



LE CLIMAT en **2019**

Ole Humlum

L'état du climat en 2019

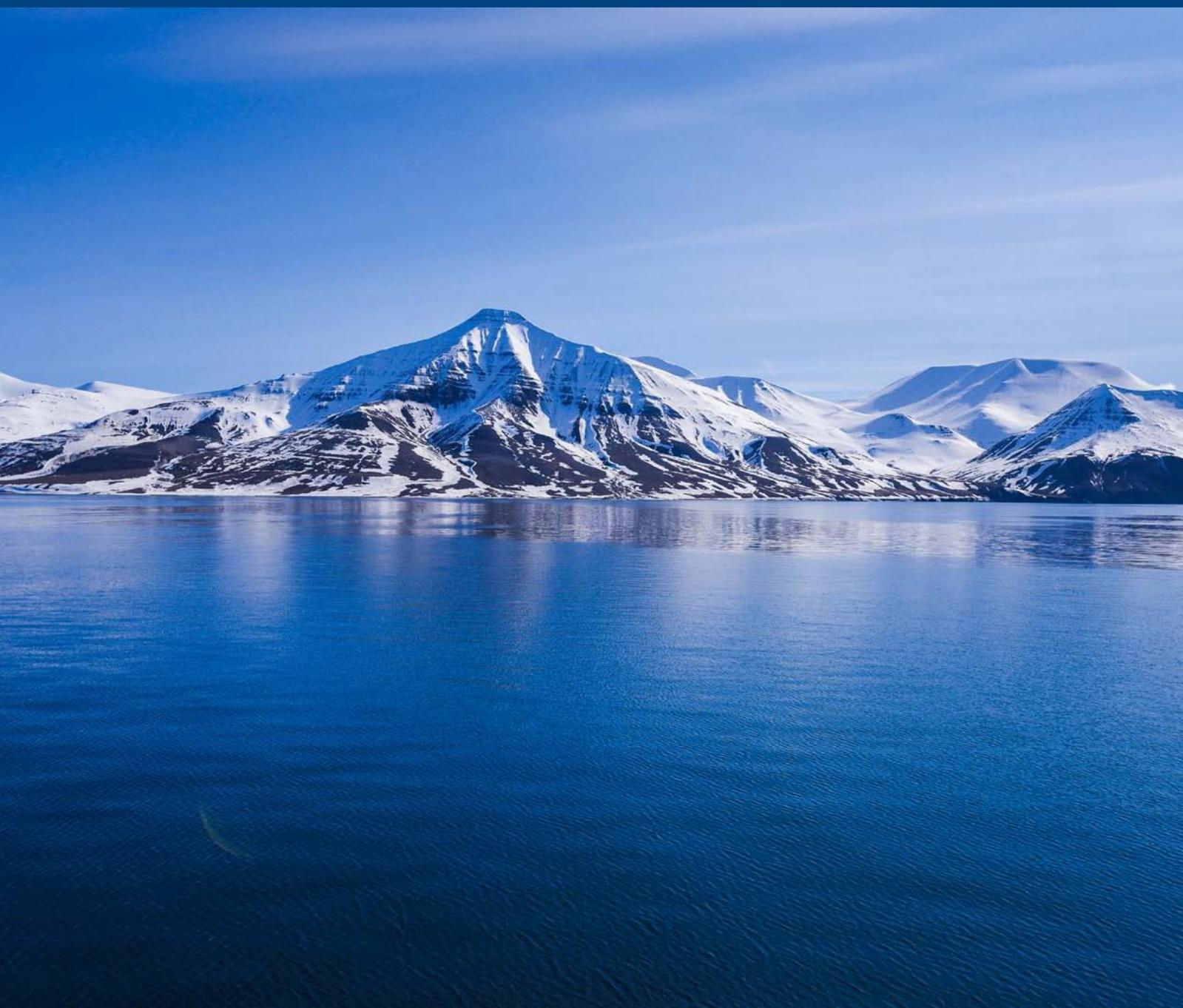
Ole Humlum

Rapport 42, The Global Warming Policy Foundation

Traduit en français par l'association des climato-réalistes

ISBN 978-1-8380747-0-8

© Copyright 2020, The Global Warming Policy Foundation



Contenu

A propos de l'auteur	iii
Résumé : les 10 faits clés	v
1. Survol général 2019	1
2. Températures atmosphériques	3
3. Températures des océans	18
4. Cycles océaniques	28
5. Niveau de la mer	31
6. Extension de la banquise	35
7. Couverture neigeuse	37
8. Tempêtes et cyclones	40
Notes	45
Références	45
A propos du GWPF (<i>Global Warming Policy Foundation</i>)	48

A propos de l'auteur

Ole Humlum a été professeur de géographie physique au centre universitaire de Svalbard (Norvège). Il est professeur émérite de géographie physique à l'université d'Oslo (Norvège)

Résumé : les 10 points clés

1. Les enregistrements de température instrumentaux (depuis 1850) montrent que 2019 a été une année très chaude, mais moins que l'année 2016.
2. En 2019, la température moyenne a été affectée par un épisode El Niño modéré qui a interrompu la diminution graduelle de la température globale après le El Niño 2015-16.
3. Depuis 1979, la température de la basse troposphère a augmenté sur terre et sur les océans, mais surtout sur les continents. Cela pourrait être expliqué par l'ensoleillement, la couverture nuageuse et l'utilisation des terres.
4. Les changements de température enregistrés dans la basse troposphère se retrouvent généralement aussi à des altitudes plus élevées. Dans la stratosphère cependant, une pause des températures a commencé en 1995 environ, soit 5 à 7 ans avant qu'une semblable pause ne soit observée dans la basse troposphère, près de la surface de la Terre. La pause de la température stratosphérique se poursuit maintenant depuis 25 ans.
5. L'épisode El Niño de 2015-16 est un des plus virulents observés depuis le début des mesures en 1950. Si l'on considère l'ensemble des enregistrements cependant, on voit que les alternances El Niño et La Niña ne sont pas inhabituelles.
6. Depuis 2004, quand les enregistrements des températures des océans ont commencé, la couche au dessus de 1900 mètres s'était quelque peu réchauffée. Le plus fort réchauffement (entre la surface et 200 mètres de profondeur) a surtout affecté les océans situés à l'équateur où la radiation solaire entrante est maximum. Une situation contrastée par rapport à celle de l'Atlantique Nord qui a connu un refroidissement net prononcé à la surface depuis 2004.
7. Les données des marégraphes suggèrent une élévation du niveau de la mer de 1 à 1,5 mm par an alors que l'altimétrie satellitaire suggère une hausse d'environ 3,2 mm par an, voire davantage. Cette divergence notable (dans un rapport de 1 à 2) entre les 2 systèmes de mesure n'a pas reçu d'explications largement acceptées.
8. Depuis 1979, les banquises de l'Arctique et de l'Antarctique ont connu des évolutions divergentes, régression pour la première, augmentation pour l'autre. Les changements de courte durée qui se surimposent à ces tendances globales doivent être pris en compte pour comprendre les variations annuelles. Dans l'Arctique, un cycle de 5,3 années est observé, de même qu'en Antarctique, qui est affecté par un cycle d'environ 4,5 années. Ces 2 variations ont connu leur minima simultanément en 2016, expliquant des records de baisse de l'extension globale de la banquise. Ceci a affecté en particulier la banquise antarctique en 2016.
9. La couverture neigeuse de l'Hémisphère Nord a enregistré d'importantes variations locales et régionales d'une année à l'autre. Globalement la couverture neigeuse est restée stable depuis 1972.
10. Les tempêtes tropicales et les cyclones ont montré depuis 1970 de grandes variations, mais on n'observe pas de tendance à l'augmentation ou à la diminution. Le nombre des ouragans ayant frappé les côtes des USA n'augmente pas depuis 1851.



1. 2019 : Aperçu général

Dans ce rapport nous privilégions les observations aux résultats des modèles numériques. Toutes les références et sources de données sont répertoriées en annexe.

Températures de l'air

La température de l'air mesurée près de la surface de la planète est au cœur de nombreux débats, mais la signification d'un réchauffement ou d'un refroidissement à court terme de la température de surface ne devrait pas être surestimée. Lors de chaque événement chaud El Niño ou froid La Niña, d'énormes échanges de chaleur se produisent entre l'océan Pacifique et l'atmosphère qui finissent par se manifester par un signal dans la température globale. Cependant, un tel changement ne reflète pas un changement du contenu calorifique total du système océan-atmosphère, mais plutôt une redistribution de l'énergie entre l'océan et l'atmosphère. L'évaluation de la dynamique des températures des océans est donc au moins aussi importante que celle des changements des températures de l'air en surface.

Considérant les différents jeux de données de température de l'air de surface depuis 1850 ou 1880, 2019 a été une année très chaude, mais plus froide que 2016. Cependant, la baisse des températures caractérisant 2017 et 2018 a été interrompue par une résurgence modérée de l'épisode El Niño, soulignant l'importance des échanges océan-atmosphère.

De nombreuses régions de l'Arctique ont connu des températures record en 2016, mais depuis lors, y compris en 2019, les conditions ont généralement été plus fraîches. Le pic de température dans l'Arctique en 2016 pourrait avoir été affecté par la chaleur océanique libérée de l'océan Pacifique pendant le fort El Niño de 2015-2016, puis transportée vers le nord. Cela montre que les températures de l'Arctique peuvent être affectées par des variations locales, mais aussi par des changements se produisant dans des régions éloignées.

De nombreux diagrammes de ce rapport concernent la période commençant en 1979 (début de l'ère des satellites) sur laquelle nous avons un large éventail d'observations avec une couverture presque mondiale, notamment

la température. Ces données fournissent une vue détaillée des changements de température à différentes altitudes dans l'atmosphère. Ces observations révèlent que, alors qu'une pause des températures de la basse troposphère commençait vers 2002, un plateau de température stratosphérique similaire avait déjà commencé en 1995.

Depuis 1979, les températures de la basse troposphère ont augmenté à la fois sur terre et sur les océans, mais plus nettement sur terre. L'explication la plus simple à cela est qu'une grande partie du réchauffement est causée par l'insolation solaire, mais il pourrait y avoir d'autres raisons supplémentaires, telles que des changements dans la couverture nuageuse et dans l'utilisation des terres.

Températures des océans

Le programme Argo a atteint 15 ans de couverture mondiale, passant d'une gamme relativement clairsemée de 1000 flotteurs en 2004 à plus de 4000 au début de 2020. Le déploiement de nouveaux flotteurs se poursuit au rythme de 800 par an. Les flotteurs ont fourni un ensemble unique de données sur la température de l'océan pour des profondeurs allant jusqu'à 1900 m (bien que les océans soient beaucoup plus profonds que cela). Malgré cette limitation et le fait que la série de données soit encore relativement courte, des points intéressants émergent déjà des observations.

Depuis 2004, la couche 0-1900 mètres des océans s'est réchauffée. Le réchauffement maximal (0,08 à 0,23°C) affecte la couche de 200 m la plus élevée des océans, principalement dans les régions proches de l'équateur, où la plus grande quantité de rayonnement solaire est reçue.

À de plus grandes profondeurs, un petit réchauffement net (environ 0,02°C) est observé entre 2004 et 2019. Le réchauffement a principalement affecté les océans équatoriaux entre 30°N et 30°S, qui, en raison de la forme sphérique de la planète, représentent une immense surface. Simultanément, les océans du nord (55–65°N) ont en moyenne, connu un refroidissement marqué jusqu'à 1400 m et un léger réchauffement à des profondeurs plus importantes. Les océans du sud (55-65°S) ont connu un léger réchauffement à la plupart des profondeurs, mais plus clairement près de la

surface. Cependant, les moyennes peuvent être trompeuses et une meilleure compréhension peut être obtenue en étudiant les détails (voir la Section 3).

Les banquises

En 2019, l'étendue mondiale de la banquise est restée bien en deçà de la moyenne de l'ère satellitaire (depuis 1979), mais a affiché une stabilité ou une tendance légèrement à la hausse en cours d'année. Fin 2016, l'étendue mondiale de la banquise atteignait un minimum marqué. En Antarctique, les vents ont joué un rôle, mais le minimum a été (au moins en partie) le résultat de deux cycles naturels différents la banquise dans l'hémisphère nord dans celui du sud. Ces cycles ont eu des minima simultanés en 2016, avec les conséquences sur l'étendue mondiale de la banquise. Après ces minimums, une tendance à la stabilité voire à la hausse pourrait avoir commencé en 2019 aux deux pôles.

Couverture neigeuse

Les variations de l'enneigement mondial sont principalement le fait de changements dans l'hémisphère Nord, où se trouvent les principales zones terrestres. La couverture neigeuse de l'hémisphère Sud est essentiellement contrôlée par la calotte glaciaire antarctique et est donc relativement stable. L'étendue moyenne de la couverture neigeuse de l'hémisphère Nord est également stable depuis le début des observations par satellite, malgré des variations interannuelles locales et régionales importantes. Compte tenu des changements saisonniers depuis 1979, l'étendue de la couverture neigeuse de l'hémisphère Nord a augmenté légèrement en automne, est restée stable en hiver, et a diminué légèrement au printemps. En 2019 l'enneigement saisonnier dans l'hémisphère Nord était proche de celle des années précédentes.

Niveau de la mer

Le niveau de la mer est surveillé par altimétrie satellitaire et par des mesures directes à l'aide de marégraphes répartis le long des côtes. Alors que les données satellitaires suggèrent une élévation du niveau de la mer mondiale d'environ 3,2 mm par an ou plus, celles des marégraphes donnent une élévation moyenne du niveau de la mer de moins de 1,5 mm par

an. Aucun des deux types de mesures n'indique une accélération récente de cette élévation. La différence marquée (rapport d'au moins 1 à 2) entre les deux jeux de données n'a toujours pas d'explication largement acceptée, mais on sait que les mesures des satellites rencontrent des difficultés dans les zones côtières [1]. En outre, pour les prévisions côtières locales, seules les données marégraphiques sont pertinentes, comme nous le verrons plus loin dans ce rapport.

