d'une augmentation un peu plus rapide de la température mondiale après la période relativement froide qui s'est terminée vers 1975. Dans le présent rapport, les données de la version non remplie de *HadCRUT5* sont utilisées, afin de rester centré sur les observations. Tous ceux qui s'intéressent à la science du climat devraient reconnaître les efforts déployés dans la maintenance des différentes bases de données de température mentionnées dans le présent rapport. En même temps cependant, il est également important de considérer que tous les enregistrements 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 totalement corrects.

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

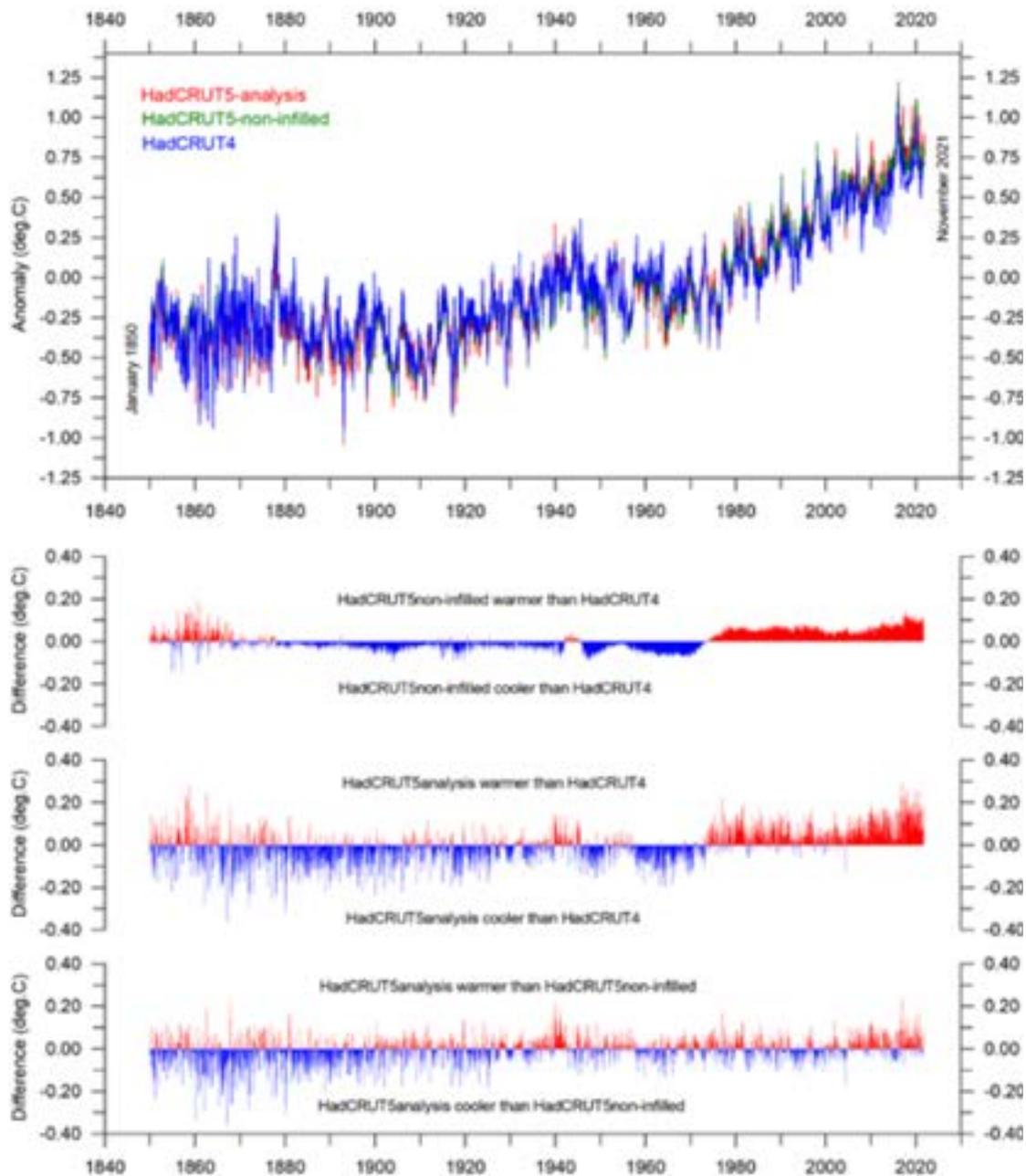
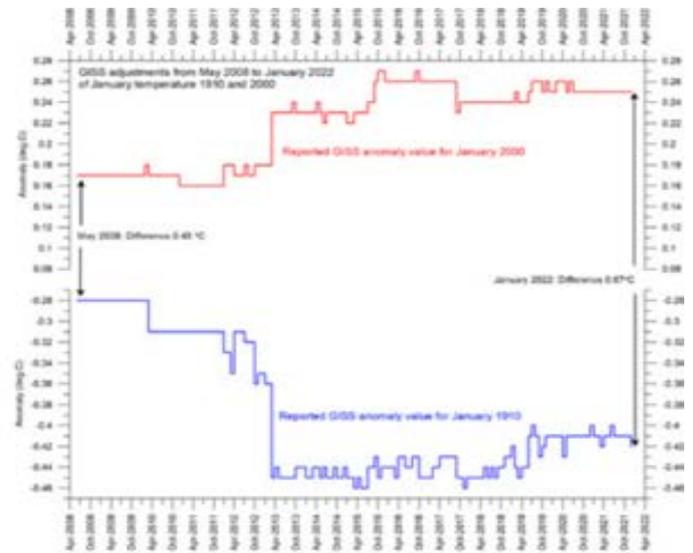


Figure 11 : Différences entre *HadCRUT4*, *HadCRUT5non-infilled* et *HadCRUT5analyse*.

Surface et 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 12. 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.

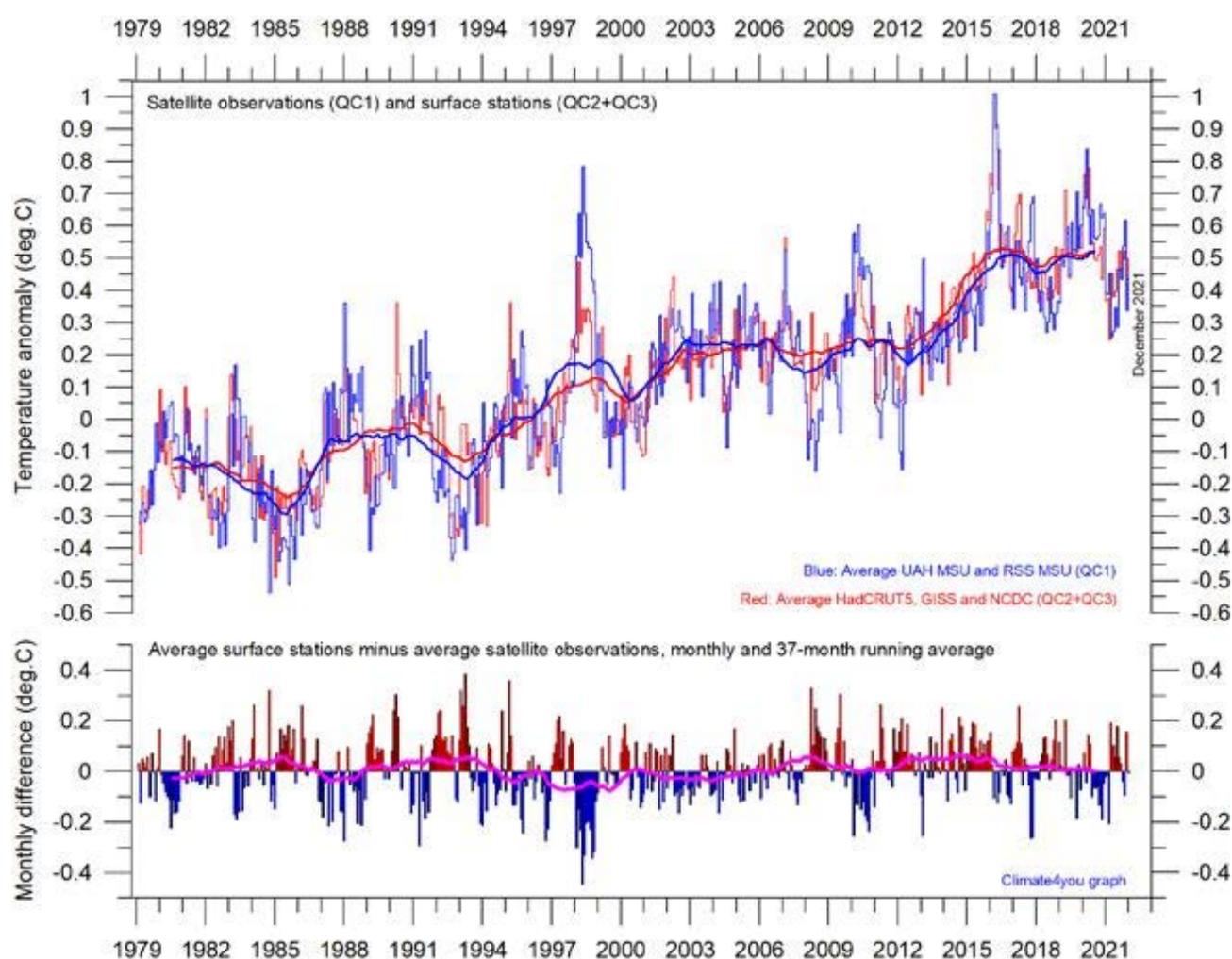


Figure 12 : Températures de surface par rapport aux températures de la basse troposphère.

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

Basse troposphère : terre contre océan

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

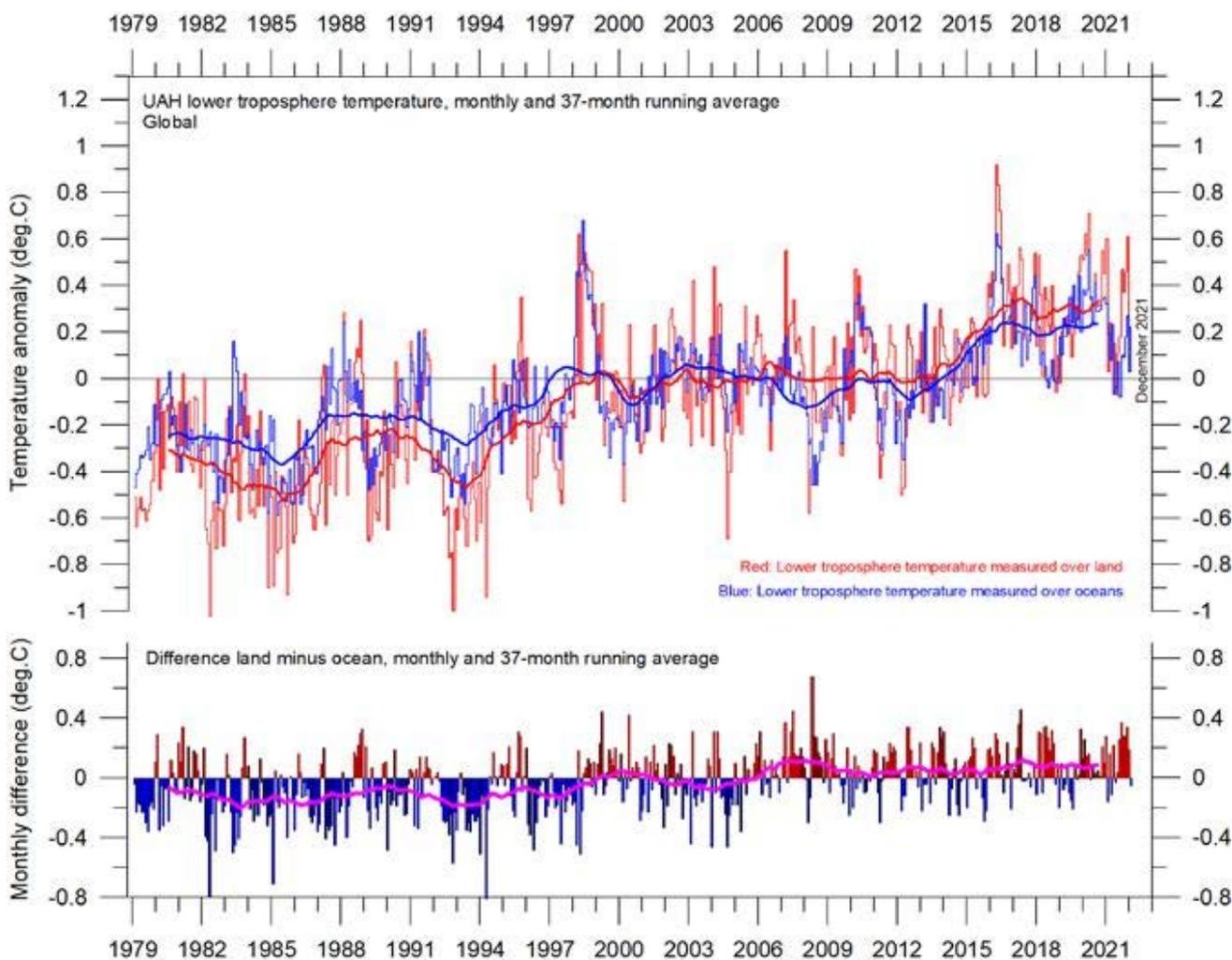


Figure 13 : Températures de la basse troposphère sur les terres et les océans

Température moyenne mensuelle globale de la basse troposphère depuis 1979, mesurée sur les terres et les océans, représentée en rouge et en bleu, selon l'Université d'Alabama à Huntsville (UAH). Les lignes fines représentent la moyenne mensuelle, et la ligne épaisse la moyenne simple sur 37 mois, correspondant presque à une moyenne sur 3 ans.

Changements de température à différentes altitudes

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.

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.

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. Ces deux pics peuvent être liés à des éruptions volcaniques majeures, comme indiqué sur la figure. Si l'on ne tient pas compte de ces pics, on

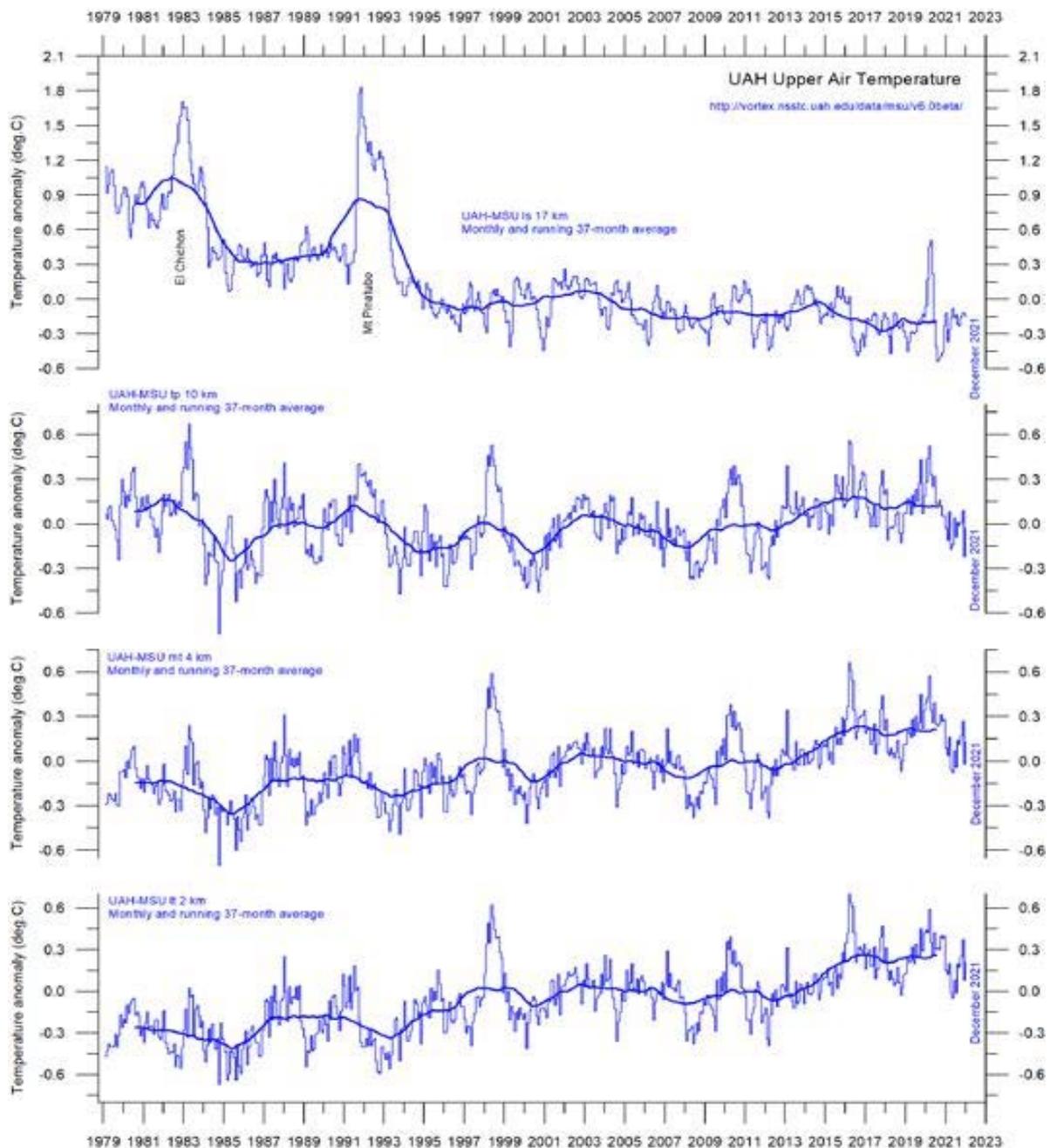


Figure 14 : Température en fonction de l'altitude.

Température moyenne mensuelle globale à différentes altitudes selon l'Université d'Alabama à Huntsville (UAH), USA. Les lignes fines représentent la moyenne mensuelle, et la ligne épaisse la moyenne sur 37 mois, correspondant presque à une moyenne sur 3 ans.

observe jusqu'en 1995 environ une baisse persistante et marquée de la température, attribuée par certains scientifiques à l'effet de la chaleur piégée par le dioxyde de carbone dans la troposphère. Cependant, la baisse marquée des températures s'est en gros terminée vers 1995-96, date à partir

Températures zonales de l'air

La Figure 15 montre que le réchauffement « global » observé depuis 1980 a concerné principalement l'hémisphère nord et s'est manifesté par un changement brusque entre 1994 et 1999. Ce changement rapide de température a toutefois été influencé par l'éruption du Mont Pinatubo en 1992-93 et par l'épisode *El Niño* de 1997. La Figure 15 révèle également comment les effets sur

de laquelle un long plateau de température a été observé. En 2020, cependant, il y a eu un pic de température marqué, mais de courte durée, suivi rapidement d'une baisse équivalente de la température. Depuis la fin de 2020, les températures sont revenues à leur niveau d'avant 2020.

la température des forts *El Niños* de 1997 et 2015-16, ainsi que celui, modéré, de 2019, se sont apparemment propagés à des latitudes plus élevées dans les deux hémisphères après un certain laps de temps. Cet effet *El Niño* sur les températures a toutefois été principalement enregistré dans l'hémisphère nord, et dans une moindre mesure dans l'hémisphère sud.