Tempêtes tropicales et cyclones

Les données les plus récentes sur l'énergie cyclonique accumulée (ACE) des tempêtes tropicales et des cyclones dans le monde restent dans la fourchette des observations depuis 1970. La série de données ACE présente une variabilité considérable, mais sans tendance claire vers des valeurs plus ou moins élevées. Une série plus longue disponible pour le bassin atlantique (depuis 1850) suggère un cycle naturel d'une durée d'environ 60 ans dans l'énergie cyclonique accumulée (ACE). De plus, les données récentes ne montrent pas d'évolution des cyclones qui se sont abattus sur le continent américain.

2. Températures atmosphériques

Régime spatial des températures de surface

La température mondiale de l'air de surface en 2019 a été légèrement supérieure à la moyenne des dix dernières années. Les années 2017 et 2018 ont été affectées par les conséquences de l'épisode majeur d'El Niño qui a culminé au début de 2016. En 2017, la température mondiale de l'air de surface baissait déjà lentement vers le niveau d'avant 2015-2016, un ralentissement graduel qui s'est poursuivi tout au long de 2018, mais a été interrompu en 2019 par la résurgence d'un nouvel épisode El Niño modéré (voir la section 3).

En 2019, les températures de l'air en surface ont été caractérisées dans l'hémisphère Nord par des contrastes régionaux, influencés par le régime de *jet stream* dominant. L'évolution la plus prononcée a été la persistance à partir de 2018 de conditions relativement froides dans une grande partie de l'Amérique du Nord. En revanche, la majeure partie de l'Europe, de la Russie et surtout de l'Alaska ont été relativement chauds. Près de l'équateur, les températures de l'air en surface étaient généralement proches de la moyenne des 10 dernières années. C'était également le cas dans l'hémisphère sud, mais avec un contraste entre les océans où les températures de l'air en surface étaient inférieures à la moyenne, et les zones terrestres, où elles étaient supérieures ou proches de la moyenne. Des températures océaniques relativement basses étaient observées dans les régions comprises entre 20°S et 55° S, en particulier dans l'Atlantique Sud et l'océan Indien.

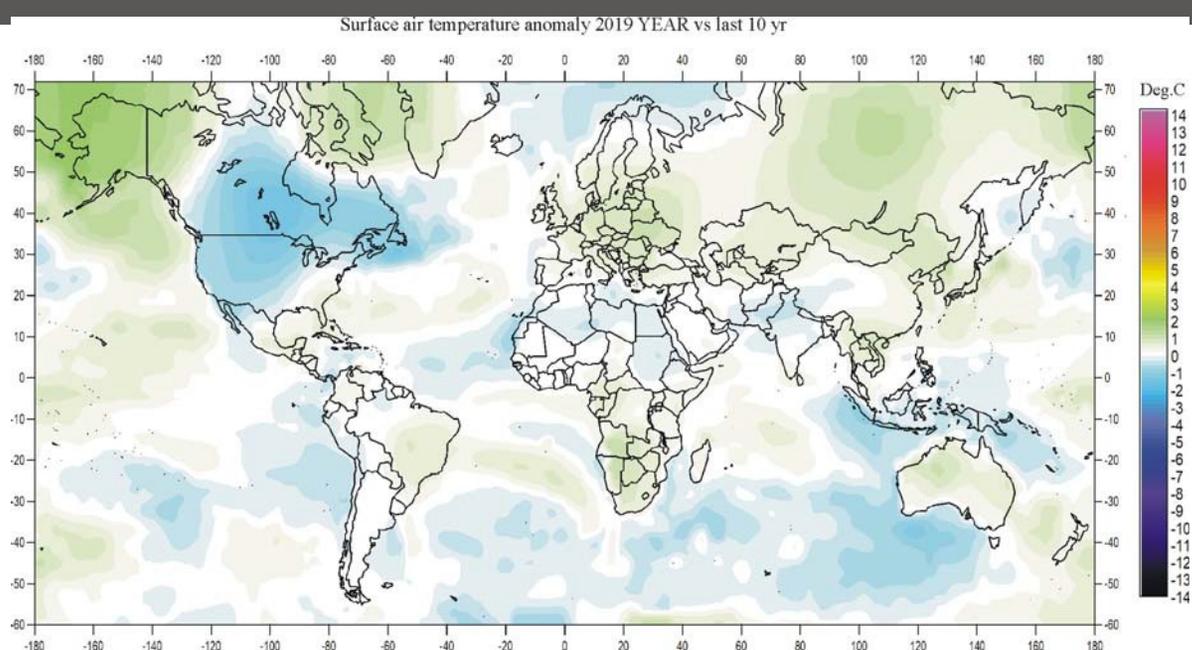


Figure 1: 2019 Températures 2019 comparées avec la moyenne des 10 dernières années (Les couleurs vert-jaune-rouge indiquent des zones avec des températures plus élevées que la moyenne, tandis que les couleurs bleues indiquent des températures inférieures à la moyenne. Source de données: Goddard Institute for Space Studies (GISS) utilisant les températures de surface océaniques Had_Reyn_v2 et les températures de surface terrestre GHCNv4.)

Dans l'Arctique, le secteur de l'île de Baffin (Ouest du Groenland) a enregistré des températures de l'air de surface supérieures à la moyenne des 10 dernières années. Les secteurs de la Sibérie et de l'Alaska ont également connu des températures supérieures à la moyenne, contrairement à 2018, où elles avaient été relativement froides. Le secteur européen de l'Arctique a été relativement froid, bien que le record de température de l'Arctique au nord de 80°N soit quelque peu invraisemblable, en raison d'un artefact d'interpolation dans les enregistrements produits par la NASA.

L'Antarctique a connu en 2019 des températures proches de la moyenne, aucune région n'étant significativement plus chaude ou plus froide que la moyenne des 10 dernières années. Un artefact d'interpolation similaire est également en jeu au sud de 80° S.

Pour résumer, en 2019 les températures moyennes mondiales de l'air étaient plus élevées qu'au cours des 10 dernières années, principalement en raison d'un El Niño modéré. Une fois de plus, la dynamique de l'océan Pacifique équatorial a démontré son importance pour les températures mondiales de l'air de surface, parmi de nombreux autres facteurs climatiques.

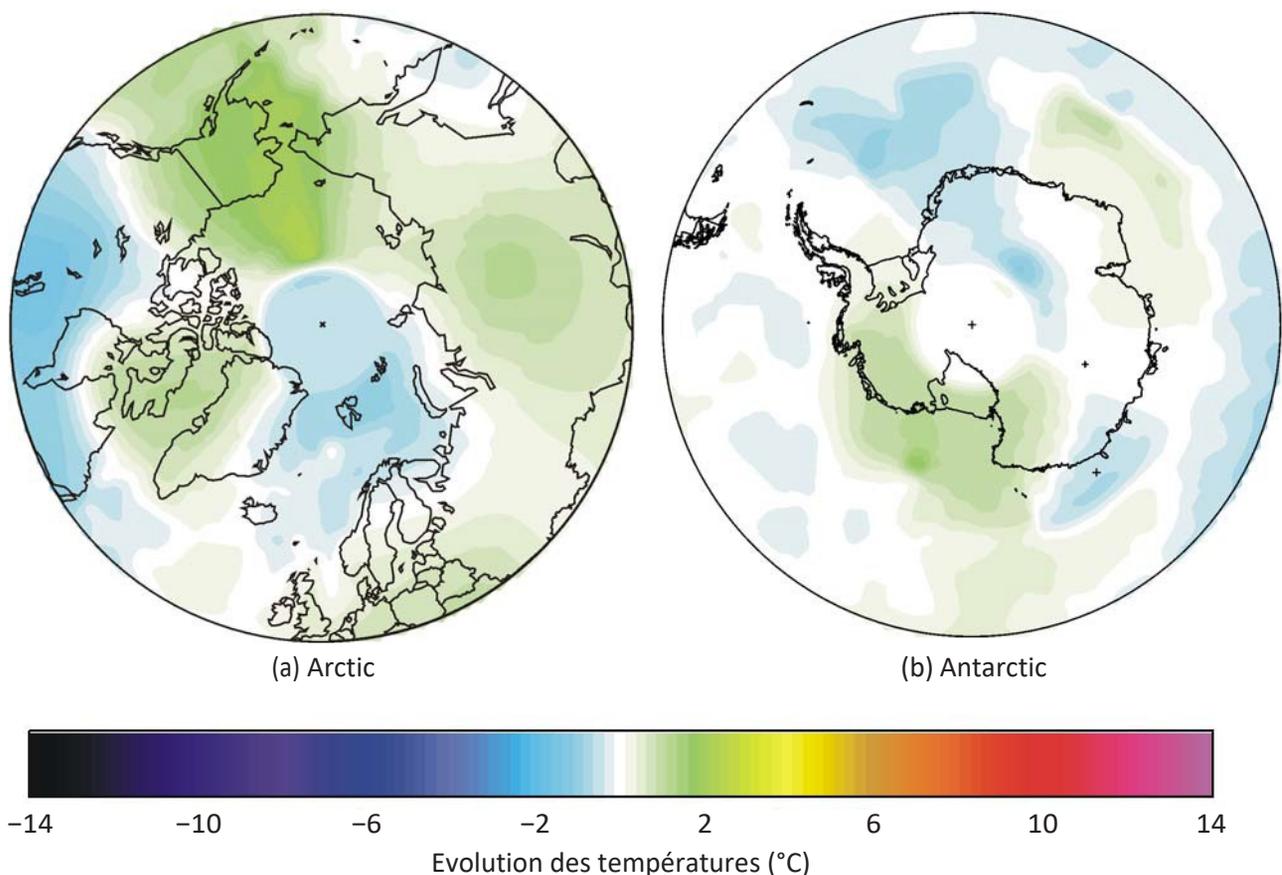


Figure 2 : Températures de l'air en surface polaire en 2019 par rapport à la moyenne des 10 dernières années. Les couleurs vert-jaune-rouge indiquent des zones avec des températures plus élevées que la moyenne, tandis que les couleurs bleues indiquent des températures inférieures à la moyenne. Source de données : *Goddard Institute for Space Studies* (GISS) utilisant les températures de surface océaniques *Hadl_Reyn_v2* et les températures de surface terrestre *GHCNv4*.

Basse troposphère : par mois et par année

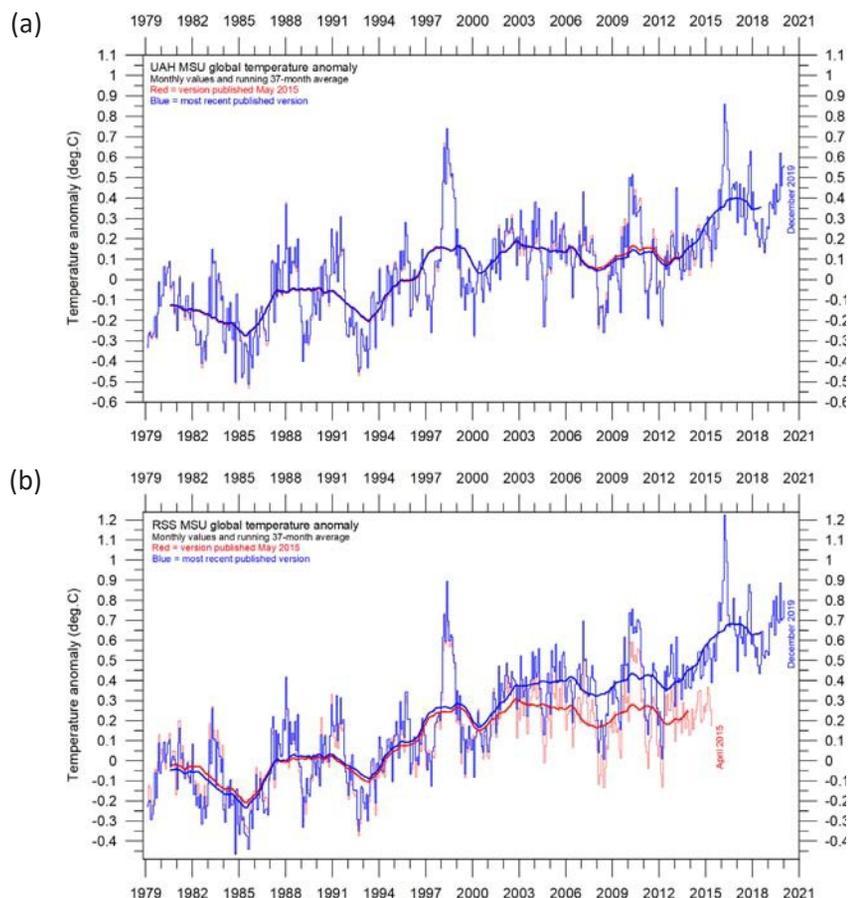
Il existe deux principaux jeux de données de température pour la basse troposphère, celui de l'Université de l'Alabama, Huntsville (UAH) et celui du *Remote Sensing Systems Inc* (RSS). Les deux enregistrements montrent clairement un pic de température associé à l'El Niño 2015-2016, et une baisse graduelle subséquente, suivie par l'apparition d'un nouveau pic dû à l'El Niño modéré de 2019 (figure 3). Les moyennes annuelles sont cohérentes avec ces observations (figure 4)

Toutes les séries de températures sont ajustées à mesure que de nouvelles versions sont introduites au fil du temps. Une comparaison entre le dernier enregistrement (décembre 2019) et celui de mai 2015 (ligne rouge sur la figure 3) montre que seuls quelques petits ajustements ont depuis été apportés à la série UAH, mais que la série RSS a fait l'objet d'ajustements importants, réchauffant les températures à partir de 2002 d'environ + 0,1 ° C. Cet ajustement de la série RSS a été introduit en 2017.

La variation globale de la température dans les diagrammes (figure 4) est similaire pour les deux séries de données, mais l'augmentation globale de la température 1979–2019 est plus importante pour RSS que pour UAH. Avant l'ajustement 2017 de la série RSS, l'augmentation de température était presque identique dans les deux séries.

Figure 3 : Evolution mondiale de la température de la basse troposphère depuis 1979.

(a) UAH et (b) RSS. Elles représentent les conditions prévalant à une altitude d'environ 2 km. Dans les 2 diagrammes, la ligne épaisse est la moyenne mobile de 37 mois.



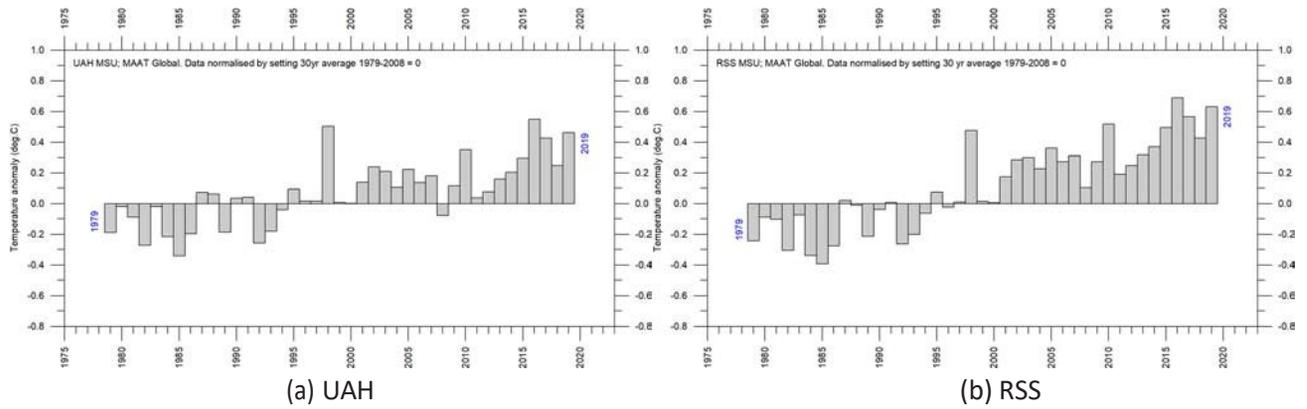


Figure 4: Anomalies des températures moyennes de la basse troposphere depuis 1979.

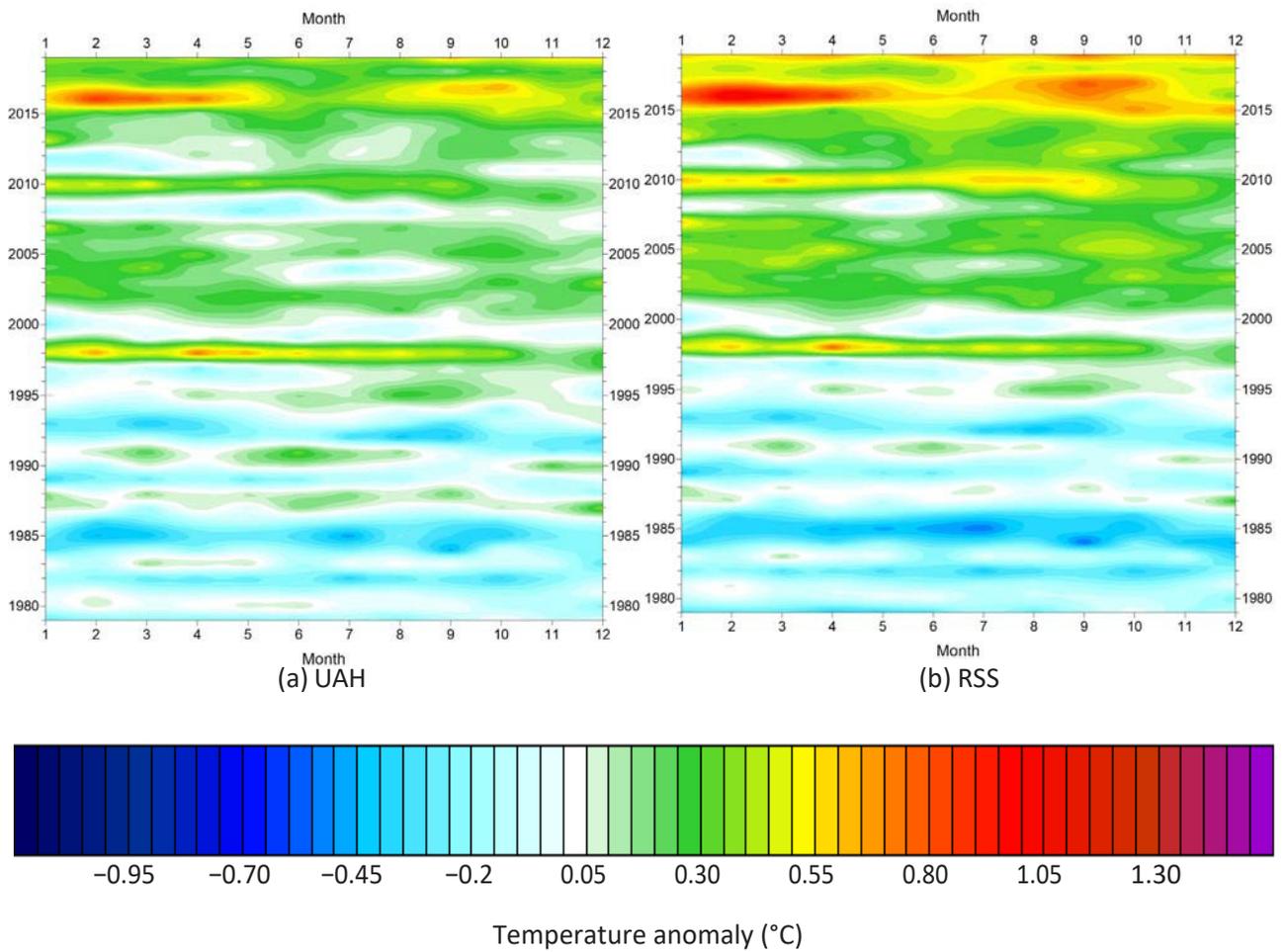


Figure 5: Évolution des températures mondiales de la basse troposphère depuis 1979. Anomalies de température par rapport à la moyenne 1979-2008. Les effets des El Niños de 1998, 2010 et 2015-2016 sont clairement visibles, tout comme la tendance qu'ont de nombreux El Niños à culminer pendant l'hiver dans l'hémisphère Nord. Comme les différentes bases de données sur les températures utilisent différentes périodes de référence, les séries ont été rendues comparables en fixant leur moyenne individuelle sur 30 ans (1979-2008) à zéro.

Températures de l'air à la surface : moyenne mensuelle

Dans ce rapport, sont considérés trois enregistrements de données de températures disponibles :

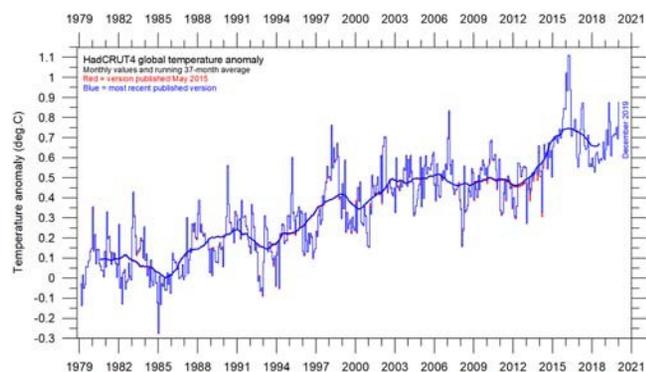
- HadCRUT4, produits par le *Hadley Centre for Climate Prediction and Research* et l'unité de recherche climatique de l'Université d'East Anglia (*East Anglia's Climatic Research Unit*)
- NCDC, les enregistrements produits par le *US National Climatic Data Center*
- GISS, les enregistrements produits par *NASA's Goddard Institute for Space Studies*.

Les trois relevés de température de l'air de surface montrent clairement le pic de température associé à l'El Niño 2015-2016, la baisse de température qui a suivi et la nouvelle augmentation de la température due à l'épisode El Niño 2019 modéré (Figure 6).

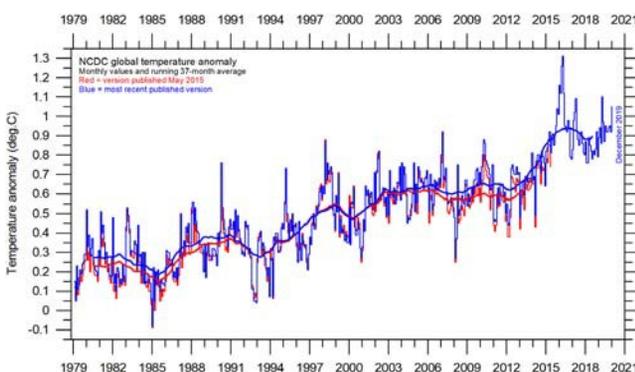
La comparaison entre l'enregistrement le plus récent (décembre 2019) et celui de mai 2015 (rouge sur la figure 6) montre que peu d'ajustements ont été apportés aux données du *HadCRUT* au cours de cette période, tandis que de nombreux ajustements ont été apportés aux enregistrements du NCDC et du GISS. Cependant, les trois enregistrements de surface confirment que le récent épisode majeur d'El Niño a culminé au début de 2016 et qu'il y a eu un retour progressif vers les conditions d'avant 2015, avant une nouvelle augmentation de la température en 2019. Cette évolution est également illustrée à la figure 7, qui montre l'évolution dans le temps des températures mensuelles.

Figure 6 : Evolution de la température globale de l'air de surface depuis 1979.

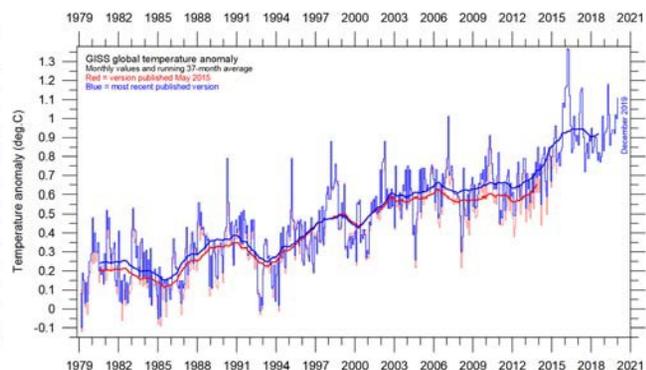
(a) HadCRUT4 (b) NCDC
(c) GISS.



(a) HadCRUT4



(b) NCDC



(c) GISS

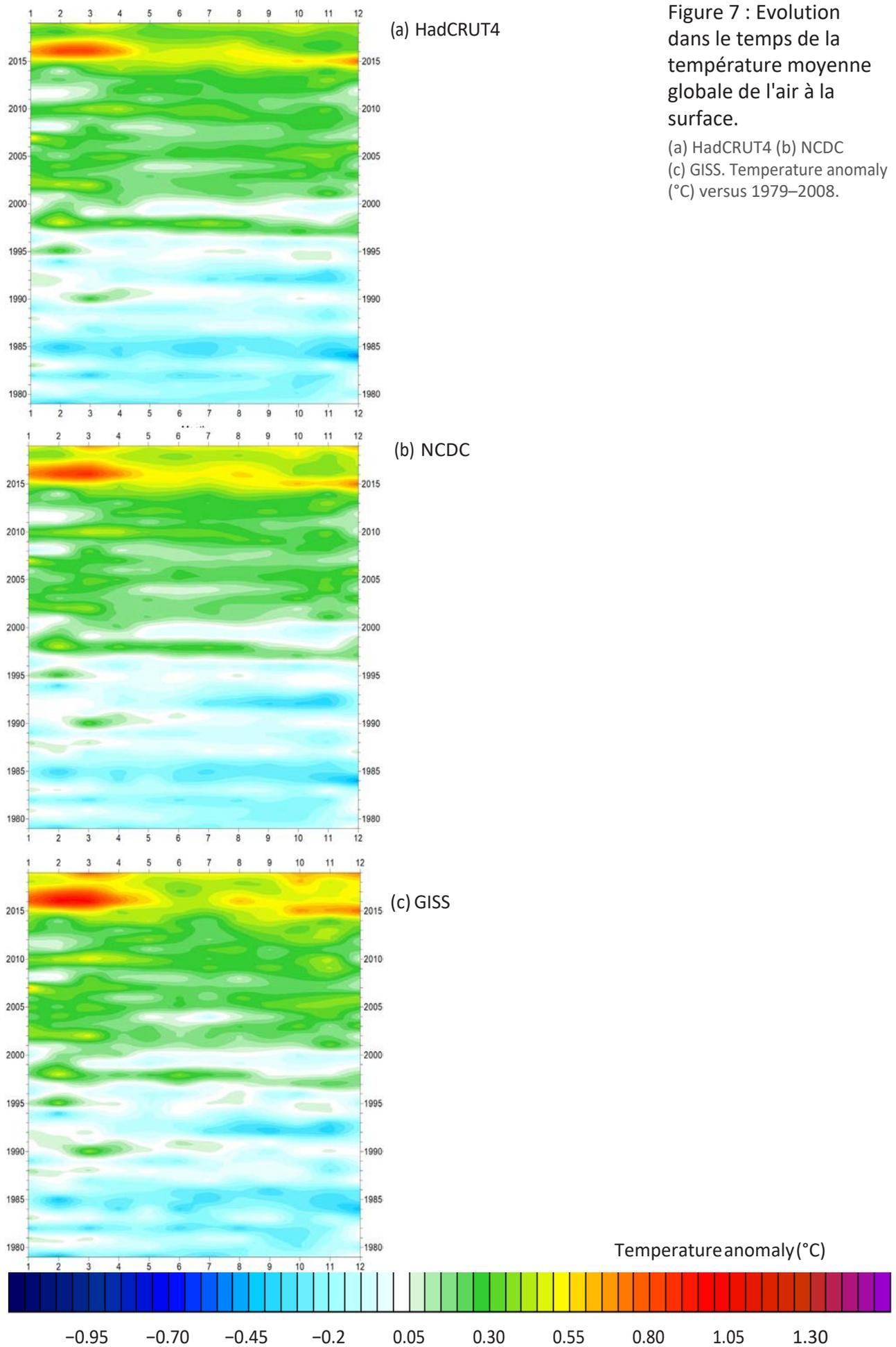
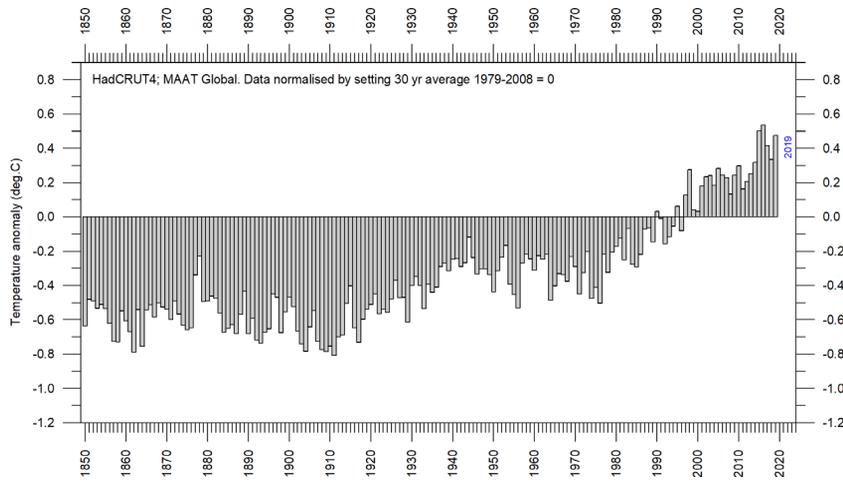