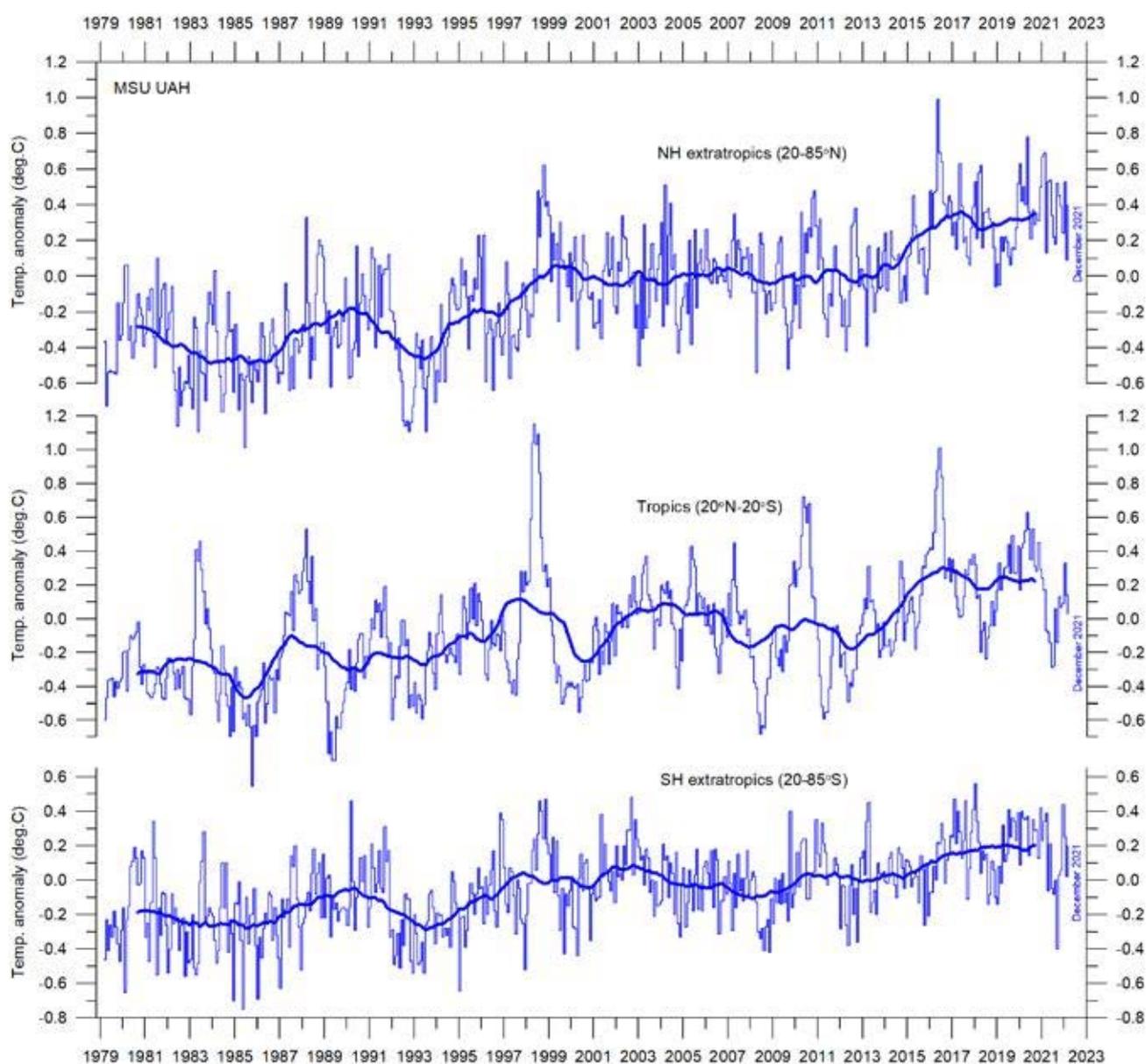


Figure 15 : Températures zonales de l'air

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

Températures de l'air polaire

Dans l'Arctique, le réchauffement s'est principalement produit au cours de la période 1994-96, et moins par la suite (Figure 16). En 2016, cependant, les températures ont atteint des sommets pendant plusieurs mois, vraisemblablement en raison de la chaleur océanique cédée à l'atmosphère pendant le phénomène *El Niño* de 2015-16 (voir également la Figure 23), puis se sont déplacées 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 presque stables depuis le début de l'enregistrement par satellite en 1979. En 2016-17, un petit pic de température visible dans l'enregistrement mensuel peut être interprété comme l'effet atténué du récent épisode *El Niño*.

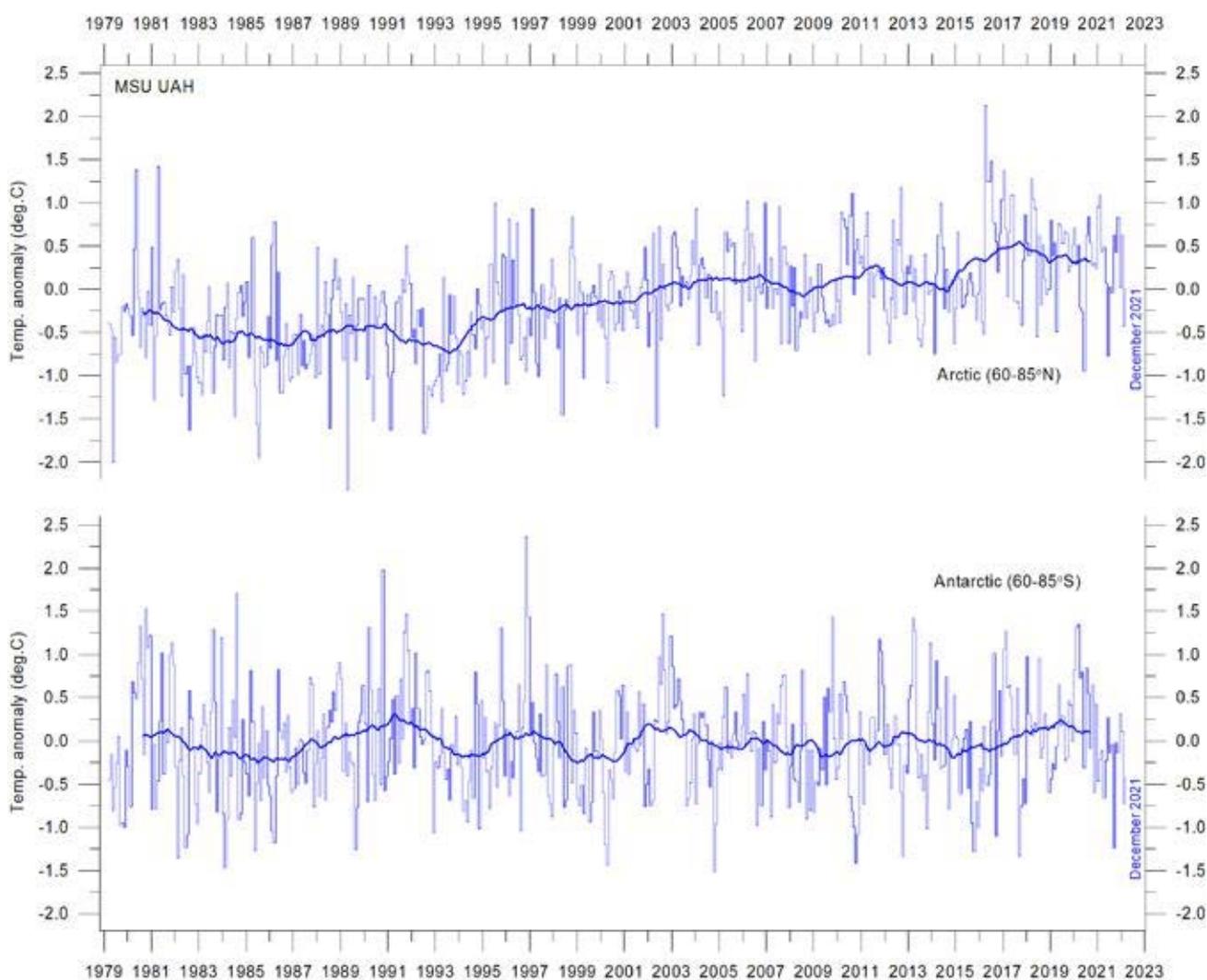


Figure 16 : Températures polaires

Température moyenne mensuelle globale de la basse troposphère depuis 1979 pour les régions du pôle Nord et du pôle Sud, selon l'Université d'Alabama à Huntsville, États-Unis. Les lignes épaisses représentent la moyenne simple sur 37 mois.

2. Gaz à effet de serre dans l'atmosphère

La vapeur d'eau

La vapeur d'eau est le plus important gaz à effet de serre de la troposphère. La concentration la plus élevée se trouve dans les latitudes allant de 50°N à 60°S. Les deux régions polaires de la troposphère sont comparativement sèches. La vapeur d'eau est un gaz à effet de serre beaucoup plus important que le dioxyde de carbone, tant par son spectre d'absorption que par sa concentration dans l'atmosphère.

La Figure 17 montre que l'humidité atmosphérique spécifique est stable ou en légère augmentation jusqu'à environ 4-5 km d'altitude. Aux niveaux supérieurs 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 se superposant à la tendance à la baisse. Une analyse de fréquence de Fourier (non présentée ici) montre que ces changements sont influencés non seulement par des variations annuelles, mais aussi par une variation périodique d'une durée d'environ 34,5 années.

La diminution légère, mais persistante, 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 dioxyde de carbone atmosphérique est censé se manifester initialement.

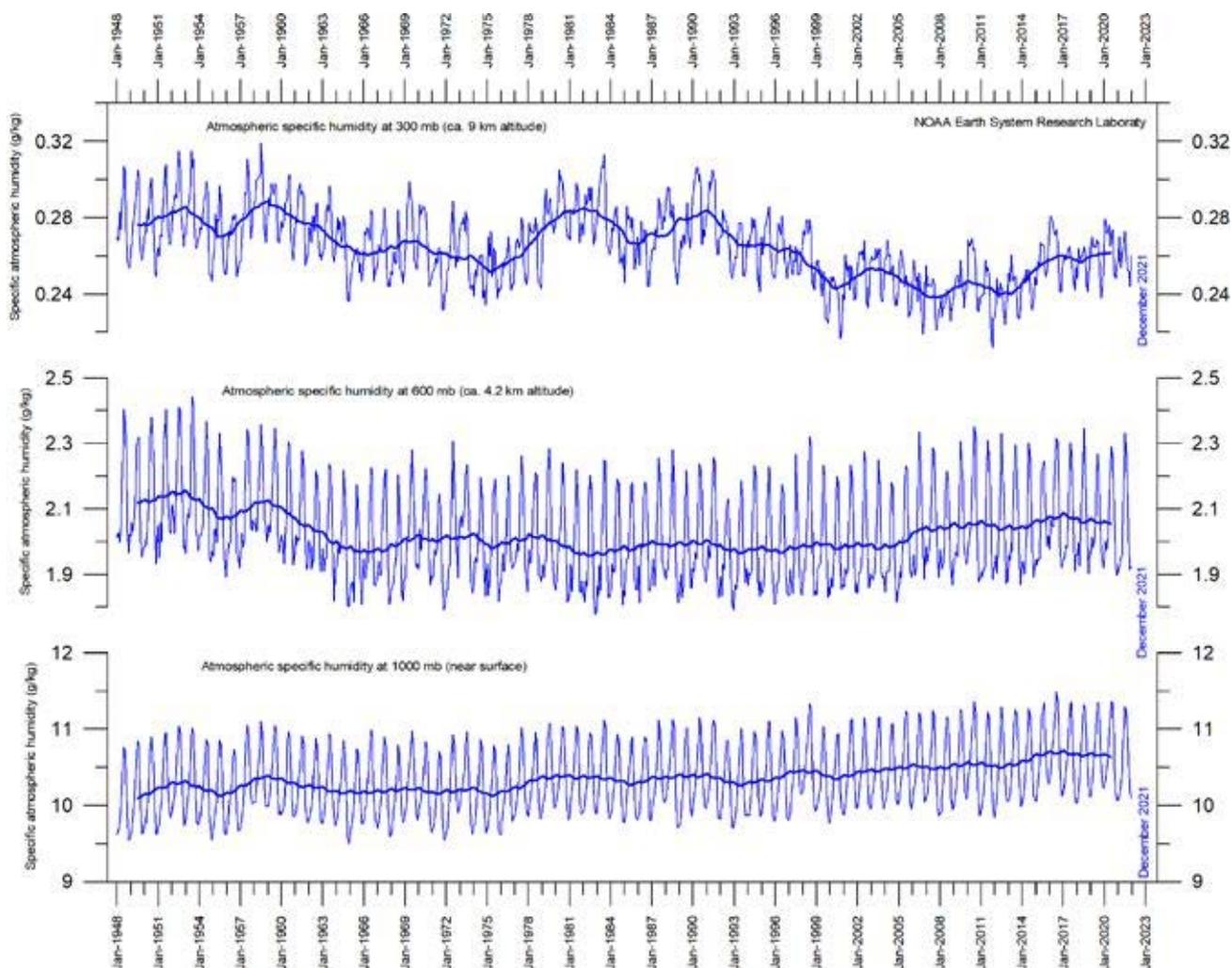


Figure 17 : Humidité

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 est un important gaz à effet de serre, bien que moins important que la vapeur d'eau. Les concentrations ont augmenté pendant toute la durée de l'enregistrement sur le site de Mauna Loa (depuis 1958), avec toutefois un cycle annuel superposé à la tendance (Figure 18). À la fin de l'année 2021, la concentration atmosphérique était proche de 417 parties par million (ppm).

Le dioxyde de carbone est généralement considéré comme un gaz relativement bien mélangé dans la troposphère. La variation annuelle de la concentration troposphérique a augmenté, passant d'environ +1 ppm/an au début de l'enregistrement à environ +2,6 ppm/an vers la fin de l'enregistrement (Figure 19). Une analyse de fréquence de Fourier (non présentée ici) suggère que le changement annuel du dioxyde de carbone troposphérique est influencé par une variation périodique significative d'une durée de 3,6 ans. Depuis janvier 2020, il n'y a pas eu d'effet visible du blo-

cage mondial COVID-19 sur les concentrations atmosphériques.

Il est intéressant d'examiner la variation annuelle du CO₂ atmosphérique parallèlement aux variations annuelles de la température de l'air et de la température de la surface de la mer à l'échelle mondiale (Figure 20). Les trois varient de concert, mais la température de la surface de la mer est en avance de quelques mois sur la température globale et les taux de changement du CO₂ atmosphérique sont en retard de 11 à 12 mois sur les taux de changement de la température de la surface de la mer. Les changements importants semblent provenir de la surface de la mer.

La Figure 21 montre visuellement l'association entre le changement annuel du CO₂ atmosphérique et les épisodes *La Niña* et *El Niño*, soulignant l'importance de la dynamique océanographique pour comprendre les changements du CO₂ atmosphérique.

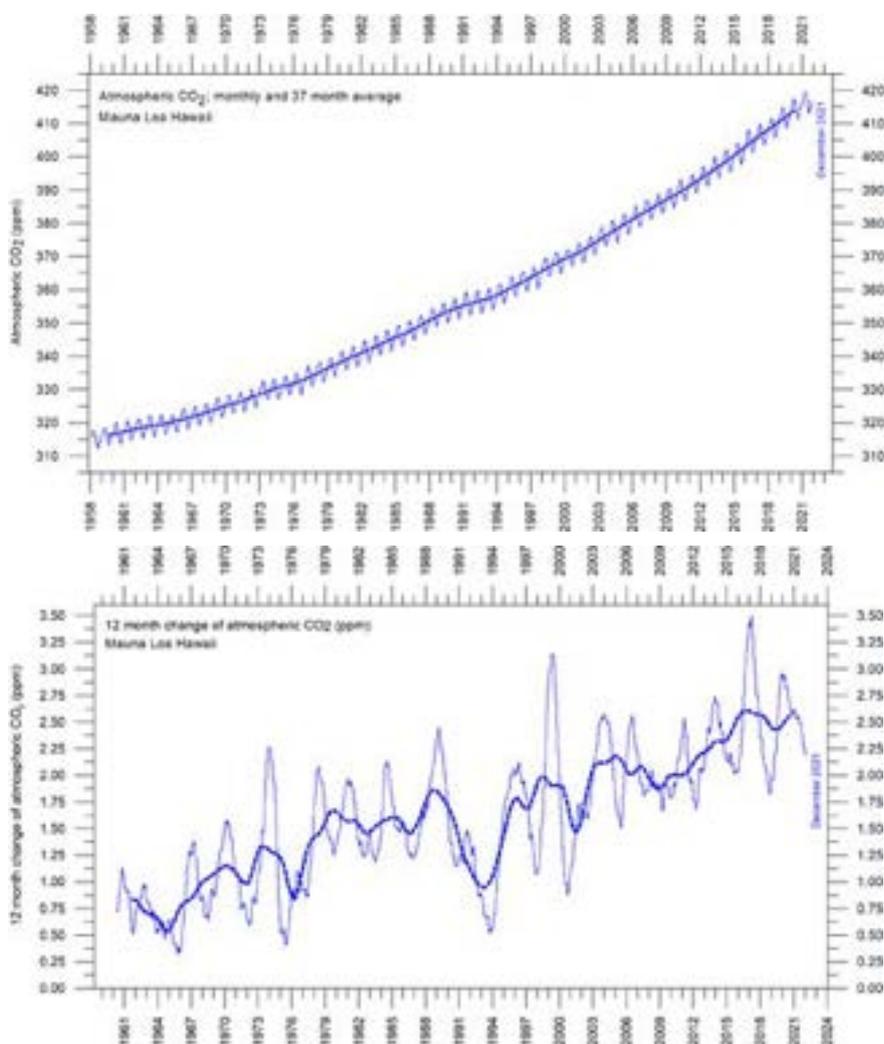


Figure 18 :
L'enregistrement du CO₂ du Mauna Loa

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

**Figure 19 : Variation
annuelle du CO₂**

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

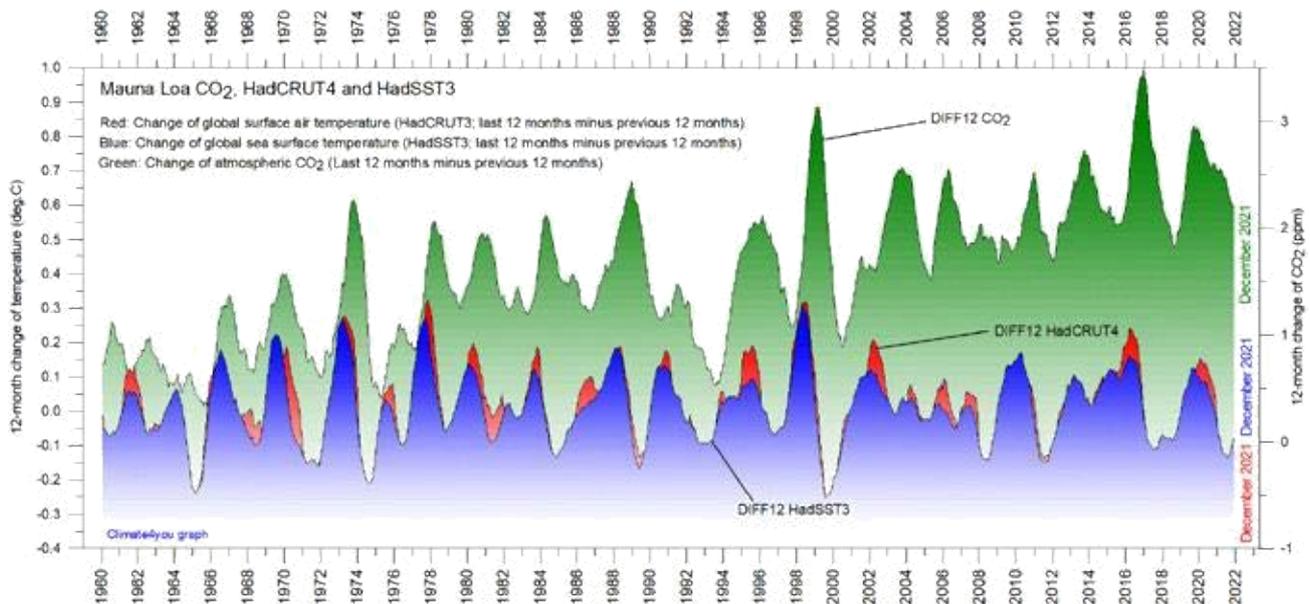


Figure 20 : Corrélation entre les concentrations de dioxyde de carbone et les relevés de température.

Variation annuelle (sur 12 mois) de la concentration atmosphérique globale de CO₂ (Mauna Loa ; vert), de la température globale de la surface de la mer (HadSST3 ; bleu) et de la température globale de l'air en surface (HadCRUT4 ; 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.