Figure 7 : Evolution dans le temps de la température moyenne globale de l'air à la surface.

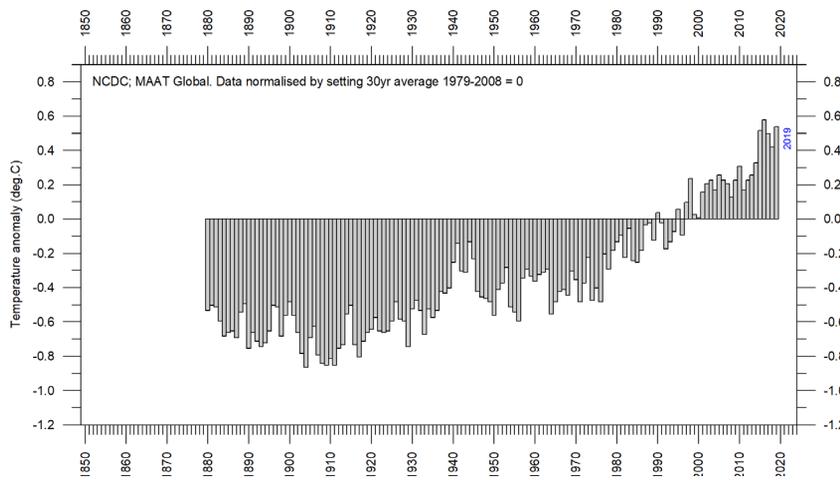
(a) HadCRUT4 (b) NCDC (c) GISS. Temperature anomaly (°C) versus 1979–2008.

Températures de l'air à la surface : moyenne annuelle

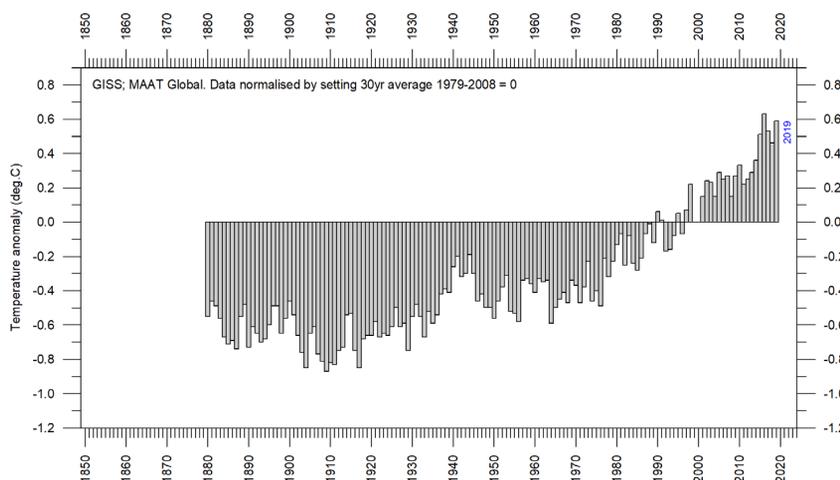
Les 3 jeux de données montrent que l'année 2016 a été la plus chaude depuis le début des enregistrements, comme cela a été précédemment signalé, 2016 ait été affecté par un puissant épisode El Niño (Figure 8).



(a) HadCRUT4



(b) NCDC



(c) GISS

Figure 8: Température globale de surface : moyenne annuelle.

(a) HadCRUT4 (b) NCDC (c) GISS.

Températures de surface versus basse troposphère

Même si les différents enregistrements de température sont en général cohérents entre eux, il reste une différence entre les enregistrements de surface et ceux enregistrés par les satellites, comme l'illustre la figure 9. Dans la première partie de la série (jusqu'en 2004), les températures par satellite étaient souvent un peu plus élevées que les observations de surface. A partir de 2004, les enregistrements de surface ont commencé à dériver par rapport aux enregistrements satellitaires, dans le sens d'un réchauffement accru. L'ajustement majeur de l'enregistrement satellitaire RSS en 2017 a considérablement réduit cette différence.

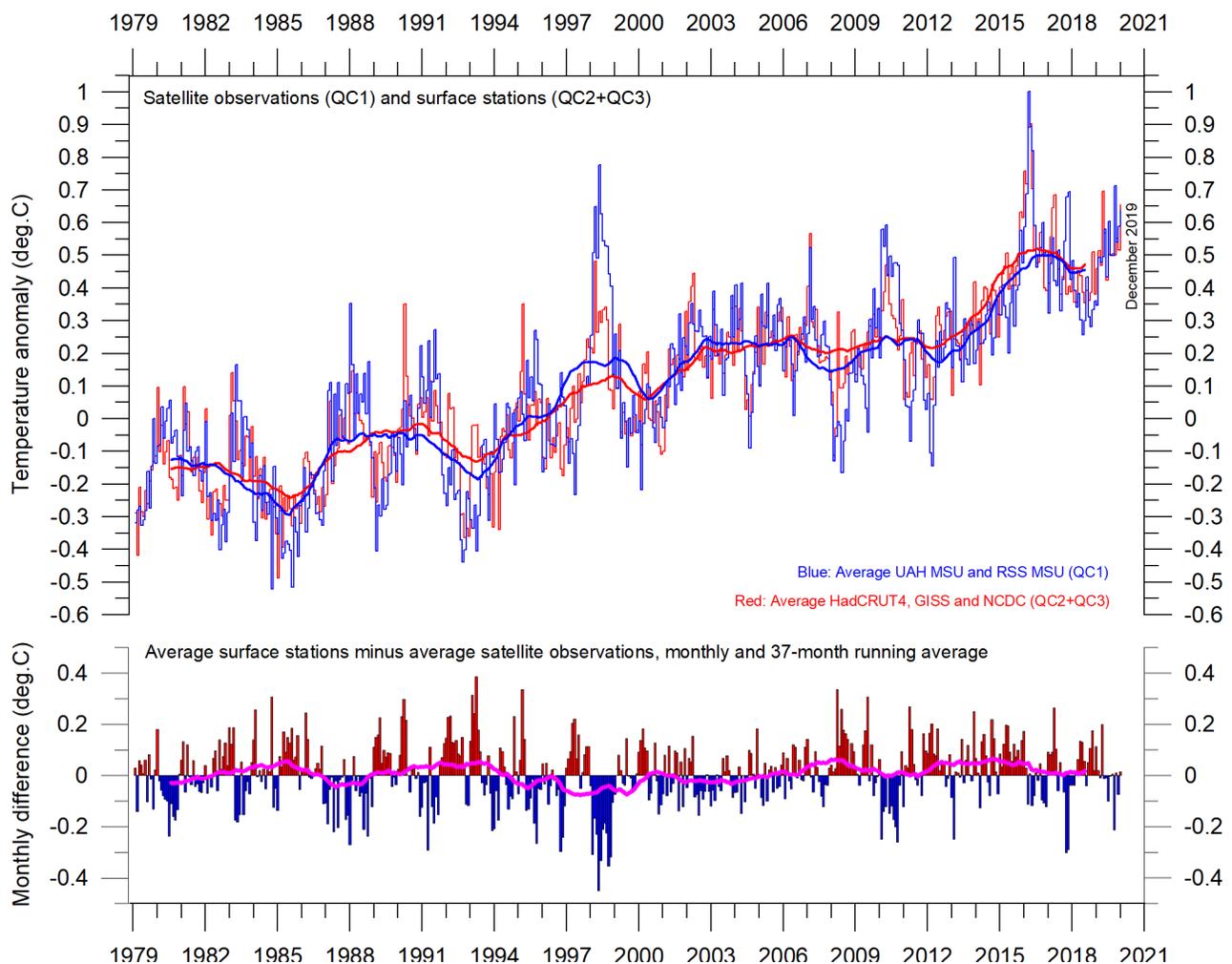


Figure 9 : Températures de surface versus températures de la basse troposphère

Graphique montrant la moyenne des estimations mensuelles de la température de l'air à la surface de la planète (HadCRUT, NCDC et GISS) et les estimations de la température par satellite dans la basse troposphère (UAH et RSS). Les lignes fines indiquent la valeur mensuelle, tandis que les lignes épaisses représentent la moyenne mobile sur 37 mois. Le panneau inférieur montre la différence mensuelle entre la température de l'air de surface et les températures des satellites. La période de base étant différente pour les différents jeux de température, elles ont toutes été normalisées en les comparant à la valeur moyenne des 30 années de janvier 1979 à décembre 2008

Températures de la basse troposphère : au dessus des continents et des océans

Depuis 1979, la basse troposphère s'est réchauffée beaucoup plus sur la terre que sur les océans (figure 10). Les raisons possibles de cette différence sont les variations du rayonnement solaire entrant, celles de couverture nuageuse et les changements dans l'utilisation des terres.

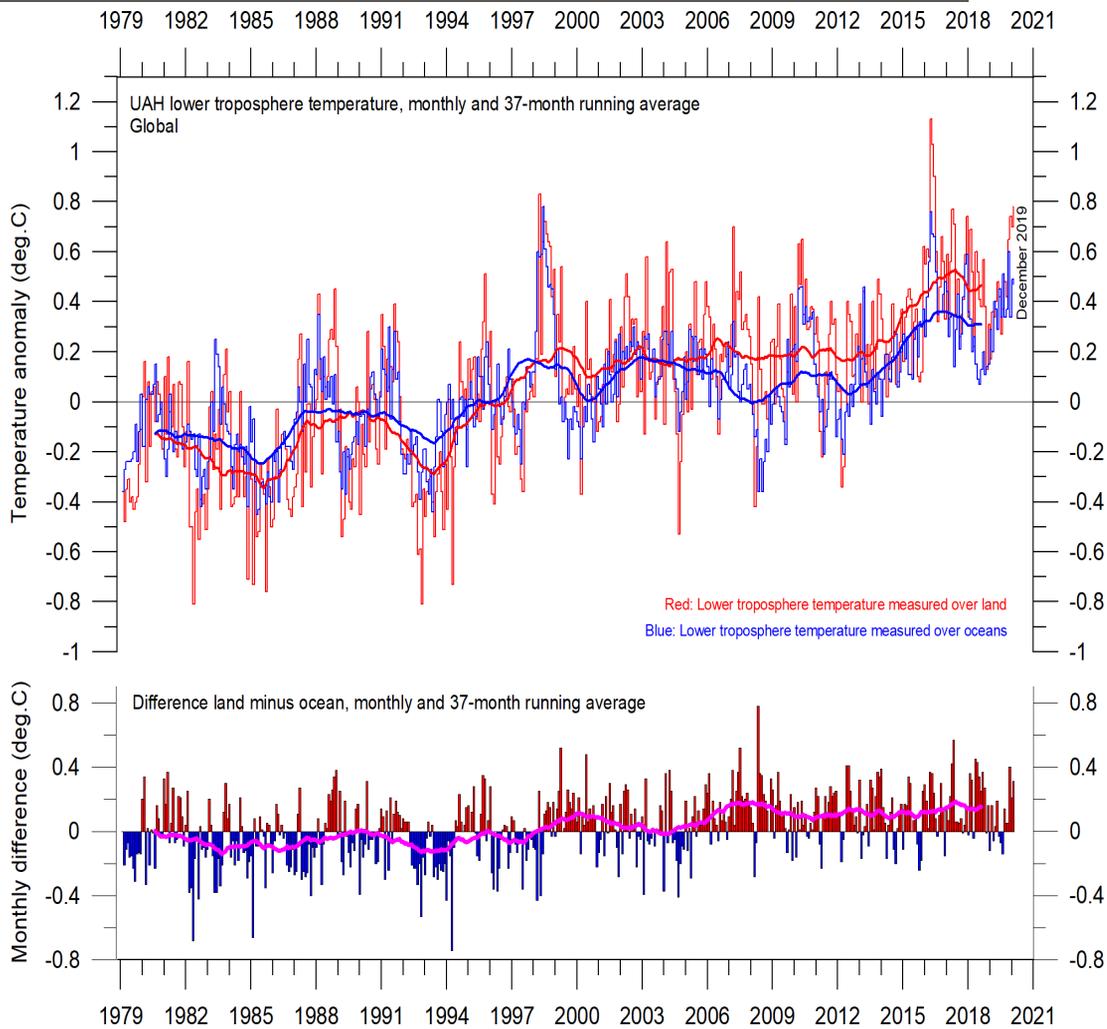


Figure 10: Basse troposphère: températures au dessus des terres et des océans.