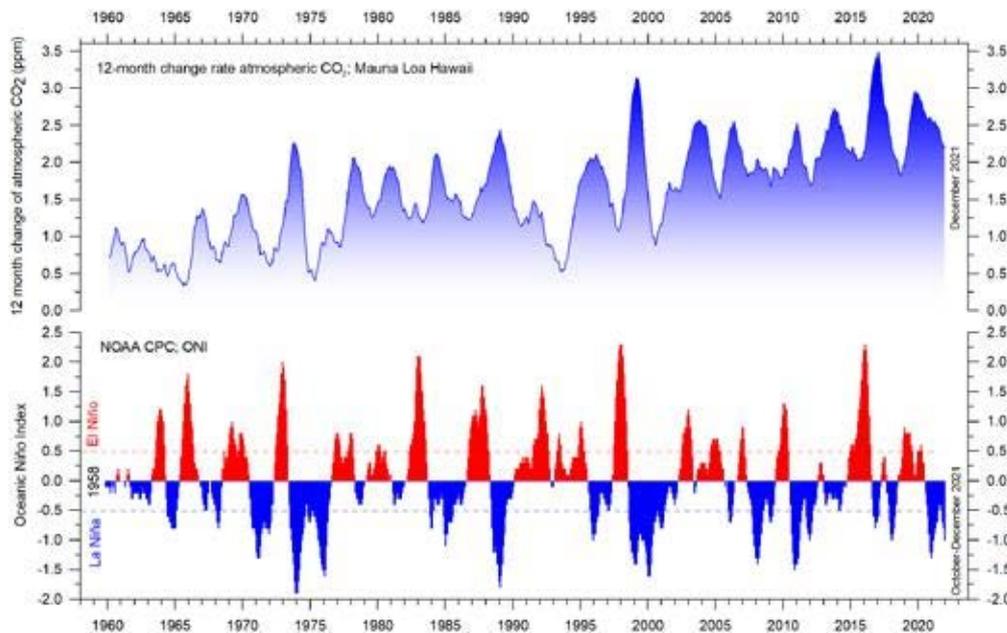


Figure 21 : Croissance du CO₂ et épisodes *El Niño* et *La Niña*

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

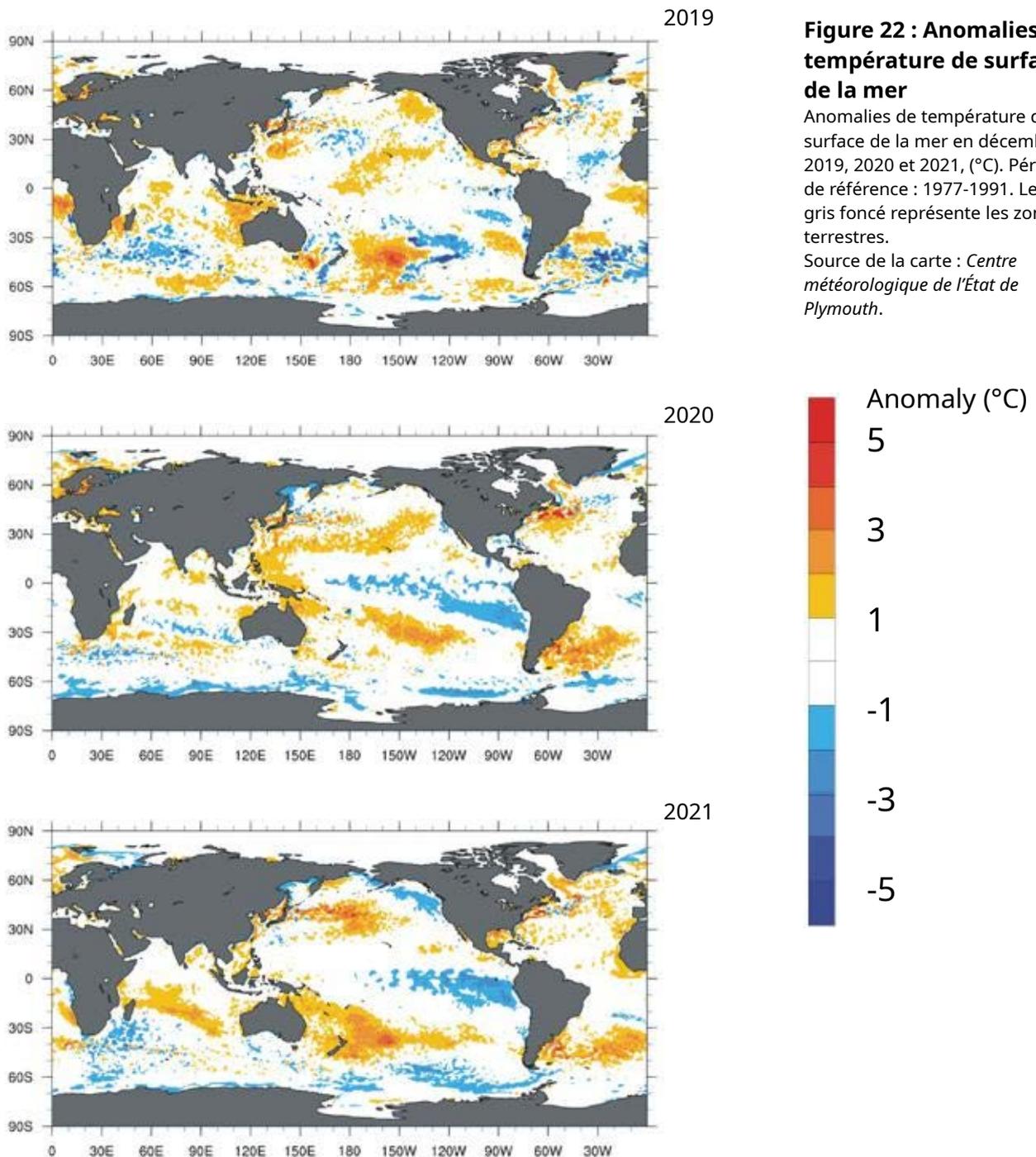
3. Températures océaniques

Anomalies récentes de la température de surface

Les trois cartes de la Figure 22 montrent la situation presque neutre à la fin de décembre 2019, suivie d'une *La Niña* modérée pendant une grande partie de 2020 et 2021.

La Figure 23 montre tous les épisodes *El Niño* et *La Niña* depuis 1950. Le récent épisode de

2015-16 a été parmi les plus forts depuis le début des enregistrements en 1950. Toutefois, sur l'ensemble des données, les variations récentes entre les épisodes *El Niño* et *La Niña* ne semblent pas anormales.



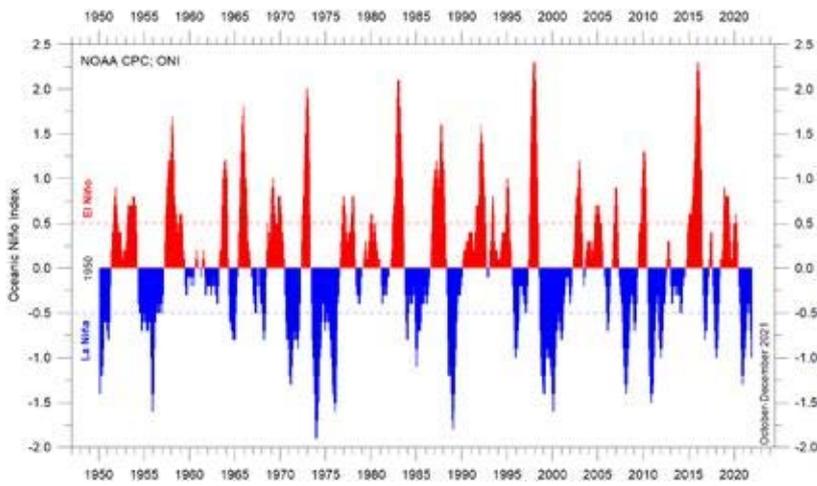
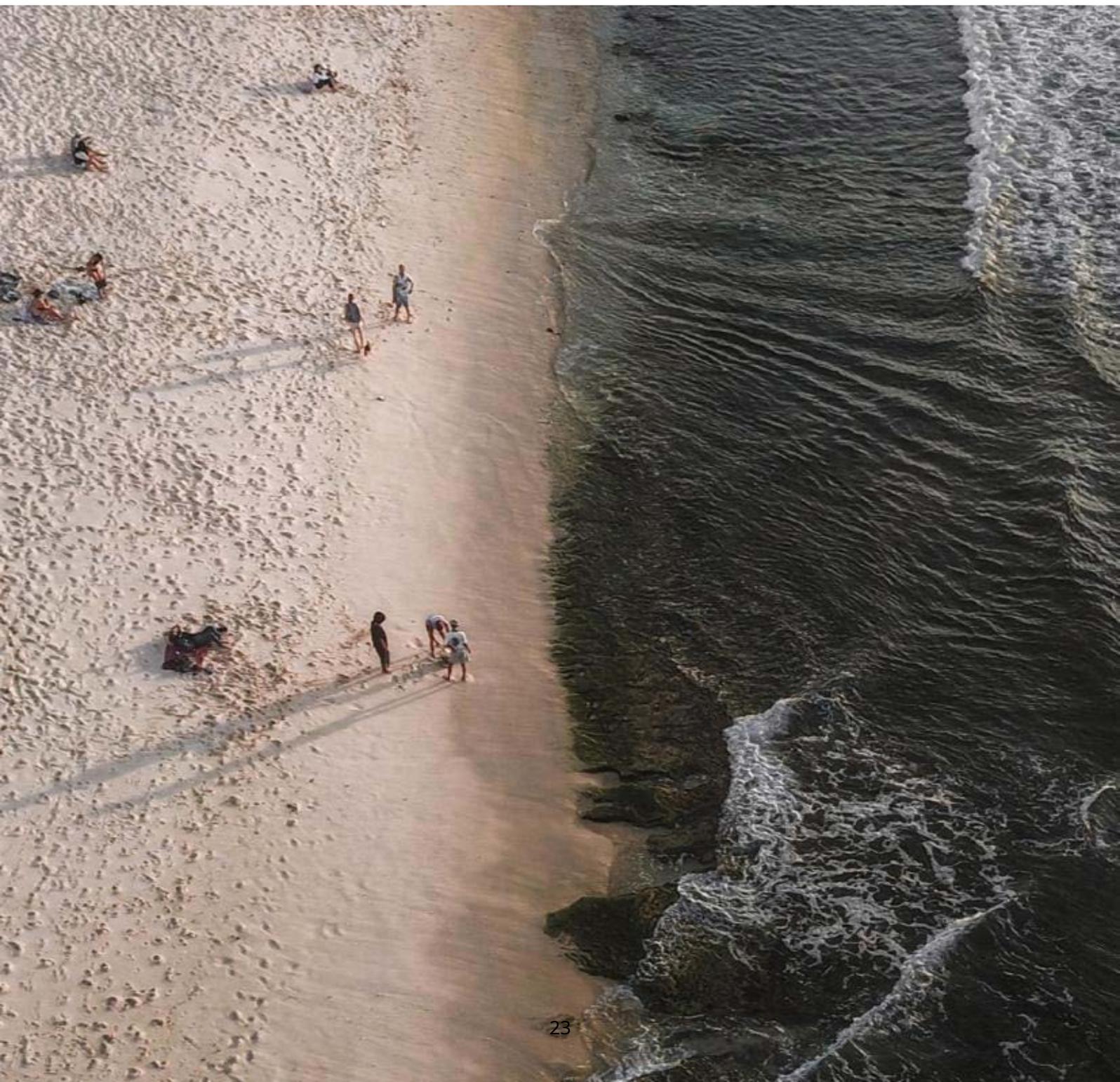


Figure 23 : L'index *El Niño*

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



Par latitude

La Figure 24, qui est basée sur les observations des flotteurs Argo (*Roemmich et Gilson 2009*), montre qu'en moyenne, la température des océans mondiaux jusqu'à 1900 m de profondeur augmente depuis environ 2010. Depuis 2013, cette augmentation est principalement due aux changements survenus près de l'équateur, entre 30°N et 30°S.

En revanche, pour les océans circum arctiques au nord de 55°N, les températures océaniques intégrées à la profondeur sont en baisse depuis 2011. Près de l'Antarctique, au sud de 55°S, les températures sont essentiellement stables. On observe un rythme annuel clair à la plupart des latitudes.

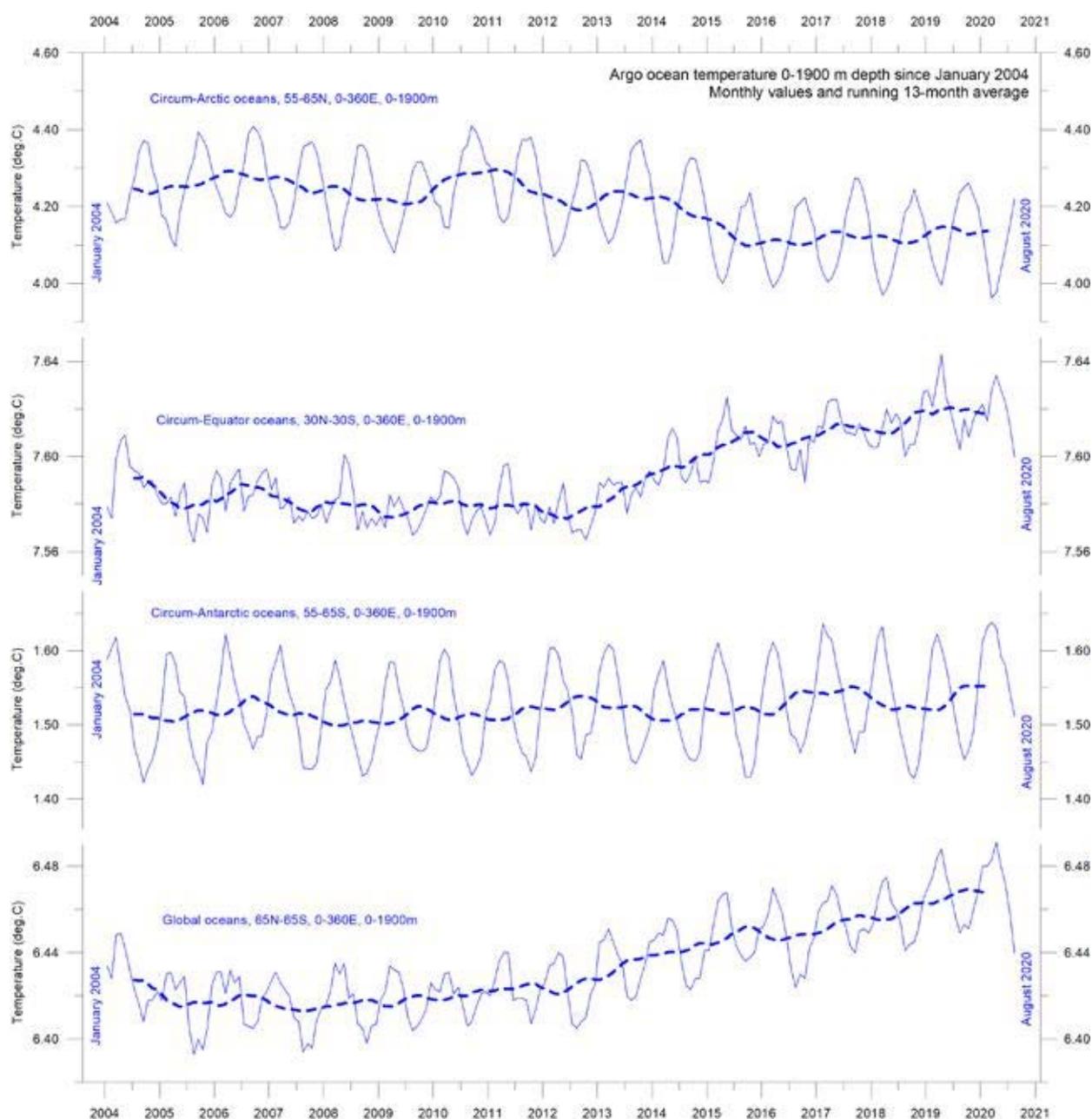


Figure 24 : Températures océaniques jusqu'à 1900 m

Températures moyennes de l'océan de janvier 2004 à août 2020 à une profondeur de 0-1900 m dans des bandes latitudinales sélectionnées, en utilisant les données Argo. La ligne fine montre les valeurs mensuelles, et la ligne pointillée épaisse montre la moyenne sur 13 mois.

Source : *Atlas mondial marin Argo*.

Par profondeur

La Figure 25 montre les températures océaniques moyennes mondiales à différentes profondeurs. Un rythme de changement annuel peut être observé jusqu'à environ 100 m de profondeur. Dans les 100 m les plus élevés, les températures ont augmenté depuis 2011 environ. À une profondeur de 200 à 400 m, les températures ont peu changé au cours de la période d'observation. Cependant, pour les profondeurs d'eau inférieures à 400 m, on constate à nouveau une augmentation des températures. Il est intéressant de noter que le diagramme suggère que cette augmentation a commencé à 1 900 m de profondeur

aux alentours de 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 1 900 m de profondeur. La chronologie de ces changements montre que les températures moyennes dans la partie supérieure des océans (1 900 m) ne sont pas seulement influencées par les conditions qui prévalent à la surface ou à proximité de l'océan, mais aussi par des processus qui se déroulent à des profondeurs supérieures à 1 900 m. Une partie du réchauffement actuel des océans semble donc être

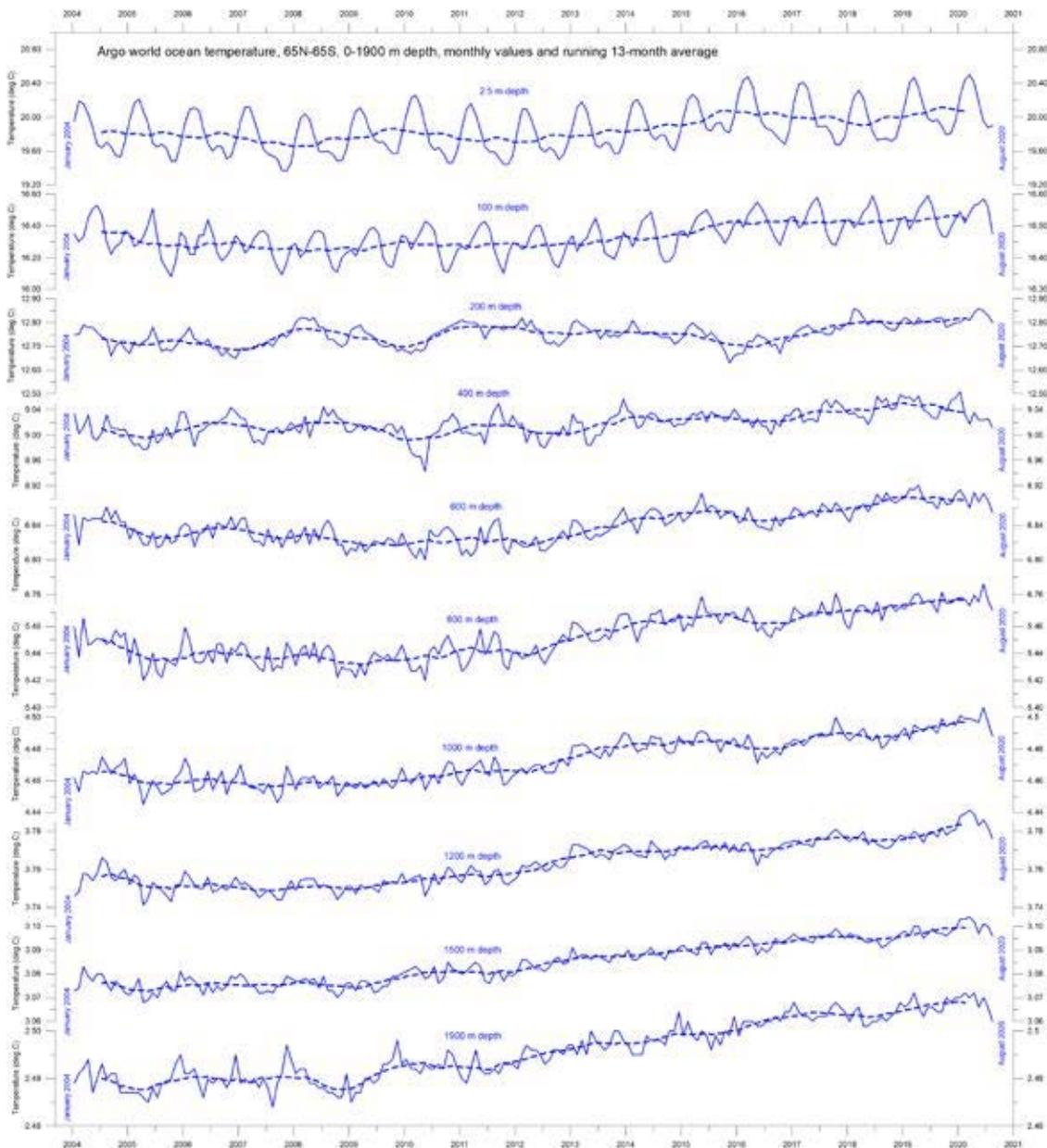


Figure 25 : Températures océaniques à différentes profondeurs

Températures océaniques 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 : *Atlas mondial marin Argo*.

due aux caractéristiques de la circulation qui se déroulent à de grandes profondeurs et n'est pas directement liée aux processus qui se déroulent à la surface ou à proximité de celle-ci.

Cela est également visible dans la Figure 26, qui montre le changement net des températures océaniques mondiales à différentes profondeurs, calculé comme la différence entre respectivement les moyennes sur 12 mois de janvier à décembre 2004 et de septembre 2019 à 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, les valeurs moyennes, telles que présentées dans ce diagramme, bien qu'importantes, cachent également de nombreuses particularités régionales (Figure 27).

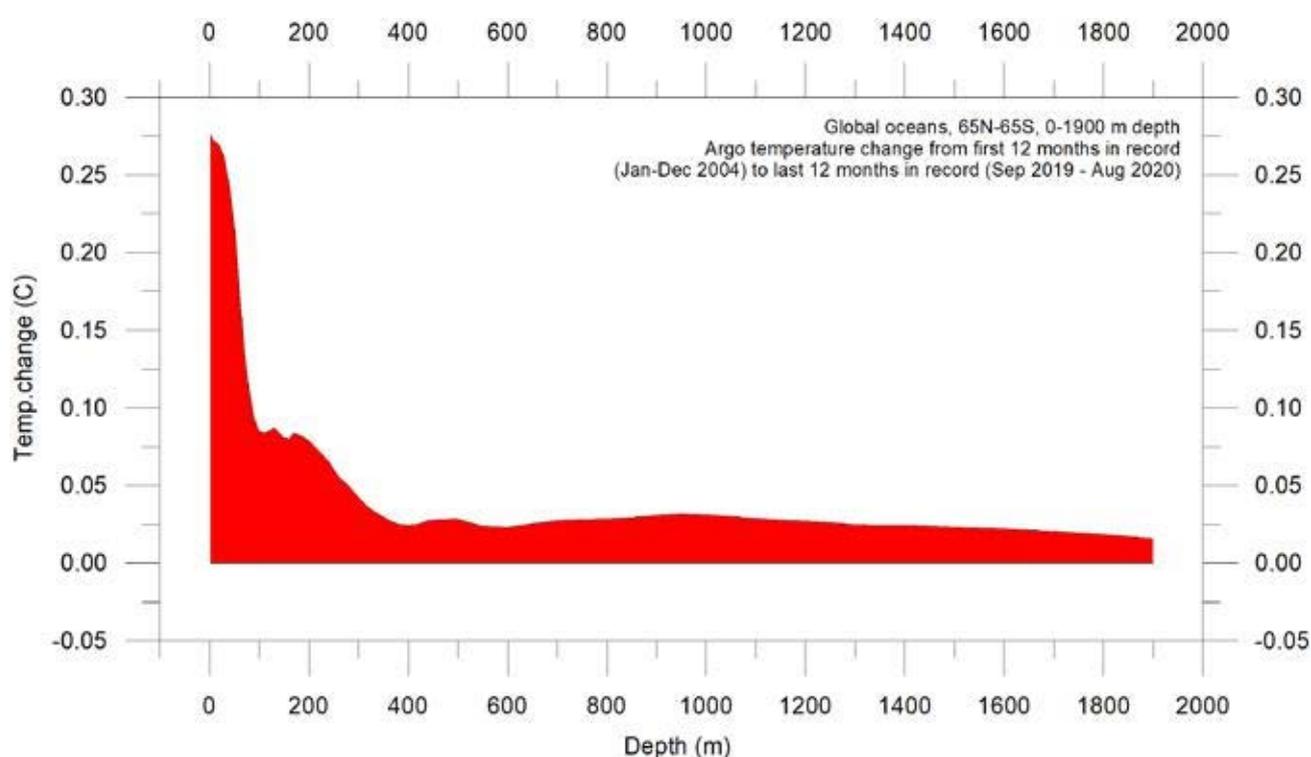


Figure 26 : Changements de température entre 0 et 1900 m

Changement de la température nette de l'océan mondial depuis 2004, de la surface à 1900 m de profondeur, d'après les données Argo.

Source : *Global Marine Argo Atlas*.

Par région et par profondeur

La Figure 27 montre la variation latitudinale des changements nets de température océanique entre janvier-décembre 2004 et septembre 2019-août 2020 pour différentes profondeurs, calculés comme dans la Figure 26. Les trois panneaux montrent le changement net dans les océans respectivement, Arctique (55-65°N), Équatorial (30N-30°S) et Antarctique (55-65°S).

Le réchauffement global net de la surface, illustré par la Figure 26, affecte les océans équatoriaux et antarctiques, mais pas les océans arctiques (Figure 27). En réalité, le refroidissement net est prononcé jusqu'à 1 400 m pour les océans du nord. Cependant, la majeure partie des terres émergées de la Terre 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 à leur tour plus petits que les océans équatoriaux. En fait, la moitié de la surface de la planète (terres et océans) est située entre 30°N et 30°S. Néanmoins, le contraste entre les changements nets de température enregistrés sur la période 2004-2020 pour les différentes bandes latitudinales est instructif. Pour les deux océans polaires, les données Argo semblent démontrer l'existence d'une bascule bipolaire, telle que décrite par *Chylek et al. (2010)*. Il est tout aussi intéressant de constater que la tendance de la température de l'océan proche de la surface dans les deux océans polaires contraste avec le développement global de la banquise dans les deux régions polaires (voir plus infra dans ce rapport).

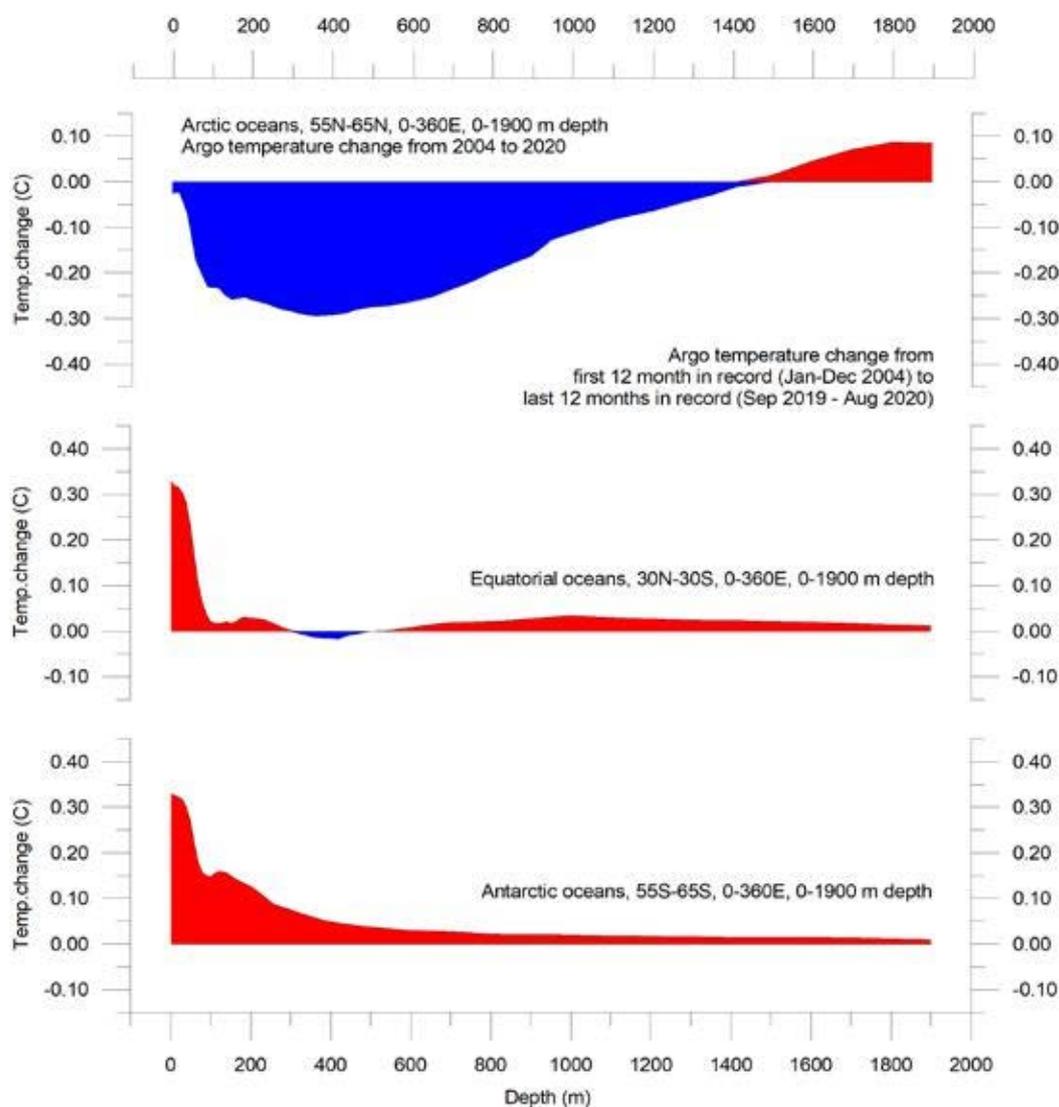


Figure 27 : Changements de température entre 0 et 1 900 m

Changement de la température nette de l'océan mondial depuis 2004, de la surface à 1 900 m de profondeur.

Source : *Global Marine Argo Atlas*.

Changement net de la température des océans entre 2004 et 2020 dans des secteurs sélectionnés

La Figure 29a montre les changements nets de température entre 2004 et 2019 le long d'un transect des océans situé à 20°W, correspondant à l'océan Atlantique. Pour préparer le diagramme, les températures moyennes annuelles de l'océan pour 2019 et 2004 ont été comparées, cette dernière représentant les 12 premiers mois d'enregistrement Argo. Toutefois, le portail de données Argo Global Argo Marine Atlas n'était au moment de la rédaction du présent rapport, mis à jour que jusqu'en août 2020. Ainsi, pour donner un aperçu des changements les plus récents, le changement net sur 12 mois entre septembre 2019 et août 2020 est illustré à la Figure 29b. Les couleurs chaudes indiquent un réchauffement net de 2004 à 2019 et de septembre 2019 à août 2020, et les couleurs bleues un refroidissement. En raison de la forme sphérique de la Terre, les latitudes nord et sud ne représentent que de petits volumes océaniques, par rapport aux latitudes proches de l'équateur. Cette réserve étant faite, les deux parties de la figure révèlent néanmoins plusieurs caractéristiques intéressantes.

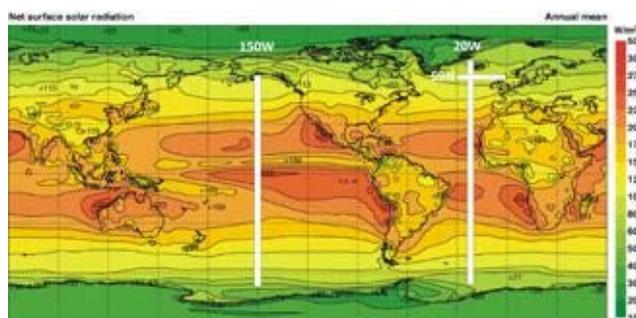


Figure 28 : Emplacement des trois profils

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

Le trait le plus marquant du profil de l'Atlantique pour la période 2004-2019 est un refroidissement marqué en surface au nord de l'équateur, notamment au nord de 45°N, où les couches plus profondes (jusqu'à 1 500 m) sont également concernées. Au niveau et au sud de l'équateur, le réchauffement net domine à la surface, bien qu'un refroidissement net domine à 50-300 m. Le réchauffement net maximal de l'océan Atlantique sur la période 2004-2019 a eu lieu entre 5°N et

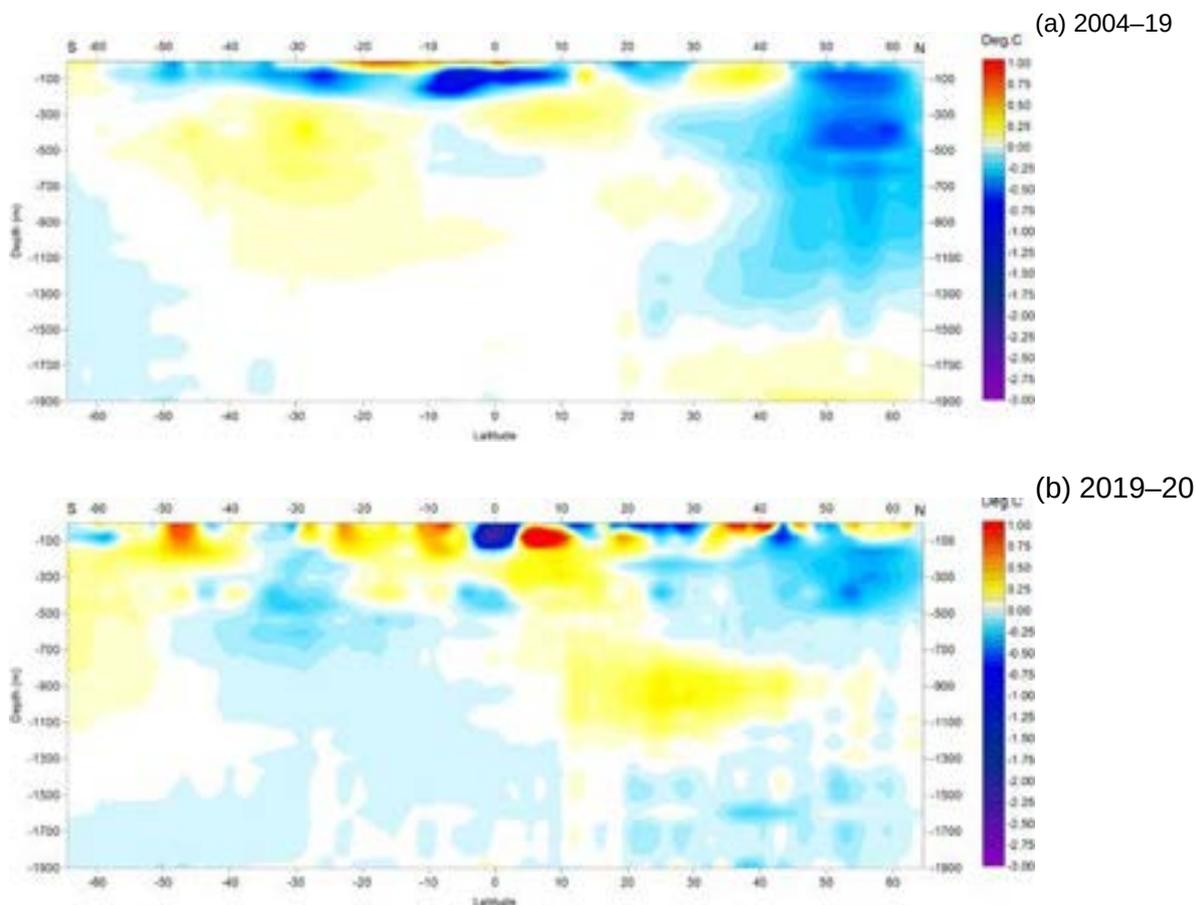


Figure 29 : Changement de température le long du profil Atlantique, 0-1900m

(a) 2004-2019 et (b) Sept. 19-Août 20. Voir la Figure 27 pour l'emplacement géographique du transect.

Source des données : *Global Marine Argo Atlas*.

25°S, affectant les eaux peu profondes (jusqu'à environ 50 m). Le réchauffement affecte également les latitudes entre 10°S et 45°S, entre 200 et 1 200 m de profondeur. L'évolution de la température au cours des 12 derniers mois enregistrés (Figure 29b) est plus complexe, surtout près de la surface. Cependant, le réchauffement de l'Atlantique Sud en profondeur semble s'affaiblir au cours des 12 derniers mois d'enregistrement, tandis que le refroidissement de l'Atlantique Nord semble se poursuivre, à l'exception des profondeurs comprises entre 800 et 1 100 m.

Les variations de température affichées dans un transect à 59°N à travers le courant de l'Atlantique Nord, juste au sud des îles Féroé, sont particulièrement intéressantes car elles sont importantes pour le temps et le climat d'une grande partie de l'Europe. La Figure 30 montre une série temporelle à 59°N, de 30°W à 0°W, de la surface à 800 m de profondeur, représentant essentiellement une section à travers les masses d'eau affectées par le courant de l'Atlantique Nord. Les températures océaniques supérieures à 9 °C sont représentées par des couleurs rouges.

Cette série temporelle, bien qu'encore relativement courte, présente une dynamique remarquable. L'importance des eaux chaudes (supé-

rieures à 9 °C) a apparemment atteint un pic au début de 2006 et a été suivie d'une réduction progressive jusqu'en 2016. Depuis lors, une reprise partielle de la température a eu lieu dans la section considérée. Le changement observé, d'un pic élevé à un pic bas, se déroulant sur environ 11 ans, pourrait suggérer l'existence d'un cycle d'une durée d'environ 22 ans, mais nous devons attendre que la série Argo soit plus longue avant de tirer des conclusions définitives.

La Figure 31 représente la même série de données (59°N, 30-0°W, 0-800 m de profondeur, 2004-2020), mais maintenant présentée comme un graphique de la température moyenne de l'océan intégrée à la profondeur.

La Figure 32 présente deux diagrammes équivalents pour l'océan Pacifique, montrant les changements nets de 2004 à 2019/20 le long du 150°W, traités de la même manière que les diagrammes de l'Atlantique ci-dessus. Les couleurs chaudes indiquent un réchauffement net, et les couleurs bleues un refroidissement net. Là encore, les latitudes nord et sud ne représentent que des volumes océaniques relativement faibles, par rapport aux latitudes proches de l'équateur.

Figure 30 : Changement de température le long du profil courant de l'Atlantique Nord, 0-800m

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

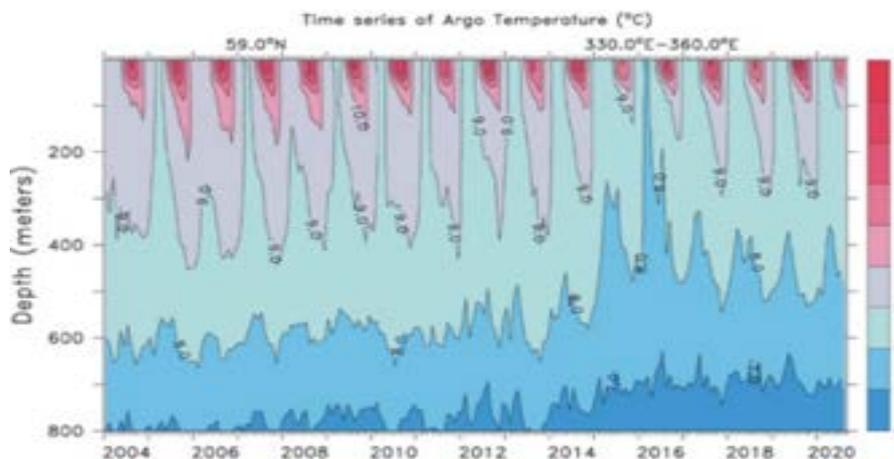
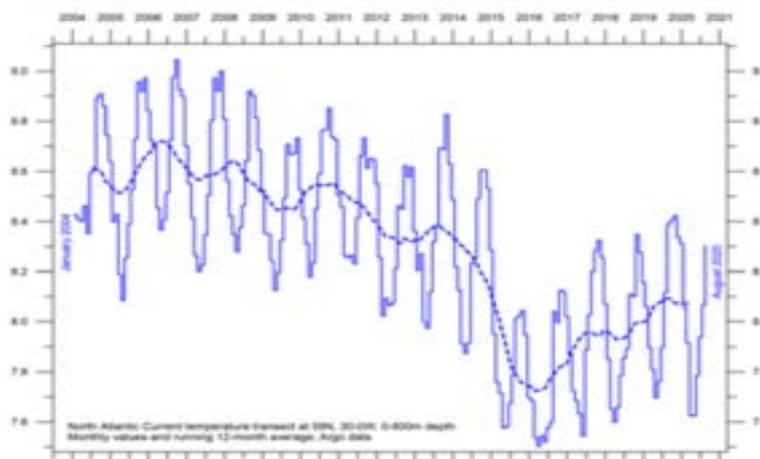


Figure 31 : Température intégrée à la profondeur pour le profil courant de l'Atlantique Nord.

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



Une caractéristique intéressante pour 2004-2019 (Figure 32a) est un léger refroidissement net au sud de 55°S, affectant presque toutes les profondeurs d'eau jusqu'à 1 900 m. Ceci contraste avec un réchauffement net global jusqu'à 1000 m de profondeur au nord du 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 situées entre 100 et 500 m entre 5°S et 30°N, et entre 20°S et 30°S. Au cours des 12 derniers mois de l'enregistrement Argo (Figure 32b), on constate que le refroidissement domine toutes les profondeurs entre 45°S et 30°N. Une partie au moins de cette récente évolution de la température peut probablement être liée à l'apparition de *La Niña* vers la fin de 2020 (Figure 23).

Aucun des diagrammes longitudinaux de l'Atlantique et du Pacifique ci-dessus ne montre dans quelle mesure les changements affichés sont causés par la dynamique océanique opérant à l'est et à l'ouest des deux profils considérés ; ils affichent uniquement les changements nets entre 2004 et 2019/20 le long des longitudes choisies. Pour cette raison, les diagrammes ne doivent pas être interprétés. Cependant, les deux profils longitudinaux présentent un contraste intéressant, l'océan Pacifique se réchauffant dans son ensemble, surtout au nord de l'équateur, et se refroidissant au sud, alors que le contraire est vrai pour le profil Atlantique : refroidissement au nord et réchauffement au sud.