Température moyenne mensuelle de la basse troposphère depuis 1979, mesurée sur terre et sur les océans, indiquées respectivement en rouge et bleu selon l'Université de l'Alabama à Huntsville (UAH), USA. 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.

Atmosphère supérieure : selon l'altitude

Les variations de température enregistrées dans la basse troposphère se reflètent généralement à des altitudes plus élevées, jusqu'à environ 10 km (figure 11). Le plateau de température depuis environ 2002 qui est observé dans les enregistrements de la basse troposphère se retrouve également à toutes ces altitudes, tout comme l'augmentation de température induite par El Niño à partir de 2015.

À haute altitude, près de la tropopause, le mode de variation enregistré plus bas dans l'atmosphère peut encore être reconnu, mais sur la durée de l'enregistrement (depuis 1979), il n'y a pas de tendance claire montrant un réchauffement ou un refroidissement.

Plus haut dans la stratosphère (17 km d'altitude), deux pics de température prononcés sont visibles avant le début du siècle. Les deux peuvent être liés à des éruptions volcaniques majeures, comme indiqué dans le diagramme. Si l'on ignore ces pics, jusqu'en 1995 environ, les enregistrements des températures stratosphériques montrent un déclin persistant, attribué par divers scientifiques à l'effet de la chaleur piégée par le dioxyde de carbone dans la troposphère ci-dessous.

Cependant, la baisse marquée de la température stratosphérique se termine vers 1995-1996. Depuis lors, il y a eu un long plateau de températures. Ainsi, la « pause » de température stratosphérique a commencé 5 à 7 ans avant le début d'une « pause » similaire dans la basse troposphère. Depuis 2015, à peu près en même temps que l'augmentation de la température troposphérique induite par El Niño, une petite baisse de température s'est produite dans la stratosphère.

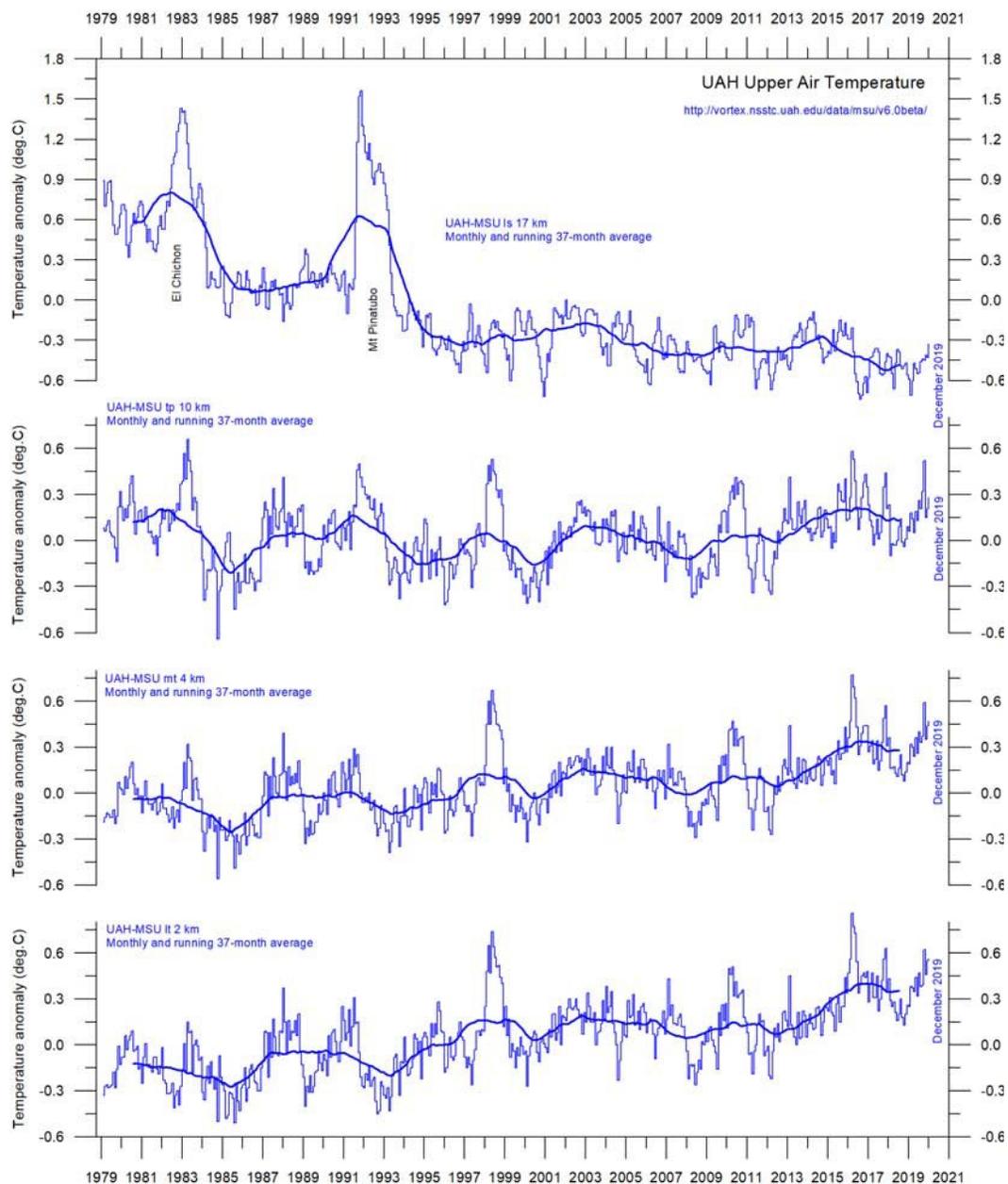


Figure 11 : Températures en fonction de l'altitude. Température moyenne mensuelle mondiale à différentes altitudes selon l'Université de l'Alabama à Huntsville (UAH), USA. Les lignes fines représentent la moyenne mensuelle, et les lignes épaisses la moyenne mobile sur 37 mois.

Gaz à effet de serre atmosphérique

La vapeur d'eau est le gaz à effet de serre le plus important de la troposphère. La concentration la plus élevée se trouve entre les latitudes 50°N à 60°S. Les deux régions polaires de la troposphère sont relativement sèches.

La figure 12 montre que l'humidité atmosphérique spécifique est stable ou en légèrement augmentation jusqu'à environ 4 à 5 km d'altitude. À des niveaux plus élevés dans la troposphère (environ 9 km), l'humidité spécifique a diminué pendant la durée des mesures (depuis 1948), mais avec des variations plus courtes superposées à cette tendance à la baisse. Une analyse de fréquence de Fourier (non présentée ici) montre que ces variations sont particulièrement influencées par une variation périodique d'une durée d'environ 3,7 ans.

Il convient de noter la diminution persistante de l'humidité spécifique à environ 9 km d'altitude, car cette altitude correspond à peu près au niveau auquel l'effet théorique sur la température d'une augmentation du dioxyde de carbone atmosphérique devrait initialement se produire.

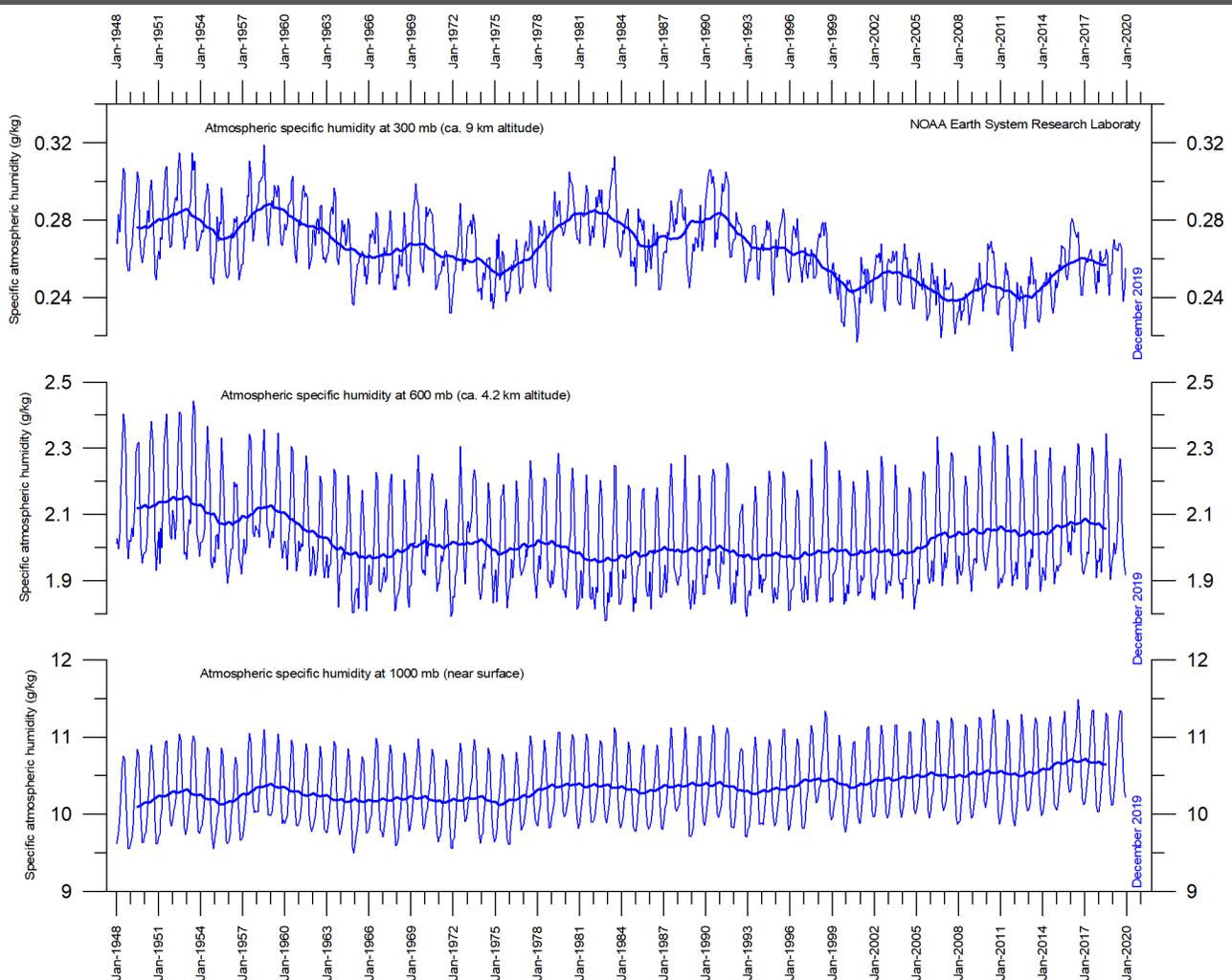


Figure 12 : Humidité. Humidité atmosphérique spécifique (g / kg) à trois altitudes différentes dans la troposphère depuis janvier 1948. Les lignes fines indiquent les valeurs mensuelles, tandis que les lignes épaisses indiquent la moyenne mobile sur 37 mois (environ 3 ans). Source de données : *Earth System Research Laboratory* (NOAA).

Le dioxyde de carbone (CO₂) est un gaz à effet de serre important, bien que moins important que la vapeur d'eau. Pour la durée de l'enregistrement (depuis 1958), une tendance à la hausse est clairement visible, avec un cycle annuel superposé. Fin 2019, la quantité de CO₂ atmosphérique était proche de 410 ppm (figure 13). Le dioxyde de carbone est généralement considéré comme un gaz relativement bien mélangé dans la troposphère.

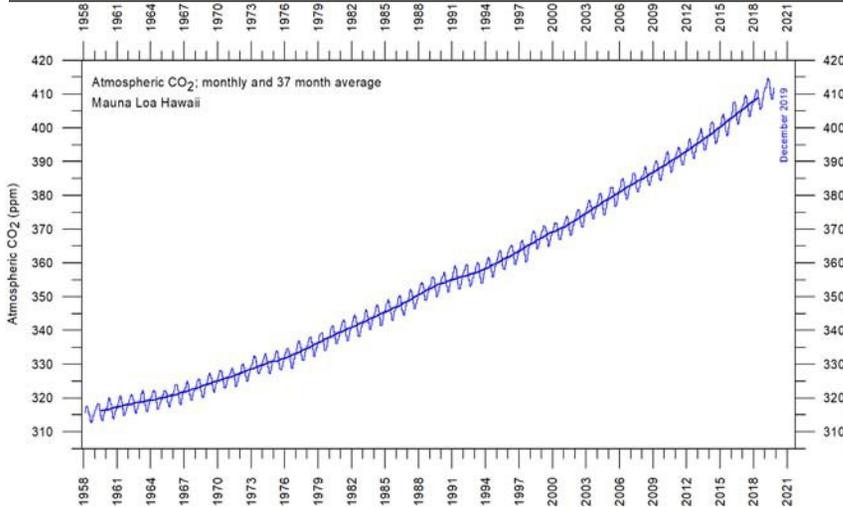


Figure 13: concentration en CO₂.