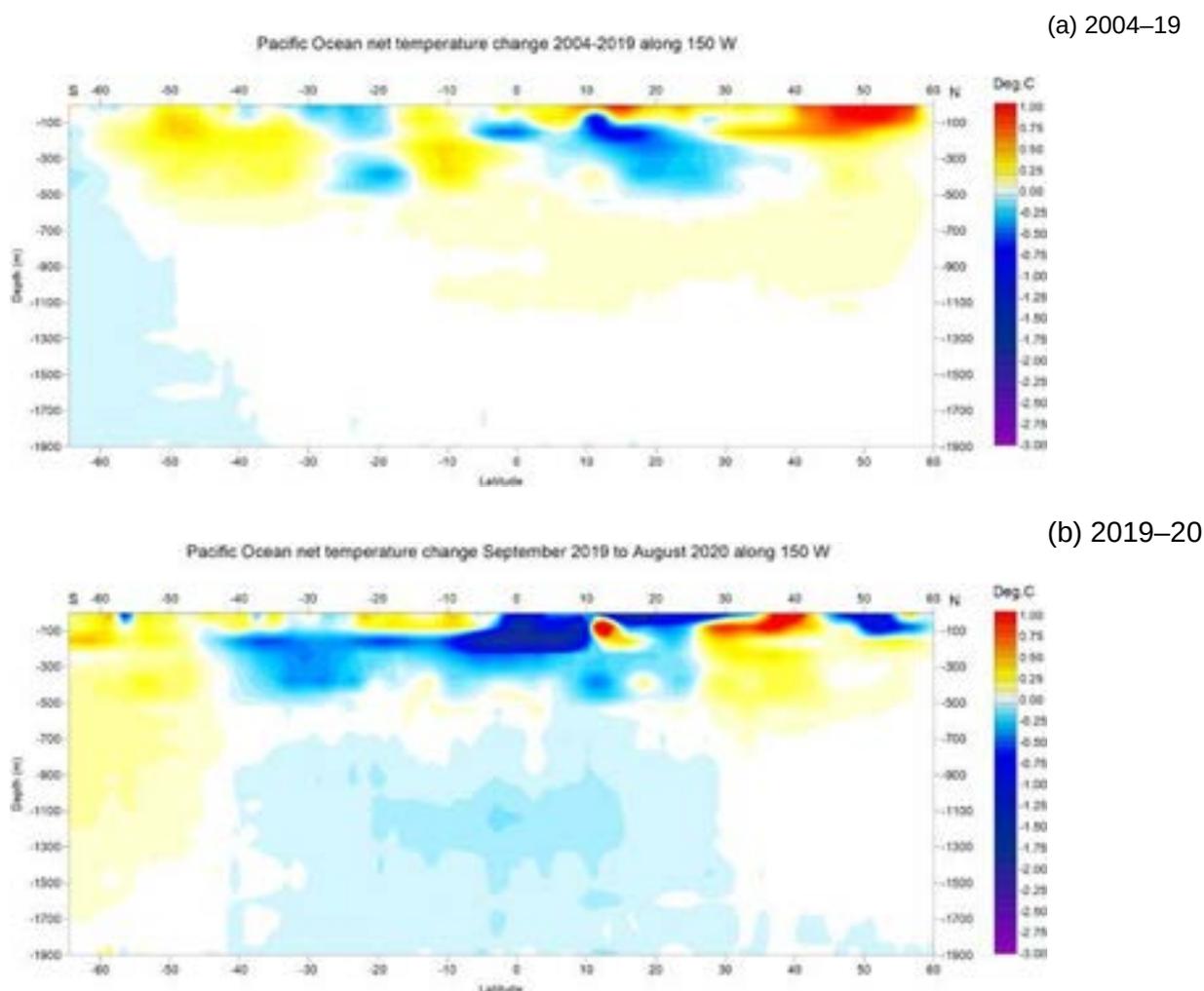


Figure 32 : Changement de température le long du profil Pacifique, 0-1900m
 (a) 2004-2019 et (b) 19 septembre - 20 août. Voir la Figure 28 pour la localisation géographique du transect.
 Source des données : *Global Marine Argo Atlas*.

4. Oscillations océaniques

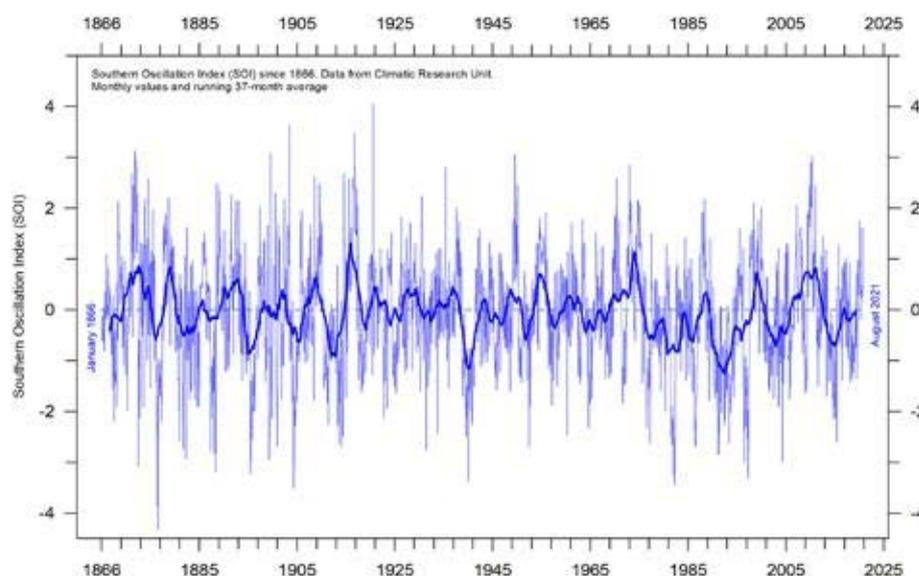
Indice d'oscillation australe

L'indice d'oscillation australe (SOI) est calculé à partir des fluctuations mensuelles ou saisonnières de la différence de pression atmosphérique entre Tahiti et Darwin. Des valeurs négatives soutenues de l'indice SOI (Figure 33) indiquent souvent des épisodes *El Niño*. Ces valeurs négatives sont généralement accompagnées d'un réchauffement persistant de l'océan Pacifique tropical central et oriental, 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 indiquent des épisodes *La Niña* généralement associées à des vents alizés du Pacifique plus forts et à des températures de surface de la mer plus élevées au nord de l'Australie. Les eaux du centre et de l'est de l'océan Pacifique tropical deviennent plus froides à ces moments-là, et l'est et le nord de l'Australie reçoivent généralement des précipitations accrues.

Figure 33 : 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, Université d'East Anglia.



Oscillation décennale du Pacifique

L'oscillation décennale du Pacifique (PDO) (Figure 34) est un modèle de variabilité climatique du Pacifique de longue durée, semblable à *El Niño*, dont les données ont commencé à être relevées en janvier 1900. Ses causes ne sont pas connues à l'heure actuelle, mais même en l'absence d'une compréhension théorique, l'information climatique de la PDO améliore les prévisions climatiques saisonnières et annuelles pour l'Amérique du Nord en raison de sa forte tendance à persister sur plusieurs saisons et plusieurs années. La PDO semble également être plus ou moins en phase avec les changements de température à l'échelle mondiale.

Ainsi, du point de vue de l'impact sociétal, la reconnaissance du PDO est importante car elle montre que les conditions climatiques « nor-

males » peuvent varier sur des périodes comparables à la durée de vie humaine.

La PDO illustre la façon dont les températures mondiales sont liées aux températures de surface de la mer dans le Pacifique, le plus grand océan de la planète. Lorsque les températures à la surface de la mer sont relativement basses (phase négative de la PDO), comme entre 1945 et 1977, la température de l'air à l'échelle mondiale diminue. Lorsque les températures à la surface de la mer sont élevées (phase positive de la PDO), comme entre 1977 et 1998, la température de l'air à la surface du globe augmente (Figure 7).

Une analyse de fréquence de Fourier (non présentée ici) montre que l'évolution de la PDO est influencée par un cycle de 5,7 ans, et possiblement aussi par un cycle plus long d'une durée d'environ 53 ans.

Oscillation multidécennale de l'Atlantique

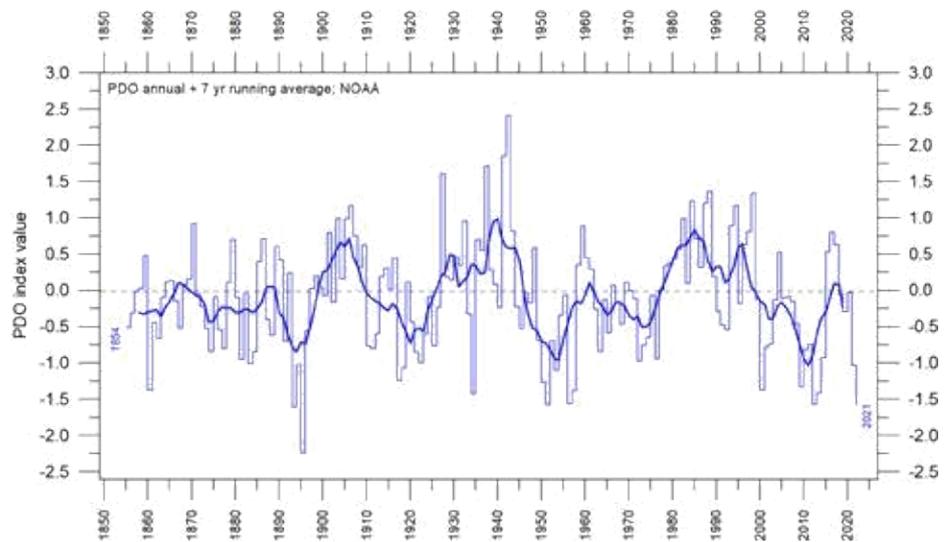
L'oscillation multidécennale de l'Atlantique (AMO Figure 35) est un mode de variabilité de la

température de surface de l'Atlantique Nord. L'AMO est mesurée par un indice des tempéra-

Figure 34 : Valeurs annuelles de l'Oscillation Décennale du Pacifique (PDO) selon le Laboratoire des Sciences Physiques, NOAA.

La ligne fine indique les valeurs annuelles de la PDO, 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/>



tures de surface de la mer (SST) dans l'Atlantique Nord.

L'indice AMO semble être corrélé aux températures de l'air et aux précipitations dans une grande partie de l'hémisphère Nord. La corrélation semble forte pour le nord-est du Brésil, les précipitations du Sahel africain et le climat 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 a une incidence sur la fréquence des ouragans violents dans l'Atlantique.

Par exemple, l'indice AMO peut être mis en relation avec la survenance passée des grandes sécheresses dans le Midwest et le Sud-Ouest des

États-Unis. Lorsque l'AMO est élevée, les sécheresses ont tendance à être plus fréquentes ou plus longues, et inversement pour ses valeurs faibles. Deux des plus graves sécheresses du 20e siècle aux États-Unis (le Dust Bowl des années 1930 et les sécheresses des années 1950) se sont produites entre 1925 et 1965 alors que l'indice AMO atteignait des valeurs maximales. C'est le contraire pour la Floride et le Nord-Ouest du Pacifique où un indice AMO élevé est associée à des précipitations relativement fortes.

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

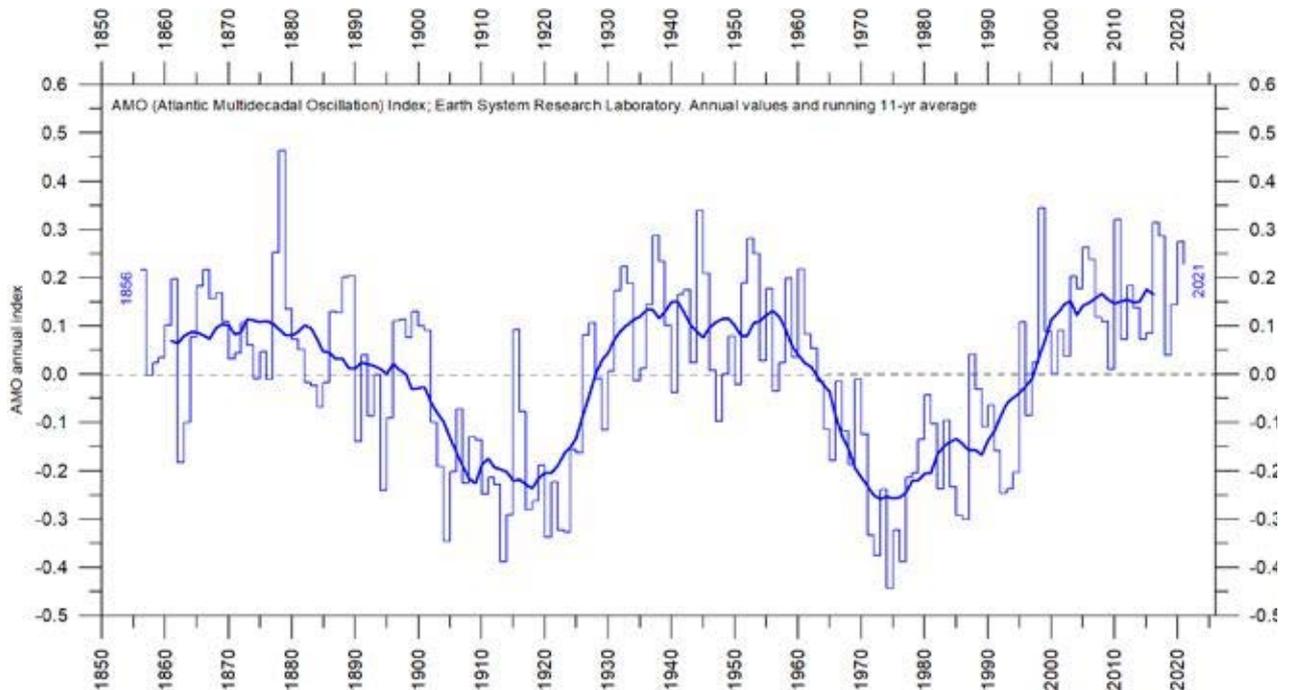


Figure 35 : L'oscillation multidécennale de l'Atlantique

Valeurs annuelles de l'indice de l'oscillation multidécennale de l'Atlantique (AMO) lissées et non lissées depuis 1856. La ligne bleue fine indique les valeurs annuelles, et la ligne épaisse est la moyenne mobile simple sur 11 ans.

Source des données : Earth System Research Laboratory, NOAA, USA.

5. Niveau de la mer

En général

Le niveau mondial, régional et local des mers change toujours. Au cours du dernier maximum glaciaire, il y a environ 20-25 000 ans, le niveau mondial de la mer était environ 120 m plus bas qu'aujourd'hui. Depuis la fin de ce que l'on appelle le petit âge glaciaire (PAG), il y a environ 100 à 150 ans, le niveau mondial de la mer a augmenté en moyenne de 1 à 2 mm/an, selon les marégraphes situés sur les côtes. Les données observées par les marégraphes du monde entier sont accessibles depuis l'explorateur de données PSM-SL (voir le lien à la fin de ce rapport).

La variation globale (ou eustatique) du niveau de la mer est mesurée par rapport à un niveau de référence théorique, le géoïde, qui est modélisation 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 - mais pas seulement - quatre mécanismes principaux :

1. Les changements de la pression atmosphérique locale et régionale et du vent, et les changements de marée induits par la Lune.
2. Les changements de volume des bassins océaniques dus aux forces tectoniques (géologiques).
3. Les changements de densité de l'eau océanique causés par les variations des courants, de la température de l'eau et de la salinité.
4. Les changements de volume d'eau causés par les modifications du bilan de masse des glaciers terrestres.

En outre, des mécanismes tels que le stockage des eaux souterraines, le stockage dans les lacs et les rivières, et l'évaporation affectent également le niveau de la mer.

Les changements de volume des bassins océaniques se produisent trop lentement 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, car l'eau de mer a un coefficient de dilatation relativement faible et aussi parce que, sur les échelles de temps qui nous inté-

ressent, tout réchauffement est largement confiné aux quelques centaines de mètres supérieurs de la surface de l'océan.

La croissance et la désintégration des glaciers flottants n'ont aucune influence sur le niveau de la mer. En revanche, la fonte des glaces terrestres - y compris celle des glaciers de montagne et les calottes glaciaires du Groenland et de l'Antarctique - est un facteur explicatif plus important. Par exemple, au cours du cycle climatique glaciaire-interglaciaire du dernier demi-million d'années, le niveau des mers était environ 120 m plus bas qu'aujourd'hui. De plus, au cours de l'interglaciaire le plus récent, il y a environ 120 000 ans, la température mondiale était plus élevée qu'aujourd'hui, et des parties importantes de la calotte glaciaire du Groenland ont fondu. En conséquence, le niveau mondial des mers était supérieur de plusieurs mètres à celui d'aujourd'hui.

Cependant, à l'échelle régionale et locale, les facteurs liés aux changements de la pression atmosphérique, du vent et du géoïde doivent également être pris en compte. Par exemple, les changements de volume de l'inlandsis groenlandais affectent le géoïde dans les régions adjacentes au Groenland. Si la masse globale du Groenland diminuait, la surface du géoïde serait déplacée en direction du centre de la planète, et le niveau de la mer dans les régions voisines du Groenland baisserait. Cela se produirait même si le volume global d'eau dans les océans mondiaux augmentait en raison de la perte nette de glace des glaciers.

En Europe du Nord, un autre facteur doit être pris en compte pour estimer le niveau futur de la mer. La Norvège, la Suède, la Finlande et le Danemark étaient tous totalement ou partiellement recouverts par l'inlandsis européen il y a 20-25 000 années. Aujourd'hui encore, l'effet de cette charge glaciaire est clairement démontré par le fait que la majeure partie de cette région connaît une élévation isostatique continue du sol de plusieurs millimètres par an. Sur de nombreux sites, cela fait plus que compenser la lente montée du niveau de la mer à l'échelle mondiale, de sorte qu'une baisse nette du niveau de la mer par rapport à la terre est enregistrée.

C'est le mouvement relatif du niveau de la mer par rapport à la terre important pour la planification côtière, qui est enregistré par les marégraphes.

L'altimétrie satellitaire

L'altimétrie satellitaire est un type de mesure relativement nouveau, qui fournit des informations uniques et précieuses sur la topographie détaillée de la surface des océans, et sur la façon dont elle évolue, avec une couverture quasi globale. Cependant, elle n'est probablement pas un outil précis pour estimer les changements absolus du niveau global des mers, en raison des hypothèses qui sont faites lors de l'interprétation des données satellitaires originales.

L'une des hypothèses formulées lors de la conversion des données altimétriques satellitaires en estimations des changements du niveau de la mer (Figure 36) est l'ajustement isostatique glaciaire (GIA). Il s'agit d'un transfert de masse à grande échelle et à long terme des océans vers la terre, sous la forme du cycle de croissance et de déclin des grandes calottes glaciaires en Amé-

rique du Nord et en Europe du Nord pendant le Quaternaire. Cet énorme transfert de masse provoque des changements cycliques de la charge de surface, ce qui entraîne un écoulement viscoélastique du manteau et des effets élastiques dans la croûte supérieure. Cependant, nous ne disposons pas de connaissances suffisantes pour donner des estimations rigoureuses de l'impact de ces phénomènes sur les estimations du niveau de la mer : cela dépend de la façon dont sont modélisés la croûte terrestre, le manteau et la déglaciation après la dernière période glaciaire. Pour cette raison (et d'autres facteurs), les interprétations de la variation du niveau de la mer à l'échelle mondiale, basées sur l'altimétrie satellitaire, varient sensiblement. Dans la Figure 36, l'estimation de l'élévation globale du niveau de la mer est d'environ 3,3 mm/an, en retirant l'effet estimé du GIA.

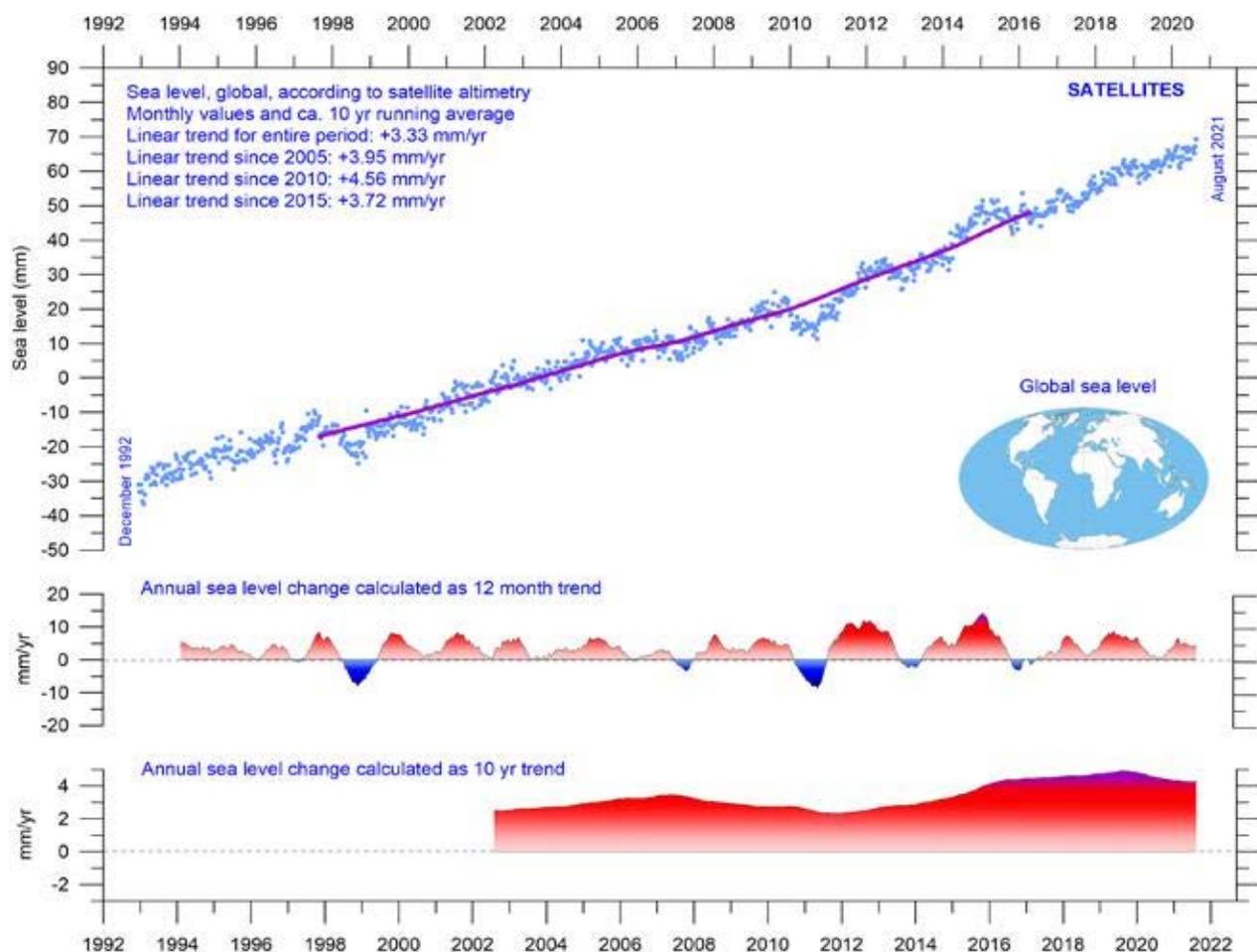


Figure 36 : Variation du niveau global de la mer depuis décembre 1992

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 Astrodynamics Research de l'Université du Colorado à Boulder. Les points bleus représentent les observations individuelles (sans l'effet GIA calculé), et la ligne violette représente la moyenne sur 121 mois (environ 10 ans).

Les marégraphes

Les marégraphes sont situés directement sur les sites côtiers et enregistrent le mouvement net de la surface de l'océan local par rapport à la terre (Figure 37). Les mesures de la variation relative locale du niveau de la mer (voir, par exemple, la Figure 38) sont des informations essentielles pour la planification côtière, et ce sont les marégraphes plutôt que les données satellitaires qui sont pertinents à cet égard.

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

- le changement vertical de la surface de l'océan
- le changement vertical de la surface terrestre.

Par exemple, un marégraphe peut enregistrer une augmentation présumée 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). Pour une analyse globale, la valeur de 1 mm/an est pertinente, mais dans un contexte de planification côtière locale,

c'est le chiffre de 3 mm/an du marégraphe qui doit être pris en compte par les autorités locales.

Pour construire des séries temporelles de mesures du niveau de la mer au niveau de chaque marégraphe, les moyennes mensuelles et annuelles doivent être ramenées à un référentiel commun. Cette réduction est effectuée par le Service permanent du niveau moyen de la mer (PSMSL), en utilisant l'historique des données des marégraphes fourni par les autorités nationales. La référence locale révisée (RLR) de chaque station est définie comme étant approximativement 7 000 mm sous le niveau moyen de la mer. Ce choix arbitraire a été fait il y a de nombreuses années pour éviter les chiffres négatifs dans les données RLR résultantes.

Peu d'endroits sur Terre sont complètement stables, et la plupart des marégraphes sont situés sur des sites exposés au soulèvement ou à l'affaissement tectonique (changement vertical de la surface terrestre). Cette instabilité verticale généralisée qui a plusieurs causes, affecte l'interprétation des données de chaque marégraphe. De nom-

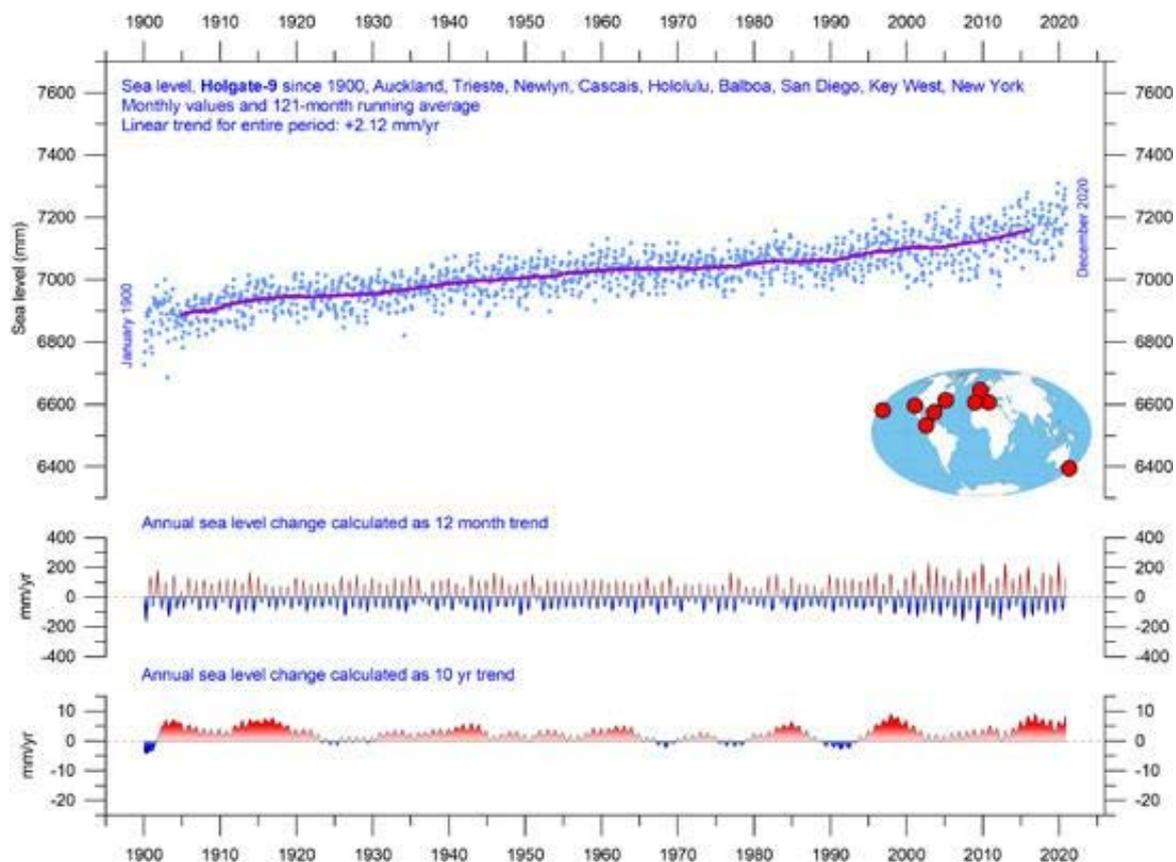


Figure 37 : Données mensuelles du marégraphe Holgate-9 provenant de PSMSL Data Explorer

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 respectivement, pour des fenêtres temporelles de 1 et 10 ans. Ces valeurs sont tracées à la fin de l'intervalle considéré.

Source : Colorado Center for Astrodynamics Research de 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).

breux efforts sont donc déployés pour corriger les mouvements tectoniques locaux.

Les données provenant de marégraphes situés sur des sites tectoniquement stables sont donc particulièrement intéressantes. La Figure 38 (Korsør, Danemark, depuis janvier 1897) est un exemple de mesures de longue durée obtenues sur un tel site. Ces mesures indiquent une élévation stable du niveau de la mer d'environ 0,83 mm/an, sans aucune indication d'accélération récente.

Les données des marégraphes du monde entier suggèrent une élévation moyenne du niveau

de la mer de 1 à 2 mm/an, alors que les données satellitaires (Figure 36) indiquent une élévation d'environ 3,3 mm/an, voire plus. La différence notable (un rapport d'environ 1:2) entre les deux ensembles de données est remarquable, mais n'a pas d'explication généralement acceptée. Il est cependant connu que les observations par satellite rencontrent des difficultés dans les zones côtières. *Vignudelli et al. (2019)* fournissent un aperçu actualisé des limites actuelles de l'altimétrie satellitaire classique dans les régions côtières

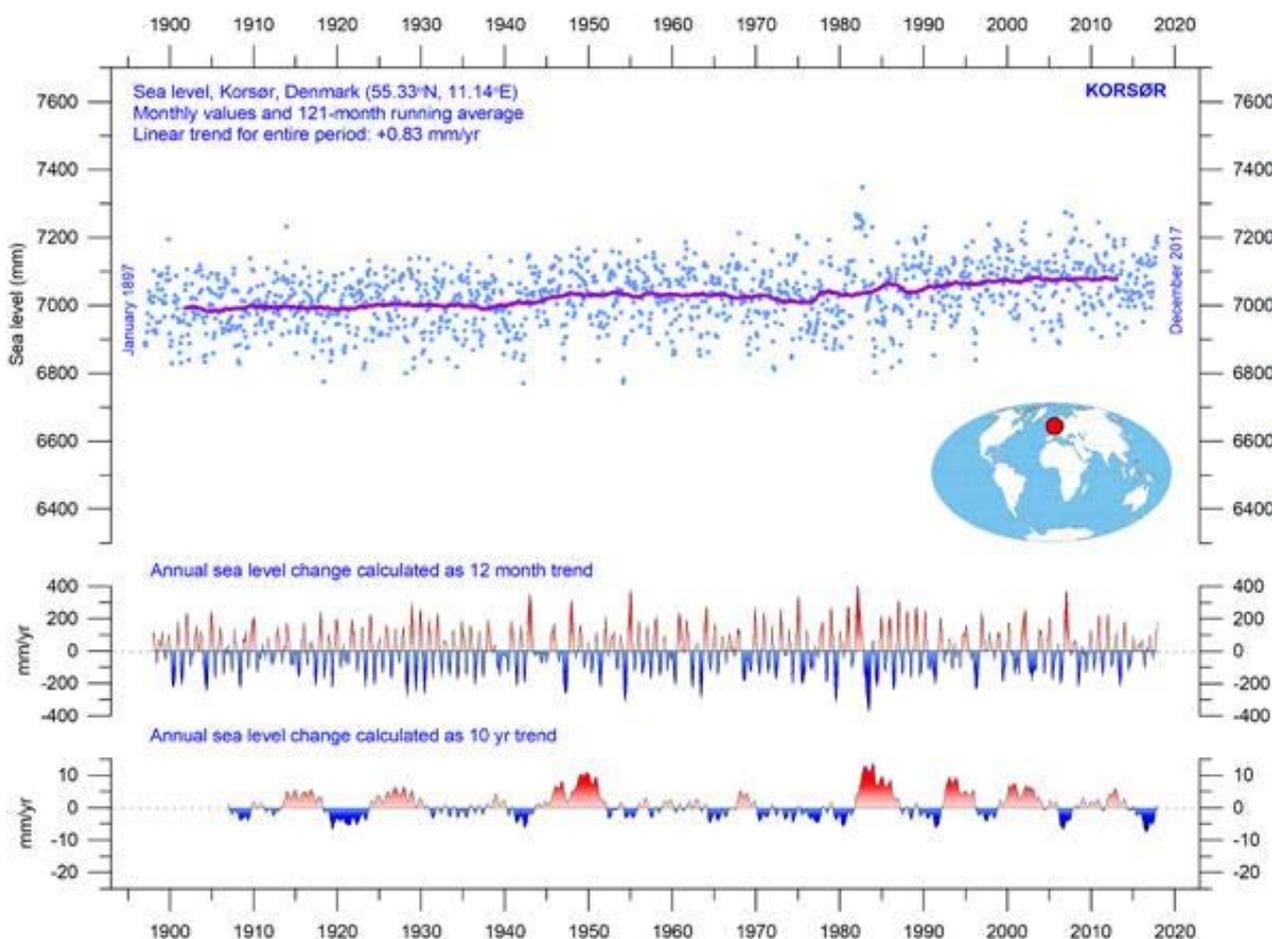


Figure 38 : Données mensuelles du marégraphe de Korsør (Danemark)

Données PSMSL. Les points bleus sont 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.

Des modèles pour l'avenir

La question de l'élévation du niveau de la mer, et en particulier l'identification d'une hypothétique contribution humaine à cette élévation, est un sujet complexe. Compte tenu de la controverse scientifique et politique autour de cette question, l'intérêt du public est tout à fait compréhensible.

Le 6e rapport d'évaluation du groupe de travail n° 1 du GIEC a été rendu public le 9 août 2021. Les données concernant les projections mondiales et régionales du niveau de la mer pour la période 2020-2150 sont disponibles dans l'outil de projection du niveau de la mer de ce rapport (voir le lien à la fin du présent rapport). Il s'agit du résultat de modèles prenant en compte des facteurs tels que le changement de masse des glaciers, les mouvements verticaux des terres, la température et le stockage de l'eau. Les projections, pour différents scénarios d'émissions de dioxyde de carbone, sont calculées par rapport à une ligne de base définie par les observations de 1995 à 2014.

Il est instructif de comparer les résultats de la modélisation avec les données d'observation du niveau de la mer, comme l'illustre la Figure 39 pour Oslo et Copenhague. La Norvège et le Danemark étaient tous deux totalement ou partiellement recouverts par l'inlandsis européen il y a 20-25 000 ans. Aujourd'hui encore, l'effet de cette charge glaciaire est clairement visible dans le fait que le sud de la Norvège subit une élévation isostatique continue du sol de plusieurs millimètres par an, alors que le Danemark n'est pas affecté au même degré. Sur de nombreux sites, ce mouvement isostatique fait plus que compenser la lente montée du niveau de la mer à l'échelle mondiale, de sorte qu'une baisse nette du niveau de la mer par rapport à la terre est enregistrée.

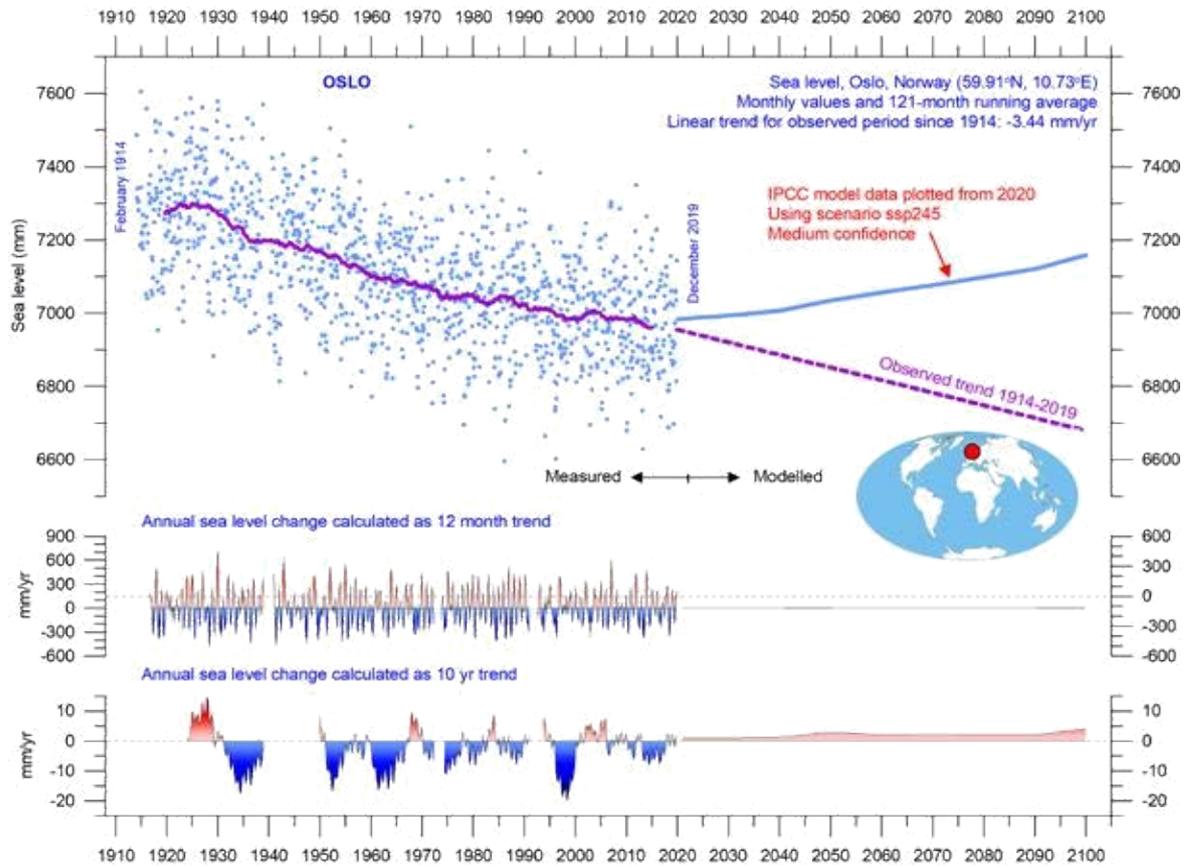
Oslo était recouverte d'une épaisse couche de glace lors de la dernière glaciation et est donc af-

fectée aujourd'hui par une élévation isostatique des terres assez marquée. Si le taux de variation du niveau de la mer observé à Oslo se poursuit (sur la base de plus de 100 ans d'observations), le niveau relatif de la mer à Oslo (par rapport à la terre) aura baissé d'environ 28 cm en 2100, par rapport à aujourd'hui (Figure 39). En revanche, selon le GIEC, le niveau relatif de la mer modélisé (par rapport à la terre) à Oslo aura augmenté d'environ 17 cm d'ici 2100, par rapport à aujourd'hui. L'augmentation du niveau de la mer est censée commencer assez soudainement vers 2020 à Oslo, contrairement à la baisse précédente du niveau de la mer d'environ -3,44 mm/an enregistrée depuis 1914.

Le Danemark était proche de la marge de l'inlandsis européen lors du dernier maximum glaciaire, et le taux d'élévation relatif du niveau de la mer observé est donc positif, bien que faible. Si le taux de changement observé se poursuit, le niveau relatif de la mer à Copenhague (par rapport à la terre) aura augmenté d'environ 4,6 cm d'ici 2100, par rapport à aujourd'hui. Selon le GIEC, le niveau relatif de la mer (par rapport à la terre) modélisé à Copenhague aura augmenté d'environ 45 cm d'ici 2100, par rapport à aujourd'hui. Un changement marqué dans l'augmentation du niveau relatif de la mer est censé commencer vers 2020, contrairement à la lente augmentation du niveau de la mer enregistrée depuis 1889.

Quelques réflexions s'imposent ici. Le changement brusque du niveau relatif de la mer prédit pour les deux sites (et beaucoup d'autres) en 2020 semble peu plausible et suggère que les données modélisées ne reflètent pas les caractéristiques du monde réel.