Evolution mensuelle de la concentration de CO₂ atmosphérique depuis mars 1958, mesuré à l'observatoire de Mauna Loa (Hawaï). La ligne fine représente les valeurs mensuelles tandis que la ligne épaisse représente la moyenne mobile sur 37 mois.

La variation annuelle du CO₂ troposphérique a augmenté, passant d'environ 1 ppm (partie par million) par an au début de l'enregistrement à plus de 2,5 ppm par an vers la fin. (figure 14). Une transformation de Fourier (non présentée ici) montre que la variation annuelle du CO₂ troposphérique est influencée par des variations périodiques d'une durée de 2,5 et 3,8 ans.

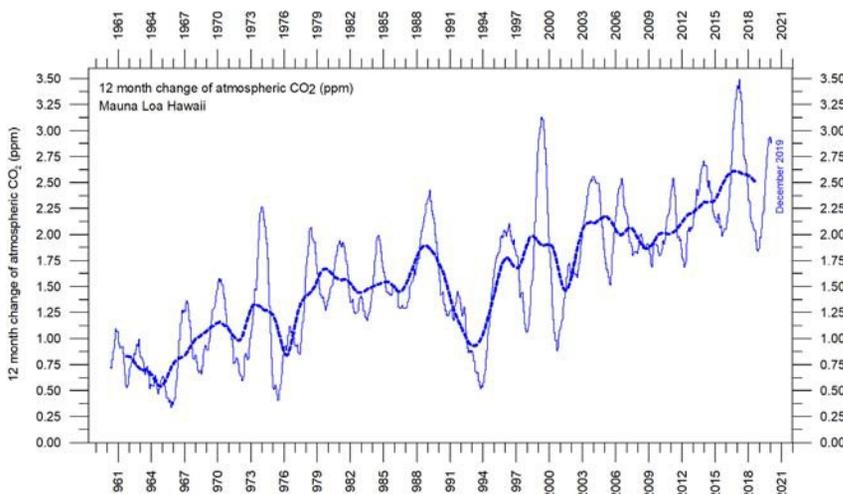


Figure 14 : Croissance de la concentration de CO₂.

Taux de croissance annuel (ppm) du CO₂ atmosphérique (ppm) depuis 1959, calculé comme la quantité moyenne de CO₂ atmosphérique au cours de 12 derniers mois, moins la moyenne des 12 mois précédents. Le graphique est basé sur des données mesurées à l'observatoire de Mauna Loa, Hawaï. La fine ligne bleue montre la valeur calculée mois par mois, tandis que la ligne bleue en pointillés représente la moyenne mobile sur 3 ans.

Il est intéressant d'étudier la variation du taux de variation annuel du CO₂ atmosphérique ainsi que les taux de variation annuelle des températures mondiales de l'air et de la surface de la mer (figure 15). Les trois taux varient clairement de concert, mais avec des températures de surface de la mer qui dominent, quelques mois avant la température mondiale et 11 à 12 mois avant les taux de changement de l'atmosphère.

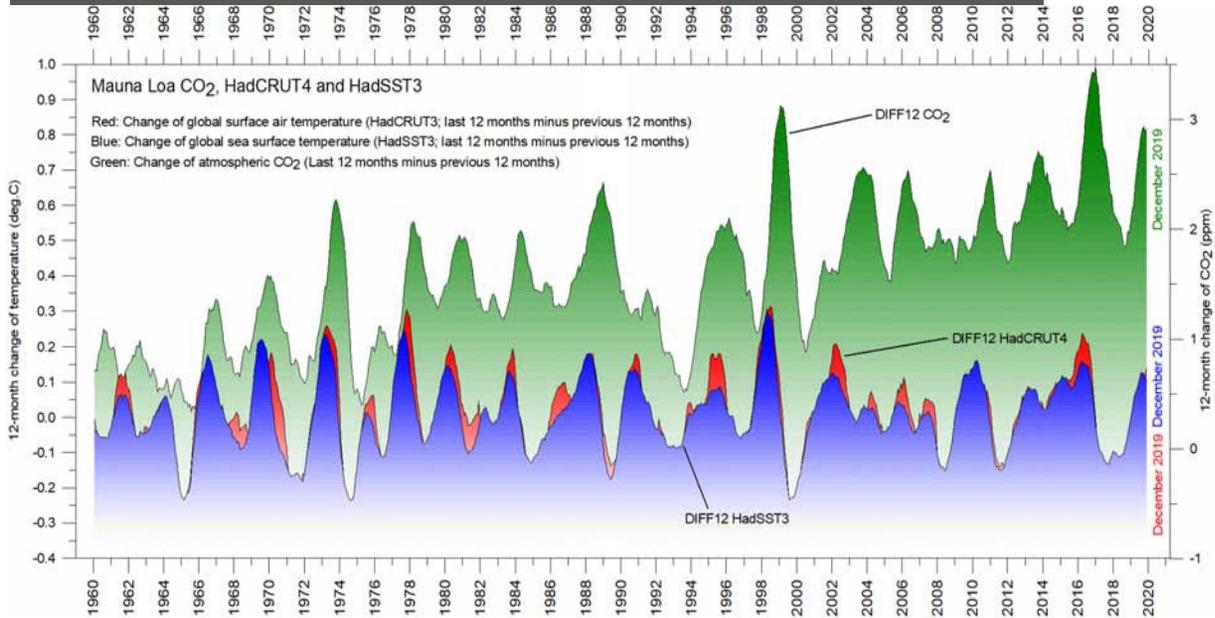


Figure 15: CO₂ et températures.

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

La figure 16 montre l'association visuelle entre le changement annuel du CO₂ atmosphérique et les épisodes de La Niña et El Niño, mettant l'accent sur l'importance de la dynamique océanographique pour comprendre les changements dans du CO₂ atmosphérique.

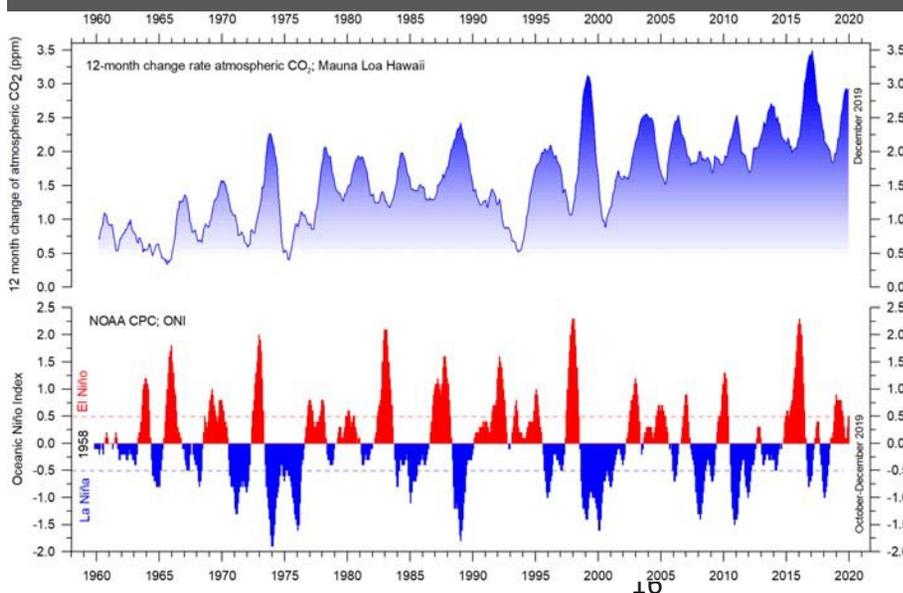


Figure 16 : CO₂ and El Niño.

Association visuelle entre le taux de croissance annuel du CO₂ dans l'atmosphère (panneau supérieur) et l'Indice Océanique Niño (panneau inférieur). Voir également les figures 14 et 15. **Figure 11 : Températures en fonction de l'altitude**

Températures de la basse troposphère par latitude

La figure 17 montre que le réchauffement mondial connu après 1980 a concerné principalement l'hémisphère Nord, et qu'il s'est surtout manifesté par un changement marqué entre 1994 et 1999. Ce changement de température apparemment rapide a cependant été influencé par l'éruption du volcan Pinatubo de 1992-1993 et l'épisode El Niño de 1997. La figure révèle également comment les effets sur la température des El Niños équatoriaux (forts en 1997 et 2015-2016, modéré en 2019) se sont apparemment propagés à des latitudes plus élevées dans les deux hémisphères, bien qu'avec un certain retard. Cet effet de température El Niño a été principalement observé dans l'hémisphère Nord.

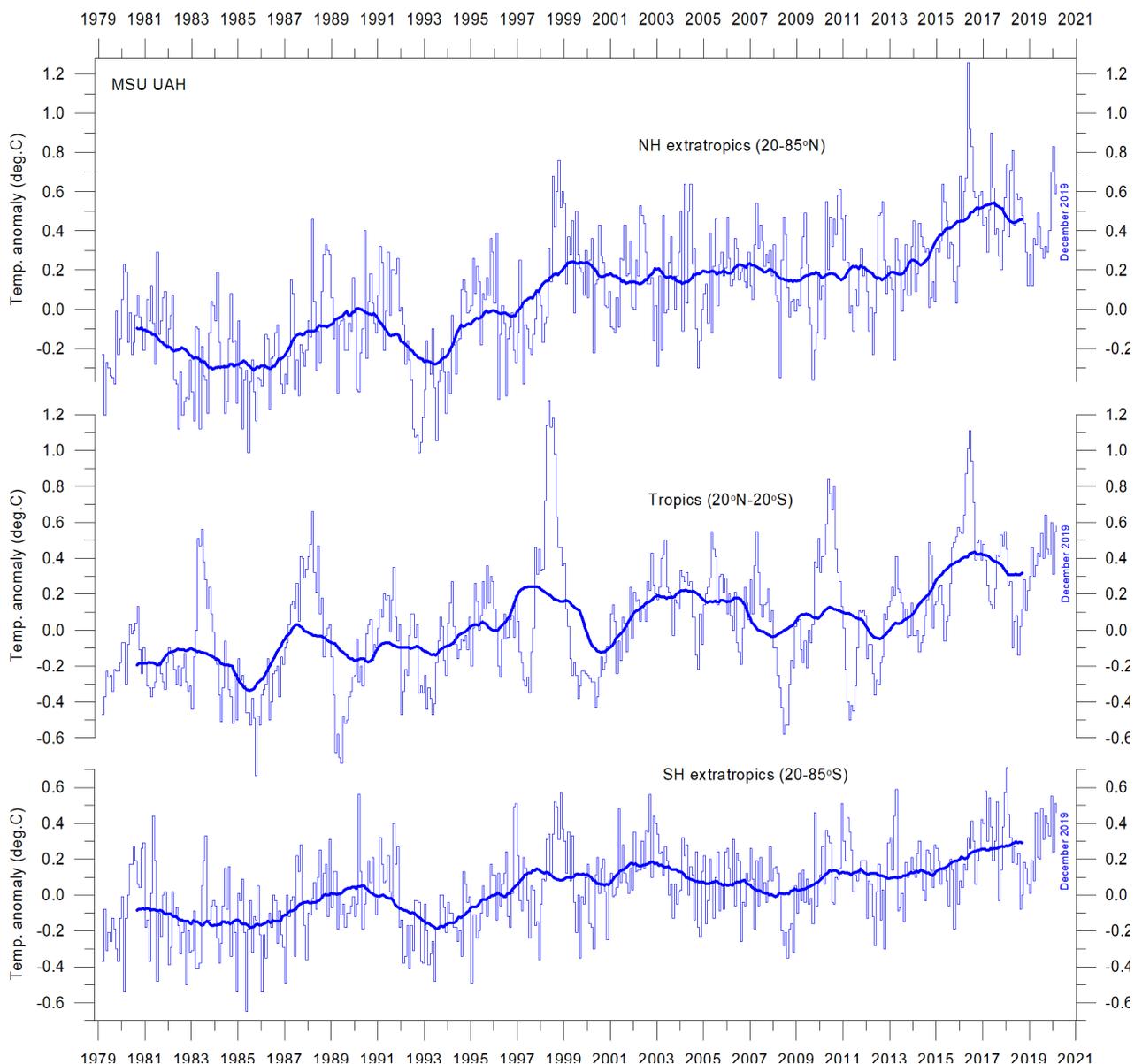


Figure 17: Températures de l'air par zone : Température mensuelle moyenne de la basse troposphère depuis 1979 pour les régions tropicales extra-tropicales du nord et du sud, selon l'UAH. Les lignes épaisses représentent la moyenne courante sur 37 mois.

Températures de la basse troposphère : aux pôles

Dans l'Arctique, le réchauffement s'est principalement produit entre 1994 et 1996, moins par la suite (figure 18). En 2016, cependant, les températures ont culminé pendant plusieurs mois, vraisemblablement en raison de la chaleur océanique émise dans l'atmosphère pendant le El Niño 2015-2016 (voir également la figure 16), puis dirigée vers des latitudes plus élevées. Une baisse de la température caractérise l'Arctique depuis 2016.

En Antarctique, les températures sont restées presque stables depuis le début mesures par satellite en 1979. On observe dans les données mensuelles un petit pic de température en 2016-2017 vraisemblablement dû à l'effet atténué du récent épisode El Niño.

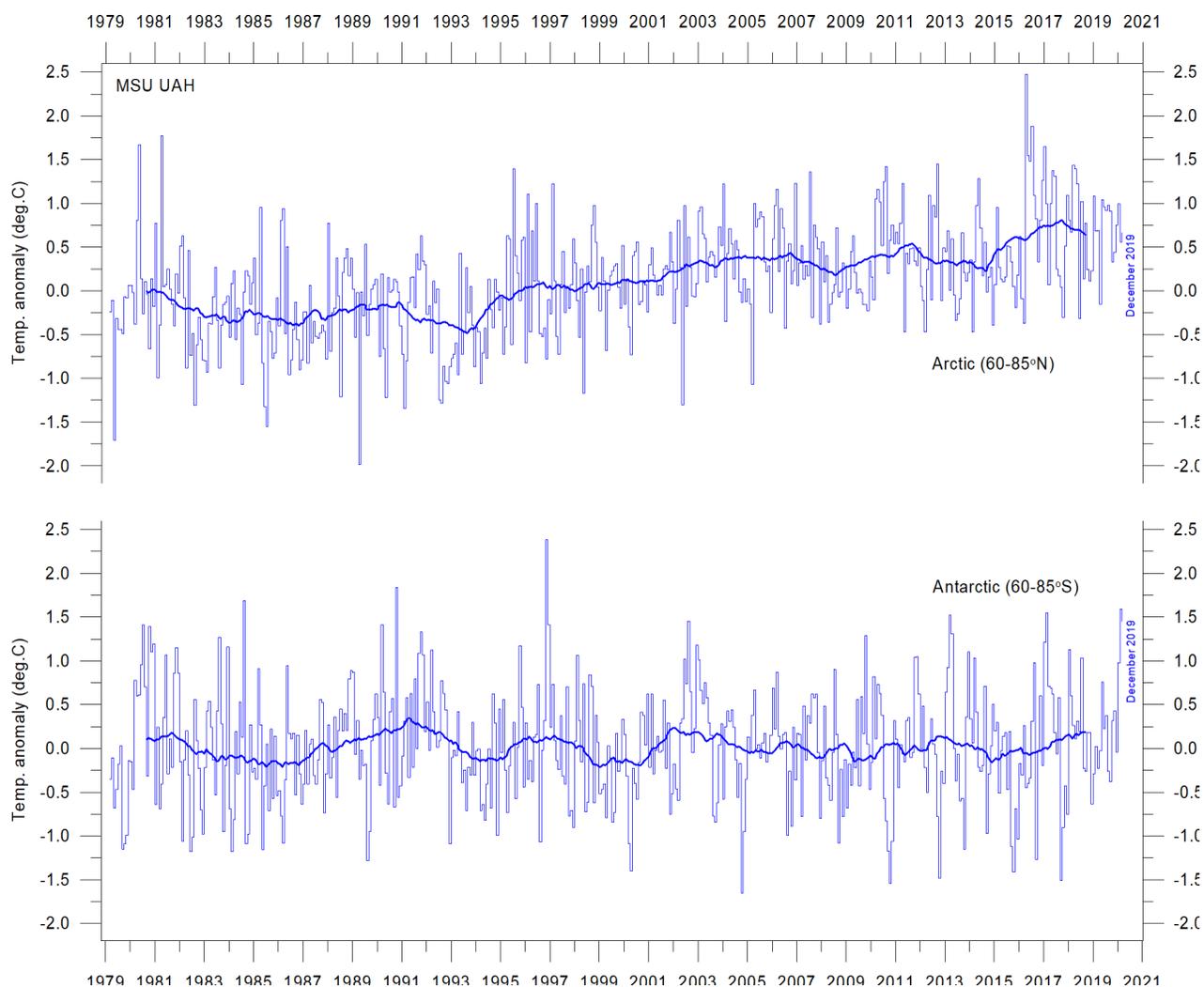


Figure 18 : Températures de la troposphère aux pôles : Température moyenne mensuelle de la basse troposphère depuis 1979 pour les régions du Pôle Nord et du Pôle Sud, selon l'UAH. Les lignes épaisses représentent la moyenne mobile sur 37 mois.

3. Océans

Températures de surface : configuration spatiale des années récentes

La figure 19 montre la configuration spatiale des températures océaniques pour les mois de décembre 2017, 2018 et 2019. Décembre 2017 a connu un faible épisode La Niña, décembre 2018 a été neutre, de même que décembre 2019, à la suite du phénomène El Niño modéré qui a caractérisé la majeure partie de l'année 2019.

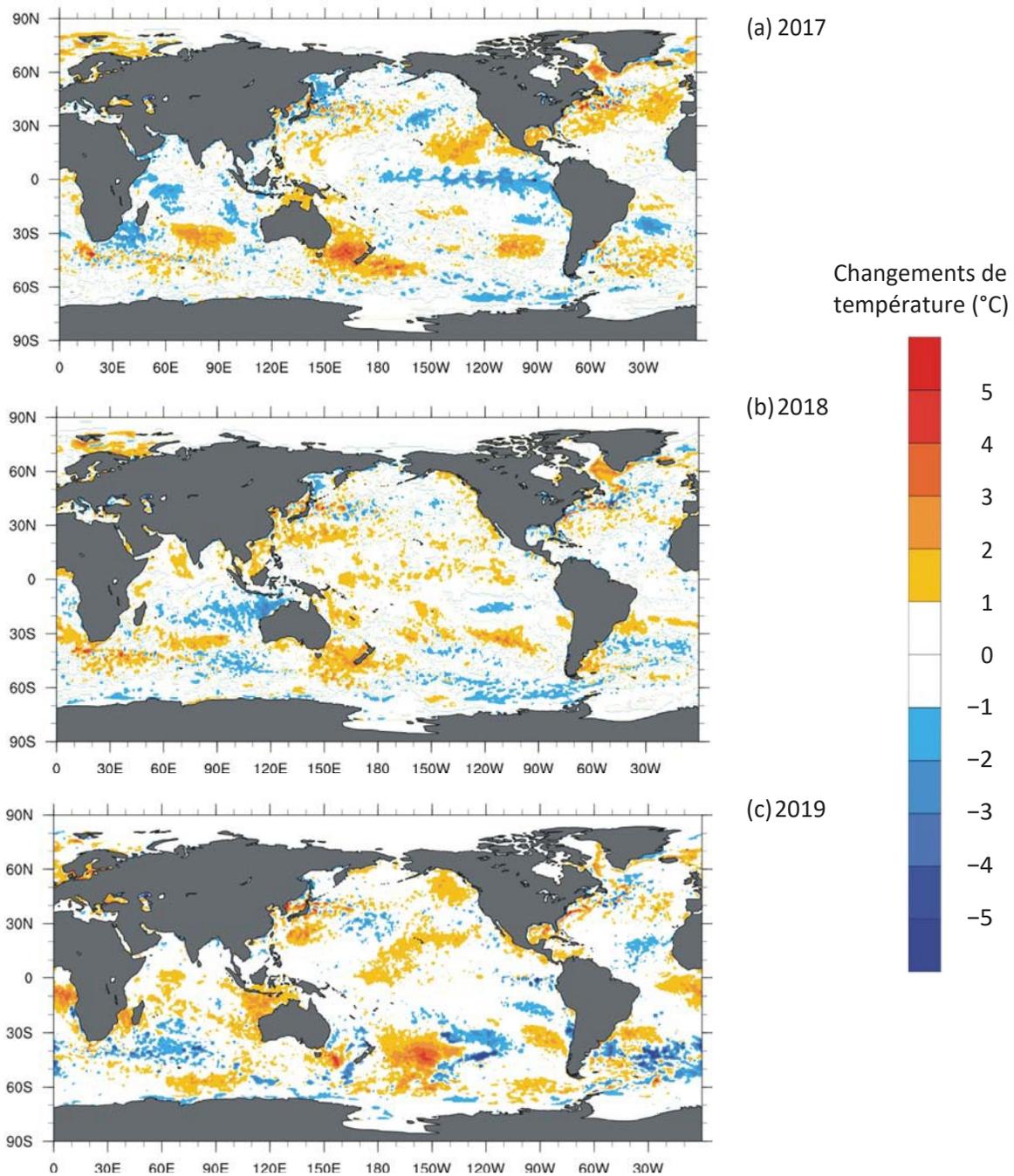


Figure 19 : Modèles spatiaux des températures de la surface de l'océan, 2017-2019. Anomalies de température de surface de la mer fin décembre 2017, 2018 et 2019. Les cartes montrent l'anomalie actuelle (écart par rapport à la normale) de la température de surface des océans. Période de référence : 1977–1991. Le gris foncé représente les zones terrestres. Source : *Plymouth State Weather Center*.

La figure 20 montre tous les épisodes El Niño et La Niña depuis 1950. Le El Niño 2015-2016 est parmi les plus forts jamais enregistrés. Cependant, si l'on considère l'ensemble des données, les alternances récentes entre les épisodes El Niño et La Niña ne semblent en aucun cas anormales.

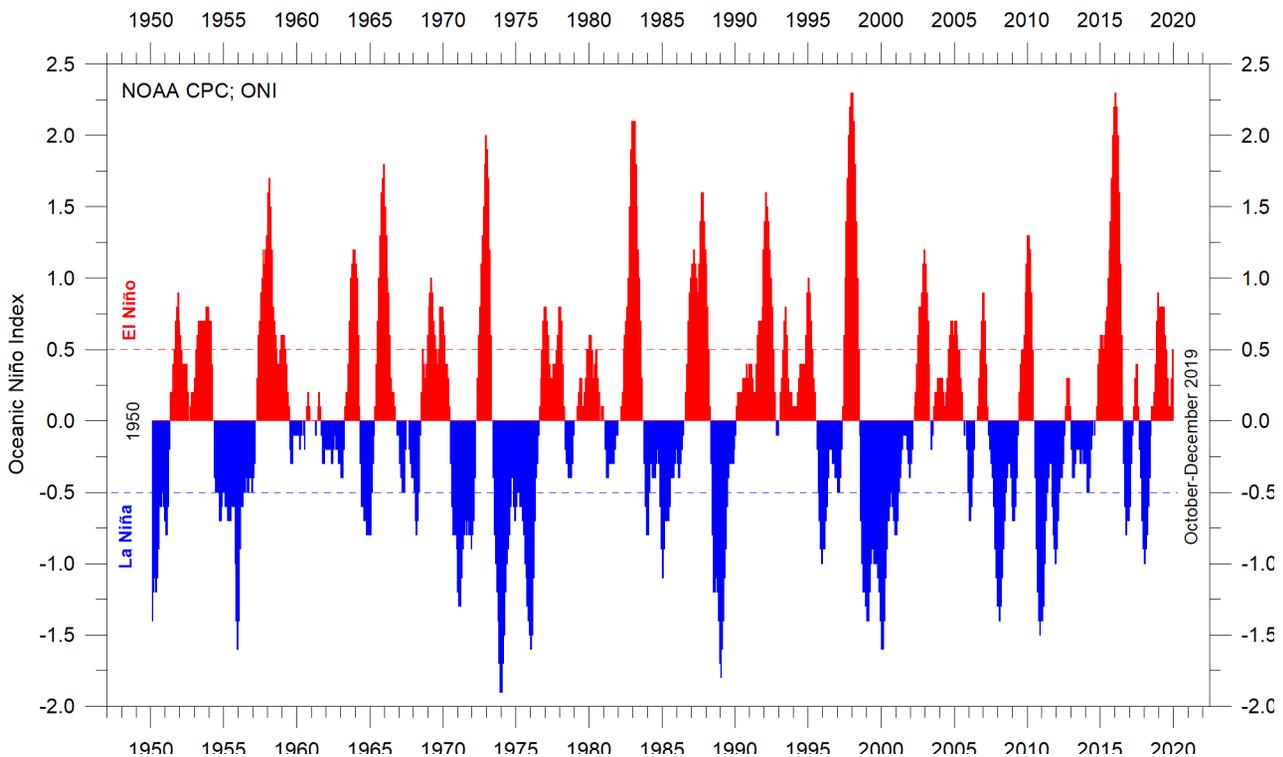


Figure 20: Épisodes chauds et froids de l'indice océanique El Niño, défini comme la moyenne mobile sur 3 mois des anomalies ERSSTv4 SST dans la région de Niño 3.4 (5° N – 5° S, 120° – 170° W). Les anomalies sont centrées sur des périodes de base de 30 ans mises à jour tous les 5 ans.

Températures moyennes à 1900 m de profondeur, par région

Basée sur les observations des flotteurs Argo [2], la figure 21 montre qu'en moyenne, la température des océans jusqu'à une profondeur de 1900 m a augmenté depuis 2011. Elle montre également que depuis 2013, cette augmentation s'est principalement manifestée par des changements près de l'Équateur, entre 30°N et 30°S. En revanche, pour les océans circumarctiques au nord de 55°N, les températures océaniques intégrées en profondeur diminuent depuis 2011. Près de l'Antarctique, au sud de 55°S, les températures sont globalement stables. Sous la plupart des latitudes, un rythme annuel clair est observé.