(a)



(b)

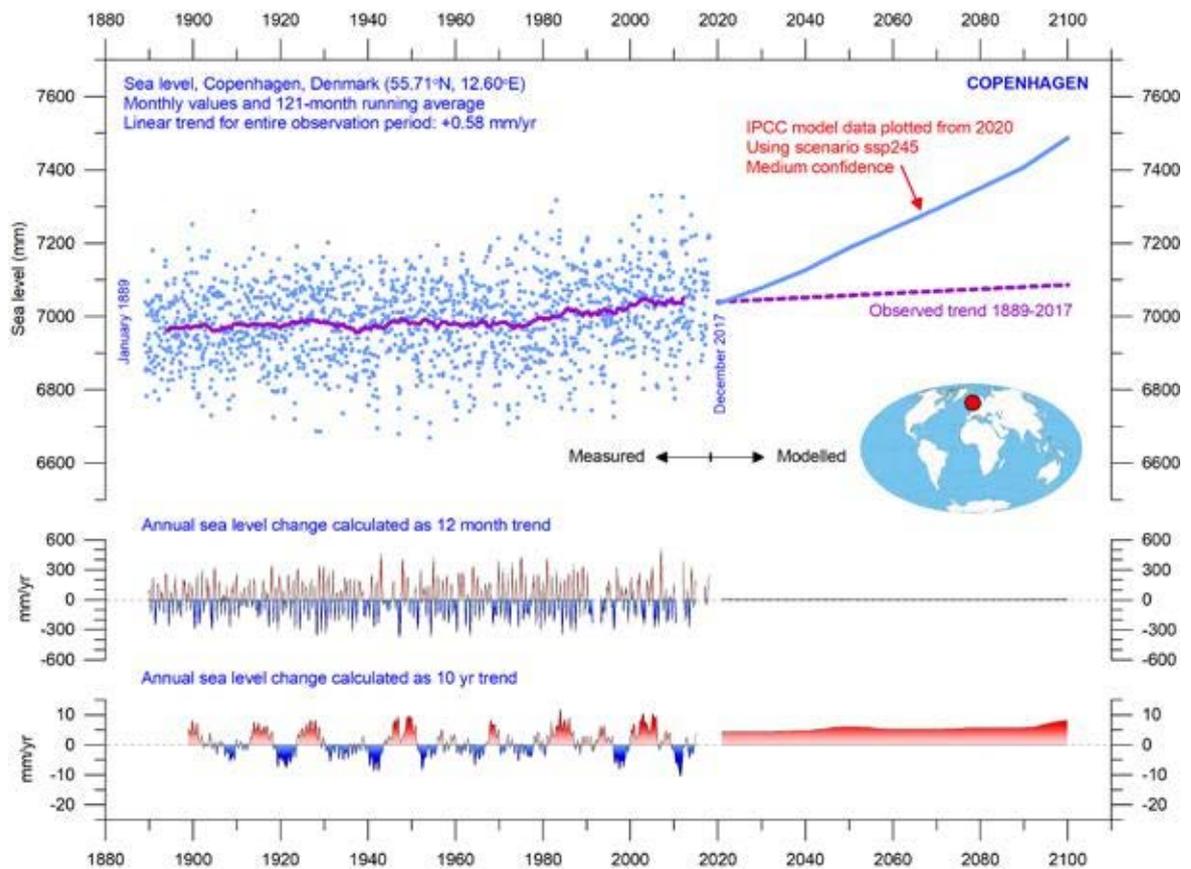


Figure 39 : Niveau de la mer observé et modélisé.

(a) Oslo et (b) Copenhague. Les points bleus représentent les observations mensuelles individuelles des marégraphes (PSMSL Data Explorer) 1914-2019, et la ligne violette représente la moyenne sur 121 mois (environ 10 ans). Les données modélisées pour le futur sont représentées par une ligne bleue continue 2020-2100, en utilisant le scénario modéré SSP2-4.5 du GIEC (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

Étendue des banquise arctique et antarctique

La Figure 40 révèle des évolutions contrastées de l'étendue moyenne de la banquise entre les deux pôles. La tendance à la réduction de l'étendue de la banquise dans l'hémisphère nord est clairement illustrée par le graphique bleu, tout comme l'augmentation simultanée de l'étendue de la banquise dans l'hémisphère sud jusqu'en 2016.

L'étendue de la banquise de l'Antarctique a diminué très rapidement au cours du printemps 2016, beaucoup plus rapidement qu'au cours de n'importe quel printemps précédent l'ère des satellites (depuis 1979). Un fort recul 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 sur-

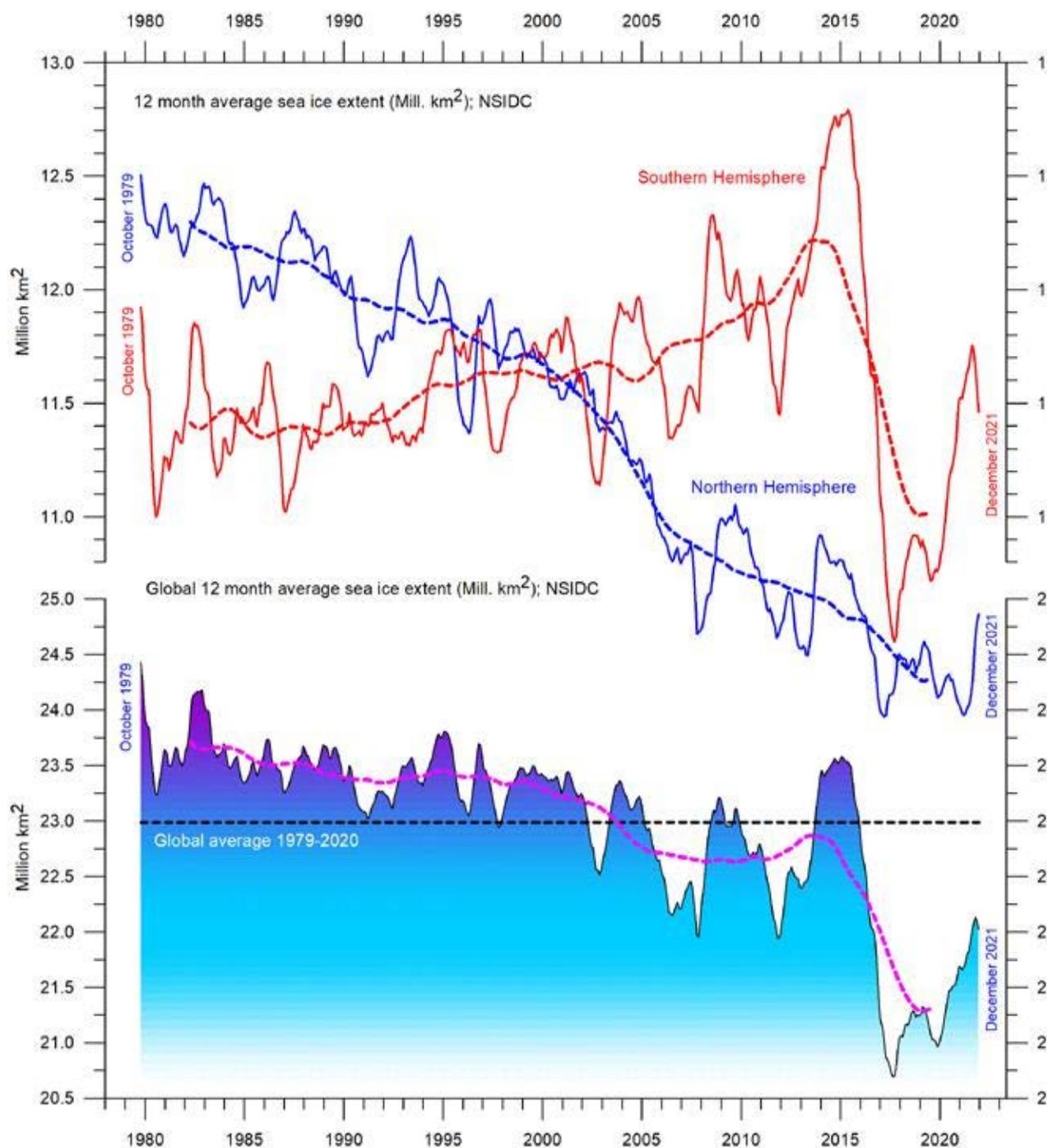


Figure 40 : Étendue de la banquise mondiale et par hémisphère depuis 1979

Moyennes courantes 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)*.

face de direction nord (chauds) ont repoussé la banquise vers le continent antarctique. Le contexte dans lequel se sont produites ces conditions de vent particulières en 2016 a été examiné par plusieurs 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 banquise est encore court et ne représente pas entièrement les variations naturelles jouant sur plus d'une ou deux décennies. Néanmoins, il est instructif. Les deux graphiques de la Figure 40 révèlent des variations récurrentes qui se superposent aux tendances générales. La banquise arctique est fortement influencée par une variation périodique de 5,3 ans, tandis que la banquise antarctique présente une variation périodique d'environ 4,5 ans. Ces deux variations ont atteint leur minimum simultanément en 2016, ce qui explique au moins en partie le minimum simultané de l'étendue mondiale de la banquise.

Dans les années à venir, ces variations pourraient induire une augmentation de l'étendue de la banquise aux deux pôles, avec comme résultat possible une augmentation de l'étendue moyenne de la banquise mondiale sur 12 mois. En fait, une telle évolution a déjà commencé pour l'Antarctique (Figure 40). Pour l'Arctique, l'étendue moyenne des glaces a récemment montré des

signes d'augmentation (Figure 40). Toutefois, dans les années à venir, les minima et les maxima de ces variations ne se produiront pas de manière synchrone, en raison de leur périodicité différente, et les minima (ou maxima) globaux pourraient donc dans les années à venir être moins prononcés qu'en 2016.

Les diagrammes de la Figure 41 illustrent l'étendue et l'épaisseur globales de la banquise arctique de fin 2020 à fin 2021, telles que publiées par l'Institut météorologique danois.

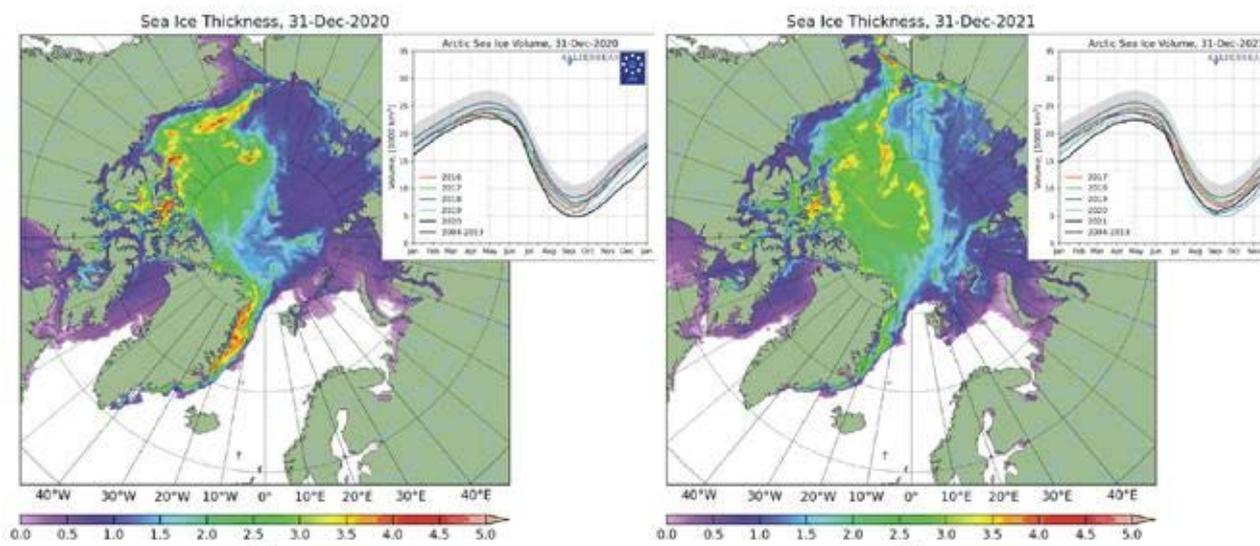


Figure 41 : Banquise arctique 2020 versus 2021

Étendue et épaisseur de la glace de mer arctique au 31 décembre 2020 (à gauche) et 2021 (à droite) et cycles saisonniers du volume total calculé de la banquise 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 d'insertion.

Couverture neigeuse dans l'hémisphère nord

Les variations de la couverture neigeuse mondiale sont principalement dues aux changements qui se produisent dans l'hémisphère nord (Figure 42), où se trouvent toutes les grandes zones

terrestres. La couverture neigeuse de l'hémisphère sud est essentiellement contrôlée par l'inlandsis de l'Antarctique et est donc relativement stable.

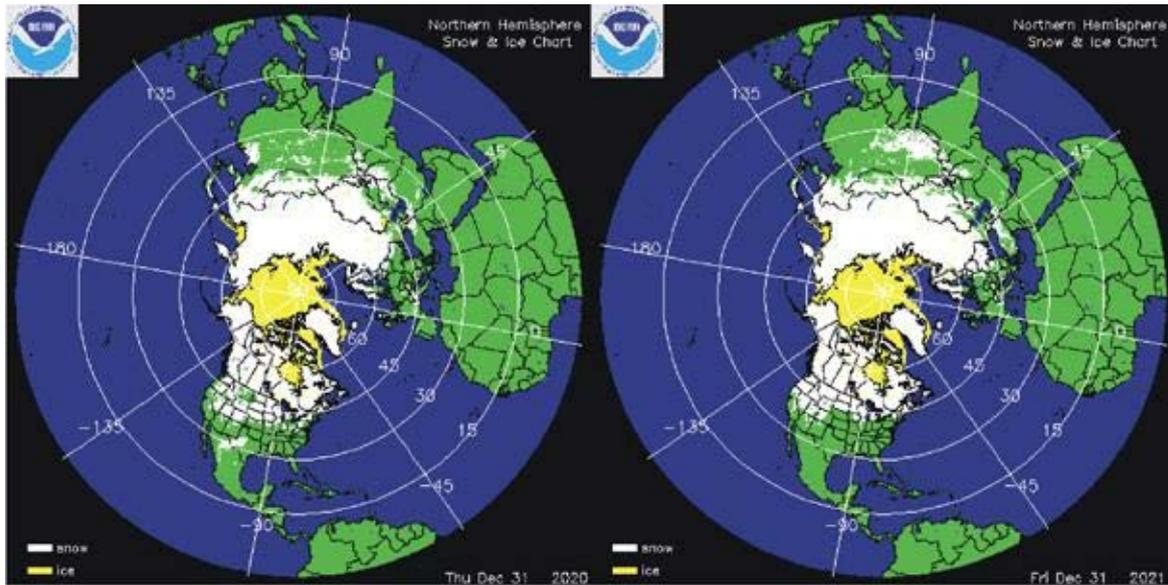


Figure 42 : Neige et banquise dans l'hémisphère nord

Couverture neigeuse (blanc) et banquise (jaune) au 31 décembre 2020 (gauche) et 2021 (droite).

Source de la carte : *National Ice Center (NIC)*.

La couverture neigeuse de l'hémisphère Nord présente d'importantes variations locales et régionales d'une année sur l'autre. Toutefois, la ten-

dance générale (depuis 1972) est à la stabilité de l'enneigement dans l'hémisphère nord, comme l'illustre la Figure 43.

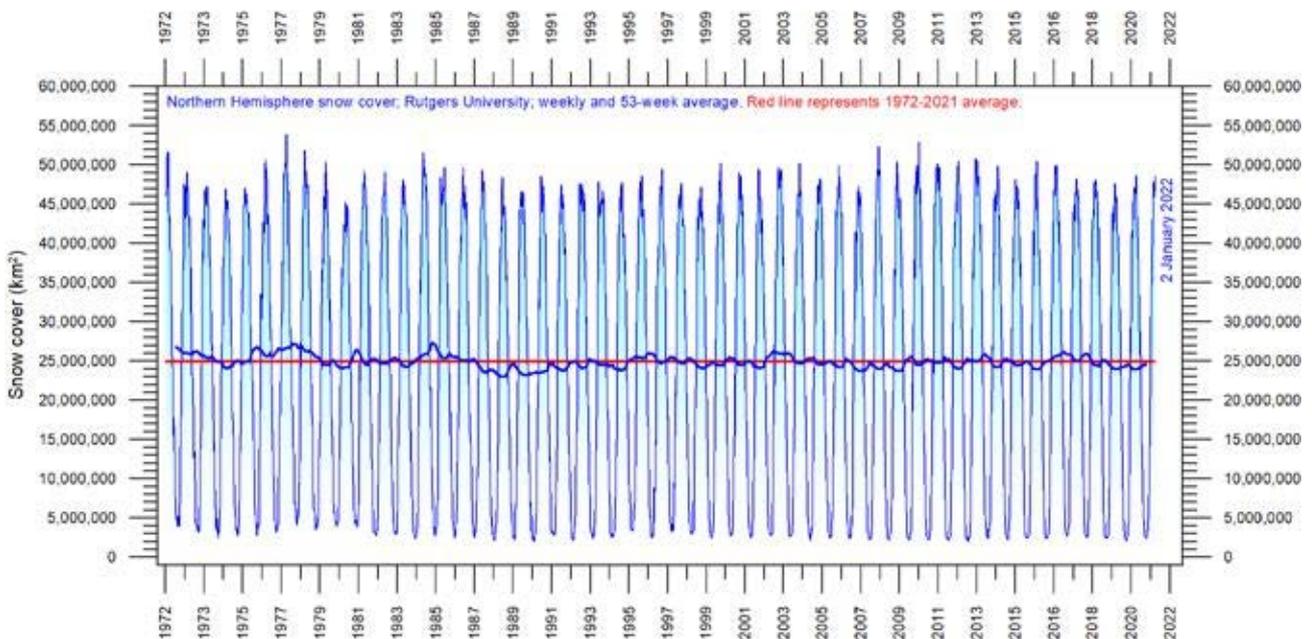


Figure 43 : Couverture neigeuse hebdomadaire de l'hémisphère Nord depuis 1972

Source : *Rutgers University Global Snow Laboratory*.

La ligne bleue fine représente les données hebdomadaires, et la ligne bleue épaisse la moyenne sur 53 semaines (environ 1 an). La ligne rouge horizontale est la moyenne de la période 1972-2020.

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), et pendant l'hiver de l'hémisphère nord, la zone couverte de neige augmente à environ 50 000 000 km², représentant pas moins de 33 % de la surface terrestre totale de la planète.

Si l'on considère les changements saisonniers (Figure 44), la couverture neigeuse de l'hémisphère Nord en automne augmente légèrement, l'étendue au milieu de l'hiver est pratiquement stable et l'étendue au printemps diminue légèrement. En 2021, la couverture neigeuse de l'hémisphère Nord était proche de la moyenne de 1972 à 2020.

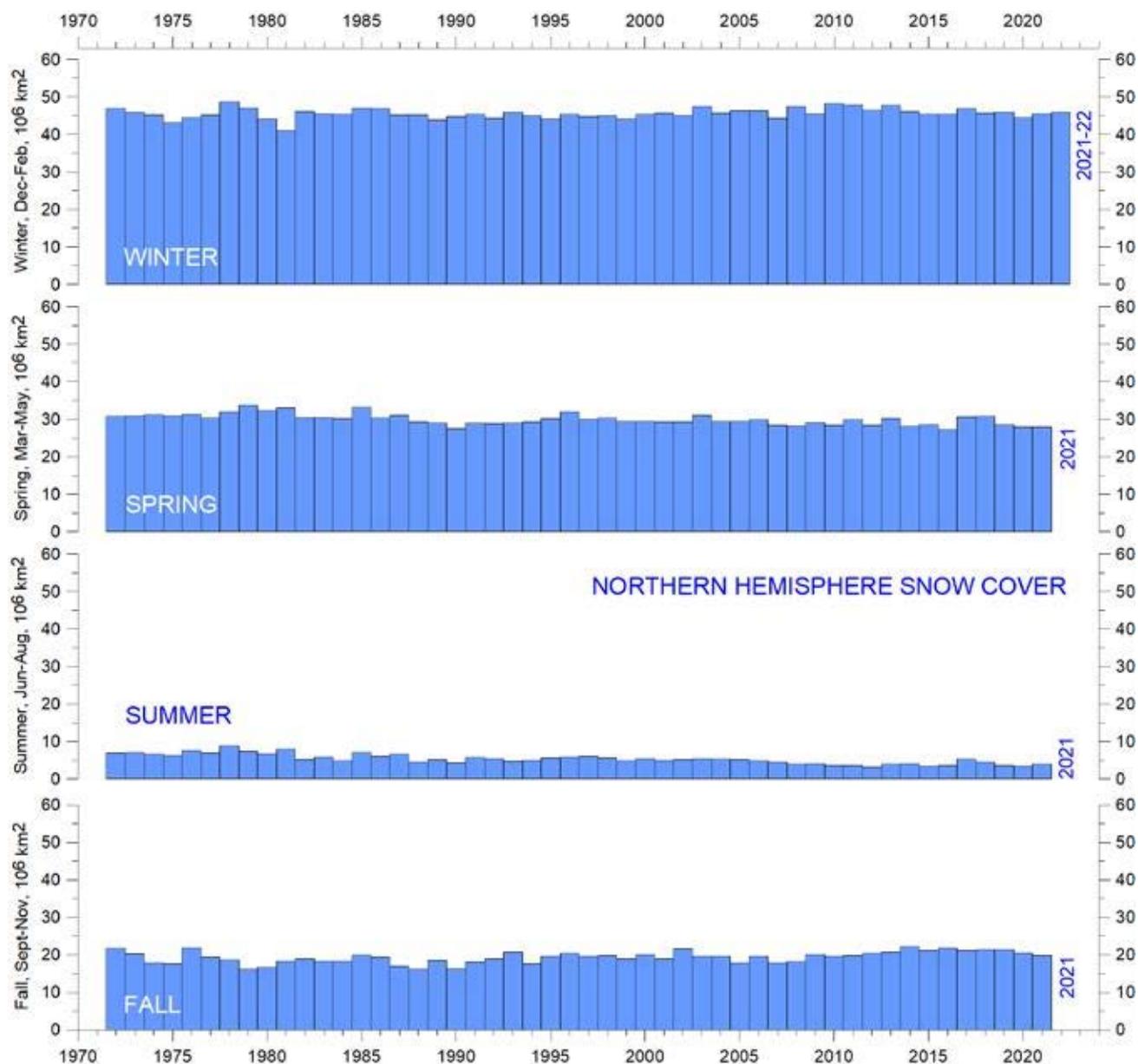


Figure 44 : Couverture neigeuse saisonnière de l'hémisphère nord depuis 1972

Source des données : Rutgers University Global Snow Laboratory.

7. Tempêtes et vent

Énergie cyclonique accumulée

L'énergie cyclonique accumulée (ACE) est une mesure utilisée par la National Oceanic and Atmospheric Administration (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 6 heures, avec un facteur de 10 000 pour la facilité d'utilisation. Son unité est de 104 nœuds. L'ACE d'une saison est la somme de l'ACE de chaque tempête et englobe le nombre, la force et la durée de toutes les tempêtes tropicales de la saison.

Le potentiel de dégâts 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 dégâts

d'un cyclone individuel ou d'une saison. Les enregistrements existants (Figure 45) ne suggèrent aucune activité cyclonique anormale ces dernières années.

Les données ACE depuis 1970 présentent une grande variabilité (Figure 45), mais sans tendance claire. Ceci est vrai au niveau mondial et pour les données séparées de l'hémisphère nord et de l'hémisphère sud (panneaux de la Figure 45). Une analyse de Fourier (non présentée ici) montre une période significative d'environ 3,6 ans dans les données ACE, et suggère en outre l'existence d'une période de 11,5 ans. Toutefois, la série de données est encore trop courte pour pouvoir tirer des conclusions définitives.

La période 1989-1998 a été caractérisée par des valeurs élevées ; d'autres pics ont été obser-

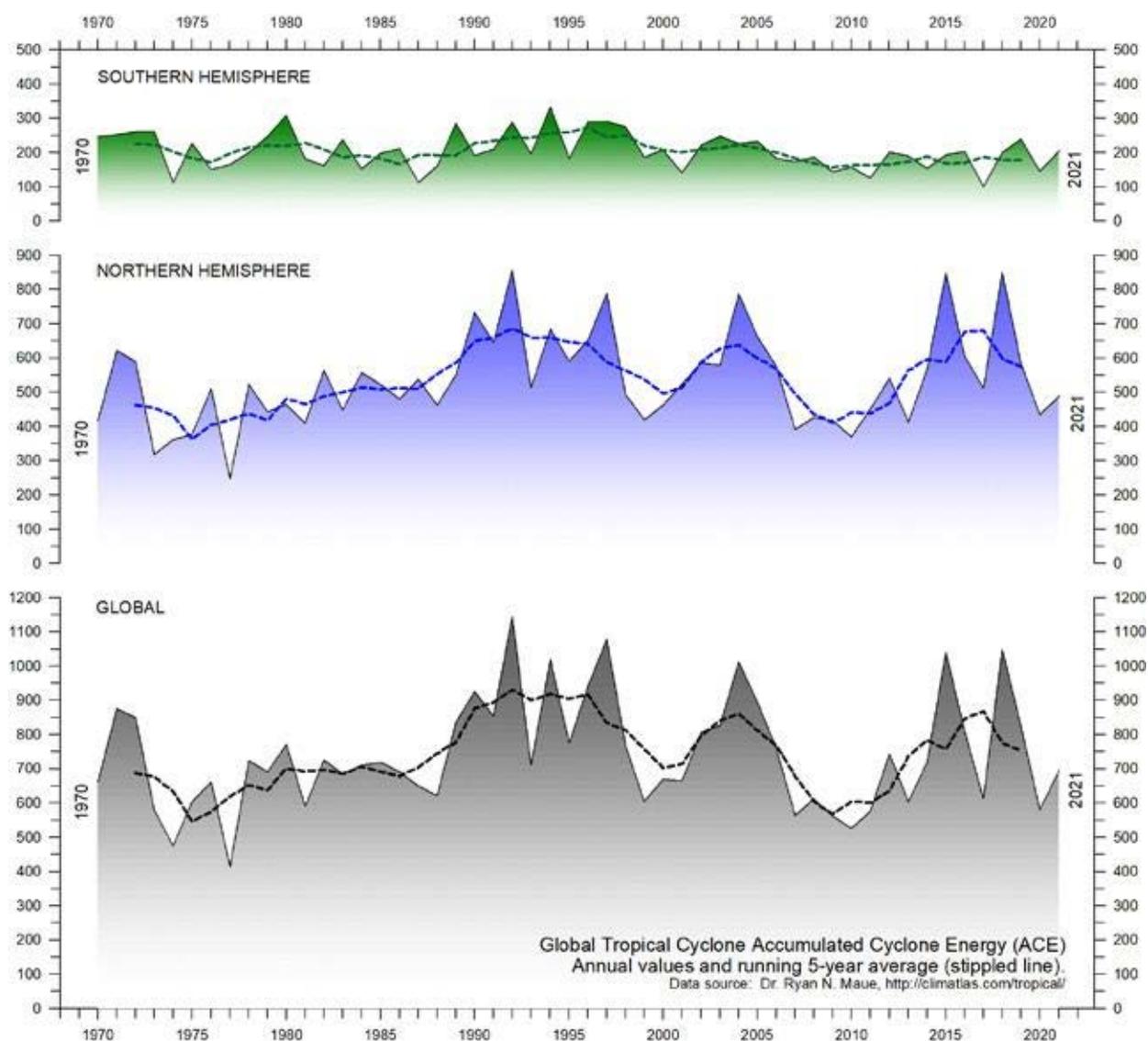


Figure 45 : Énergie cyclonique annuelle cumulée au niveau mondial

Source : Ryan Maue.

vés en 2004, 2015 et 2018, tandis que les périodes 1973-1988, 1999-2003 et 2006-2014 présentaient des valeurs faibles. Les pics de 1997/98 et 2016 coïncident avec de forts événements *El Niño* dans l'océan Pacifique (Figure 23). Les données ACE et la dynamique des cyclones en cours sont détaillées dans *Maue (2011)*. Les valeurs ACE de l'hémisphère nord (panneau central de la Figure 45) dominent le signal global (panneau inférieur de la Figure 45) et présentent donc des pics et des creux similaires à ceux affichés par les données globales, sans tendance claire pour toute la période d'observation. La principale saison cyclonique de l'hémisphère nord s'étend de juin à novembre. Les valeurs de l'ACE dans l'hémisphère sud (panneau supérieur de la Figure 45) sont généralement plus faibles que celles de l'hémisphère

nord, et la principale saison cyclonique se situe entre décembre et avril.

La série de données ACE du *Laboratoire océanographique et météorologique de l'Atlantique* remonte à 1850 (Figure 46). Une analyse de Fourier (non représentée) montre que la série ACE est fortement influencée par une variation périodique d'une durée d'environ 60 ans. Depuis 2002, la série ACE de l'Atlantique affiche une tendance générale à la baisse, mais avec de grandes variations interannuelles. La saison des ouragans dans l'Atlantique Nord présente souvent une activité supérieure à la moyenne lorsque des 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*).

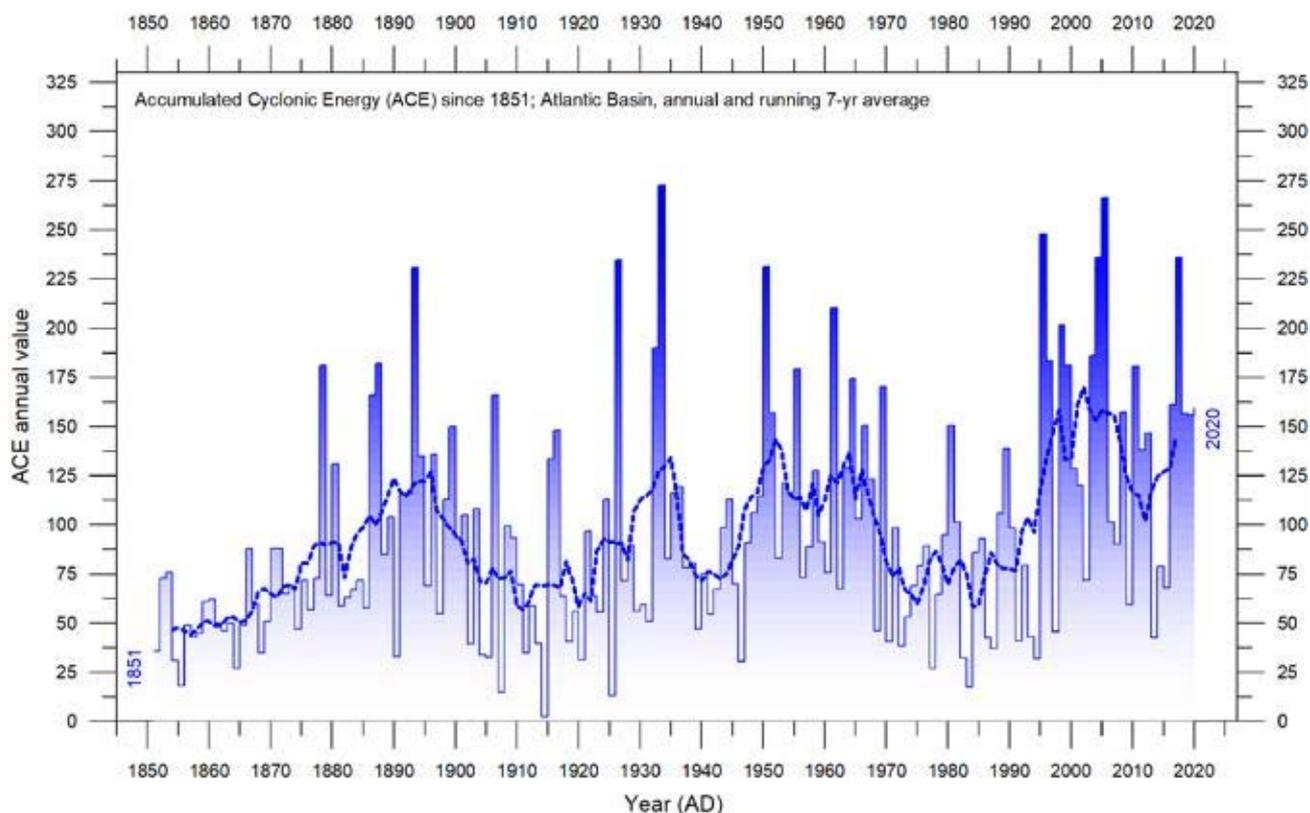


Figure 46 : ACE du bassin atlantique depuis 1851

Les lignes fines montrent les valeurs annuelles de l'ACE, et la ligne épaisse montre 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 n'ont pas encore été mises à jour et s'arrêtent à 2020.

Autres observations de tempêtes et de vents

Le nombre d'atterrissages d'ouragans sur la partie continentale des États-Unis est illustré à la Figure 47. Sur la période d'observation, cette série de données montre des variations considérables d'une année sur l'autre, mais il n'est pas possible de détecter une tendance claire dans le temps. Une analyse de Fourier (non illustrée ici) montre que cette série de données annuelles est caractérisée par deux périodes statistiquement significatives, d'environ 3,2 et 4,9 ans, respectivement.

Un aperçu des changements du régime des vents dominants peut également être obtenu à partir des observations effectuées dans des stations météorologiques côtières particulièrement exposées au vent. Un exemple dans le nord-ouest de l'Europe, où se situe le phare de Lista en Nor-

vège. Le phare se trouve sur un cap situé à l'extrême sud-ouest de la partie continentale du pays, et donc bien adapté pour enregistrer les conditions de vent dans la mer du Nord adjacente et le secteur européen de l'Atlantique Nord. Le phare de Lista dispose d'une série mensuelle de données sur les vents remontant à janvier 1931, comme le montre la Figure 48.

À cet endroit, les forces maximales du vent ont été enregistrées peu après la Seconde Guerre mondiale et ont depuis quelque peu diminué, reflétant dans une certaine mesure l'évolution générale affichée par le nombre d'atterrissages d'ouragans sur le continent américain (Figure 47), c'est-à-dire sur la rive opposée de l'Atlantique Nord.

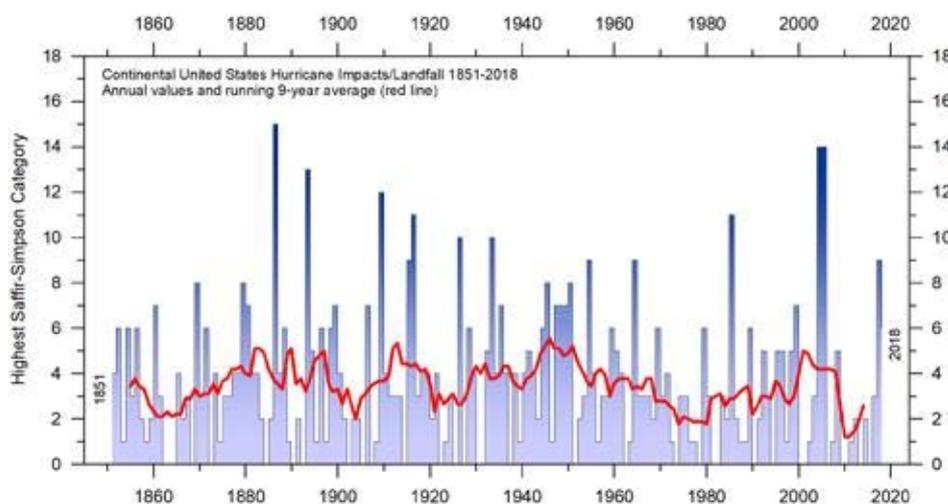


Figure 47 :
Atterrissages de cyclones sur la partie continentale des États-Unis 1851-2018

L'impact le plus élevé de l'échelle d'ouragan Saffir-Simpson aux États-Unis est basé sur l'estimation des vents de surface soutenus maximums produits à la côte. Source des données : *Division de la recherche sur les ouragans, NOAA*.

Veillez noter que cette série de données n'est pas encore mise à jour au-delà de 2018.

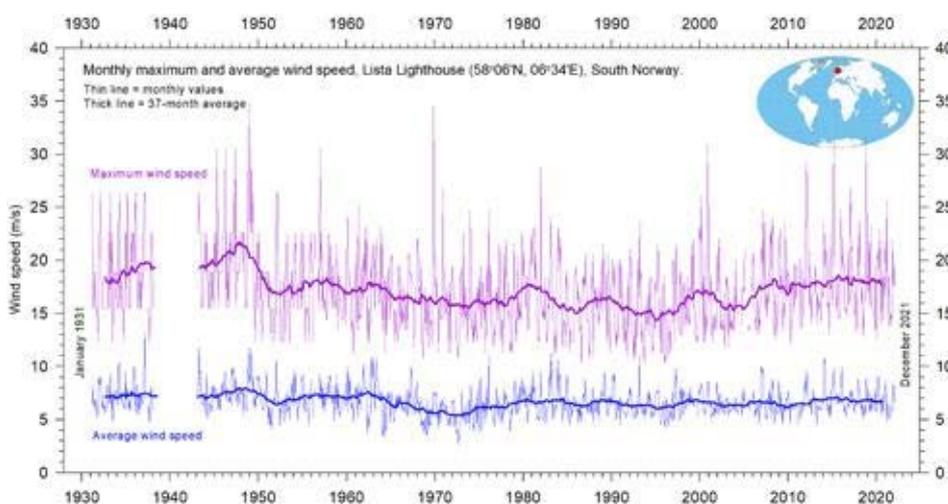


Figure 48 : Vitesse mensuelle maximale et moyenne du vent depuis janvier 1931, mesurée au phare de Lista, en Norvège du Sud.

Le phare de Lista se trouve sur un cap exposé situé à l'extrême sud-ouest de la Norvège continentale, dans une position permettant 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*.

8. Références

- Carter R.M., et al. 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., et al. 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. *Geo-physical 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), 9 pages. 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*, Vol. 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*, 52, 81–100.
- Turner J. et al. 2017. Unprecedented springtime retreat of Antarctic sea ice in 2016. *Geophysical Research Letters*, Vol.44(13), p. 6868–6875. <https://doi.org/10.1002/2017GL073656>.
- Vignudelli S. et al. 2019. Satellite altimetry measurements of sea level in the coastal zone. *Surveys in Geophysics*, Vol. 40, p. 1319–1349. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10712-019-09569-1>.

9. Liens vers les sources de données

(All accessed January–February 2022)

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>.

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>.

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.

10. Process

Le GWPF publie des articles dans plusieurs formats avec pour chacun, un processus de révision différent.

- Les rapports phares du GWPF de format long, sont tous révisés par notre comité 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.

La fonction du processus de révision est en partie de s'assurer que tout matériel publié par le GWPF est d'un niveau académique approprié, et servira l'objectif pédagogique du GWPF. En tant qu'organisation caritative, nous admettons que le contenu pédagogique doit offrir 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 qui, nous l'espérons, apportera un point de vue différent de celui de l'auteur de la publication. Nous proposons de publier des commentaires de fond en même temps que l'article principal, à condition qu'ils améliorent l'expérience pédagogique du lecteur. De cette manière, nous espérons 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 de la révision habituelle d'un article universitaire :

- Plus de relecteurs potentiels peuvent être impliqués
- Le nombre de commentaires de fond dépasse généralement l'examen par les pairs d'une revue, et
- L'identité de l'auteur est connue des relecteurs potentiels.

En tant qu'organisation dont les publications font parfois l'objet de critiques affirmées ou irréflechies, ce processus de révision vise à améliorer l'expérience pédagogique 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 éclairé et informatif. Nous attendons donc de toutes les parties concernées qu'elles traitent les critiques avec le plus grand sérieux.

La responsabilité finale de la publication incombe au Président des Administrateurs et au Directeur de le GWPF. Mais dans tous les cas, les opinions exprimées sont celles de l'auteur. Le GWPF n'a jamais eu de position corporatiste autre que celles dictées par ses objectifs pédagogiques.

11. À propos de la Global Warming Policy Foundation

Les gens sont naturellement préoccupés par l'environnement et veulent des politiques qui améliorent le bien-être humain et protègent l'environnement ; des politiques qui ne font pas de mal, mais qui aident.

La Global Warming Policy Foundation (GWPF) s'est engagée à fournir une plateforme pour la recherche éducative et les débats informés sur ces questions importantes.

Afin de progresser et de faire avancer l'évaluation de politiques efficaces, il est essentiel de cultiver une culture de débat ouvert, de tolérance et d'apprentissage.

Notre objectif est d'élever le niveau d'apprentissage et de compréhension par le biais de recherches et d'analyses rigoureuses, afin de contribuer à un débat équilibré entre le public intéressé et les décideurs.

Nous voulons créer une plate-forme éducative sur laquelle un terrain d'entente peut être établi, afin de surmonter la polarisation et l'esprit partisan. Nous voulons promouvoir une culture du débat, du respect et de la soif de connaissances.

12. 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)
Steve Baker MP
Professor Peter Edwards
Kathy Gyngell

Professor Michael Kelly
Terence Mordaunt
Graham Stringer MP
Professor Fritz Vahrenholt

ACADEMIC ADVISORY COUNCIL

Professor Christopher Essex (Chairman)
Professor J. Ray Bates
Sir Ian Byatt
Dr John Constable
Professor Vincent Courtillot
Professor Peter Dobson
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

RAPPORT RÉCENTS DU GWPF

16	Montford	Unintended Consequences of Climate Change Policy
17	Lewin	Hubert Lamb and the Transformation of Climate Science
18	Goklany	Carbon Dioxide: The Good News
19	Adams	The Truth About China
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: <i>El Niño</i> 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

Pour plus d'informations sur le Global Warming Policy Foundation, veuillez visiter notre site Web à www.thegwpcf.org.

Le GWPF est un organisme de bienfaisance enregistré sous le numéro 1131448.