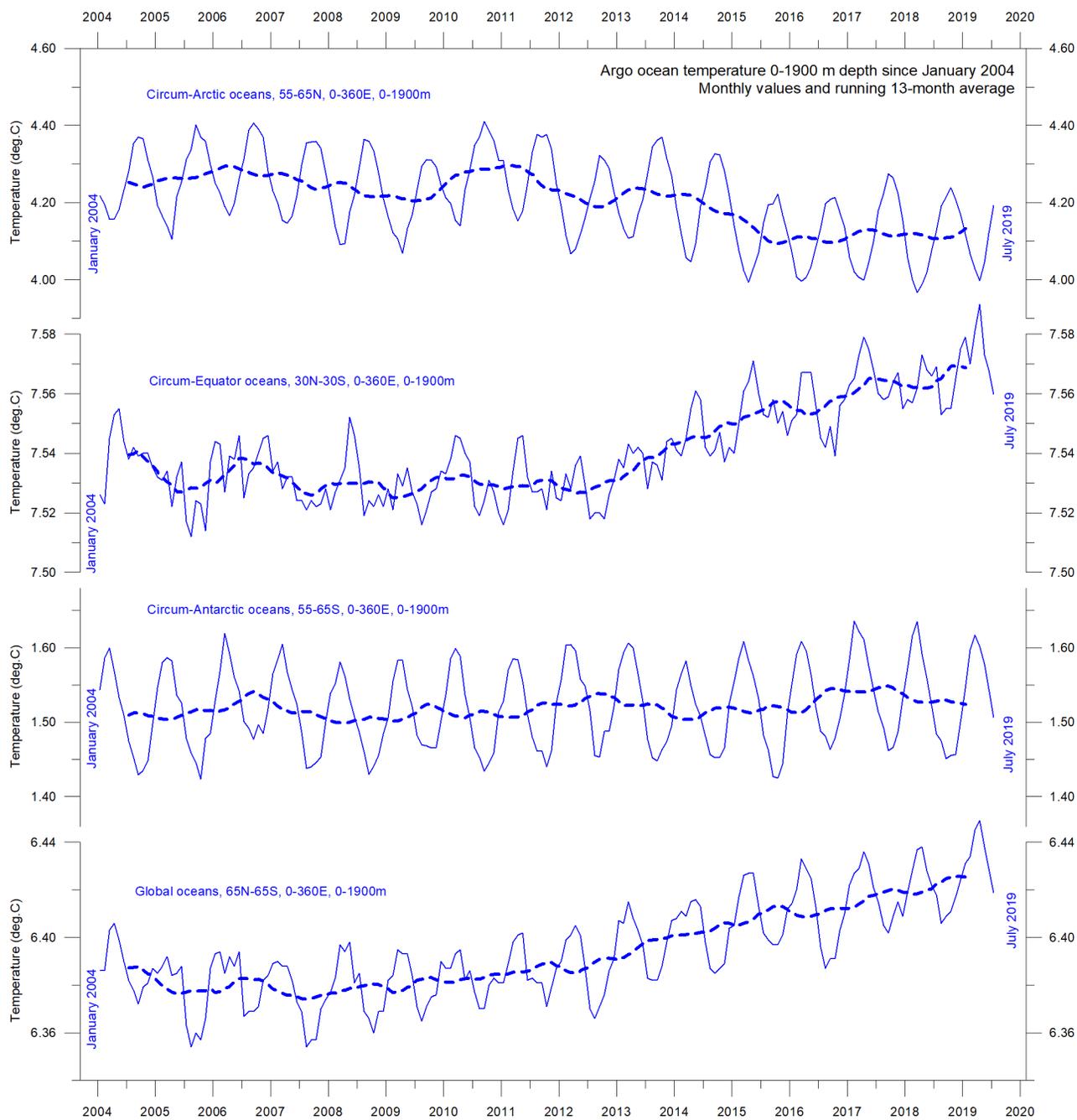


Figure 21 : Températures moyennes de l'océan dans certaines bandes latitudinales. Températures moyennes de l'océan de janvier 2004 à juillet 2019 à une profondeur de 0 à 1 900 m dans certaines bandes latitudinales. La ligne mince indique les valeurs mensuelles et la ligne épaisse pointillée indique la moyenne mobile sur 13 mois. Source : *Global Marine Argo Atlas*.

Températures moyennes à différentes profondeurs

La figure 22 montre les températures moyennes mondiales de l'océan à différentes profondeurs. Une tendance annuelle peut être observée, jusqu'à environ 100 m de profondeur. Dans les 100 m les plus élevés, les températures ont augmenté depuis 2011. Pour une profondeur de 200 à 400 m, les températures ont peu varié pendant la période d'observation.

Cependant, pour des profondeurs inférieures à 400 m, les températures semblent à nouveau augmenter. Il est intéressant de noter que le diagramme suggère que cette augmentation a commencé pour la première fois à 1900 m de profondeur vers 2009, puis s'est progressivement étendue vers le haut. À 600 m de profondeur, l'augmentation de la température a commencé vers 2012, soit 3 ans après avoir été constatée à 1900 m. Le moment de ces changements montre que les températures moyennes dans les 1900 mètres supérieurs des océans sont non seulement influencées par les conditions qui se produisent à la surface de l'océan ou à proximité, mais aussi par des processus opérant à des profondeurs supérieures à 1900 mètres.

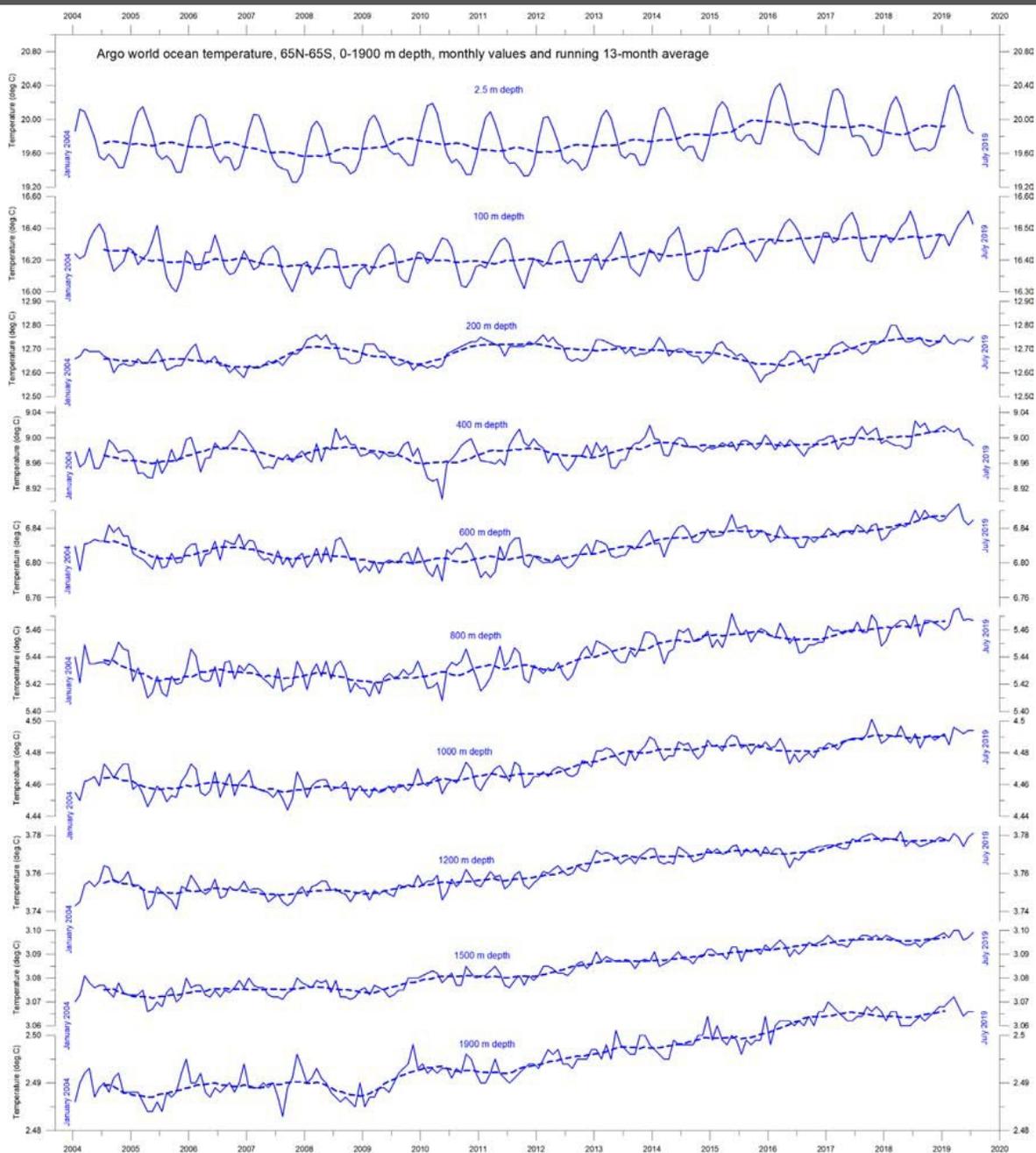


Figure 22. Températures mondiales de l'océan à différentes profondeurs. Températures mondiales de l'océan de janvier 2004 à juillet 2019 à différentes profondeurs entre 65°N et 65°S. La ligne mince montre les valeurs mensuelles et la ligne pointillée montre la moyenne mobile sur 13 mois. Source :

Global Marine Argo Atlas

Ainsi, une partie du réchauffement océanique actuel semble être due à des phénomènes de circulation intervenant dans les profondeurs des océans ; ils ne sont pas directement liés aux processus opérant à la surface ou à proximité.

Cela est également montré par la figure 23, qui fait apparaître que le changement net des températures mondiales de l'océan à différentes profondeurs, calculé comme la différence entre les moyennes sur 12 mois des périodes janvier-décembre 2004 et août 2018- juillet 2019, respectivement. Les changements nets les plus importants se sont produits dans les 200 mètres supérieurs. Cependant, les valeurs moyennes cachent également de nombreux détails régionaux, comme le montre la figure 24.

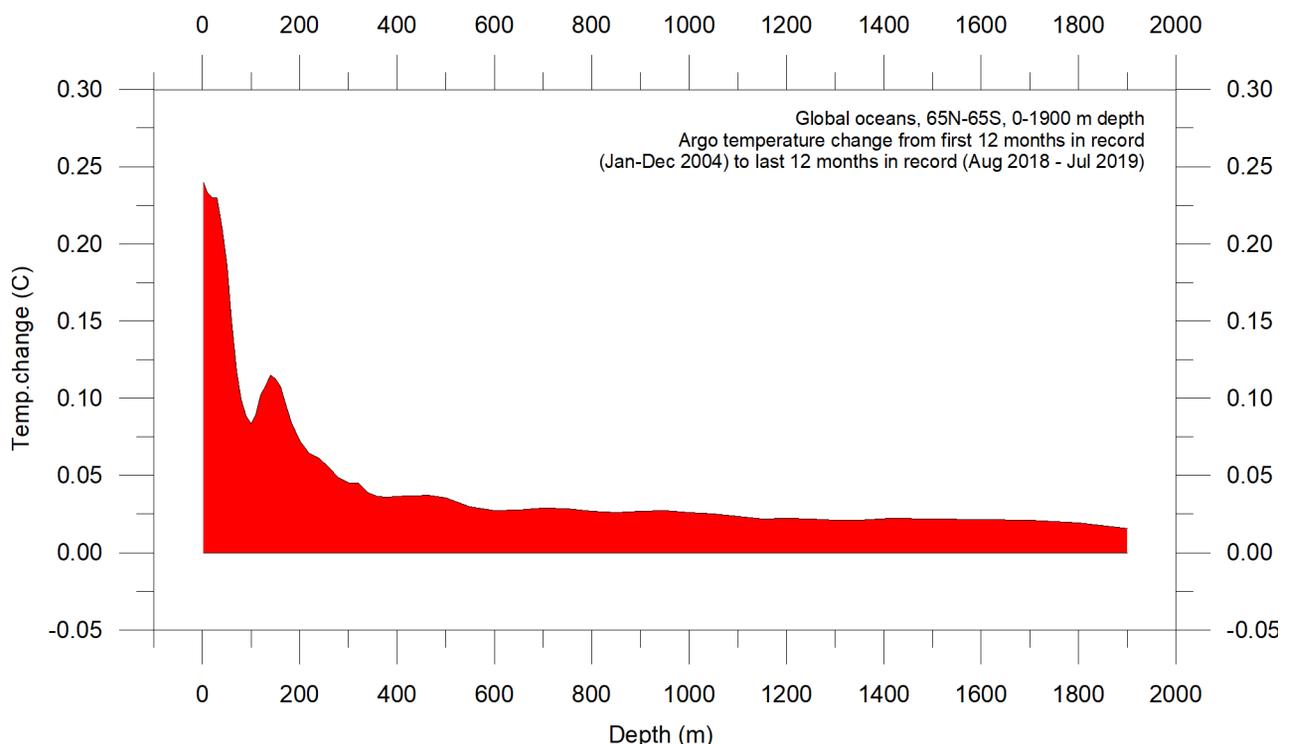


Figure 23: Changements nets dans les températures globales des océans depuis 2004 de la surface à 1900 mètres de profondeur (Source: Global Marine Argo Atlas).

Températures régionales de la couche 0-1900 mètres : évolution 2004–2019

La figure 24 montre les variations latitudinales des changements nets de température océanique, de janvier-décembre 2004 par rapport à la période août 2018-juillet 2019, pour différentes profondeurs, calculées comme dans le diagramme précédent. Les trois panneaux montrent la variation nette pour les océans Arctique (55-65°N), les océans équatoriaux (30N-30° S) et les océans Antarctique (55– 65°S), respectivement. Le réchauffement de la surface de la planète, illustré à la figure 23, affecte l'océan équatorial et antarctique, mais pas les océans arctiques (figure 24). En fait, le refroidissement net est prononcé jusqu'à 1400 m de profondeur pour les océans du Nord.

Cependant, la majeure partie des zones terrestres de la planète se trouve dans l'hémisphère Nord, de sorte que la superficie (et le volume) des océans de l'Arctique est beaucoup plus petite que celle de l'Antarctique qui à son tour est plus petit que les océans équatoriaux. En fait, la moitié de la surface de la planète (terre et océan) est située entre 30°N et 30°S. Néanmoins, le contraste de la variation nette de température entre 2004 et 2019 pour les différentes bandes latitudinales est instructif. Pour les deux océans polaires, les données d'Argo semblent démontrer l'existence d'une balançoire bipolaire, un phénomène qui a été décrit par *Chylek et al* en 2010. Il est aussi intéressant de constater que les températures océaniques proches de la surface dans les deux océans polaires contrastent avec les tendances de la banquise dans les deux régions polaires (voir section 6).

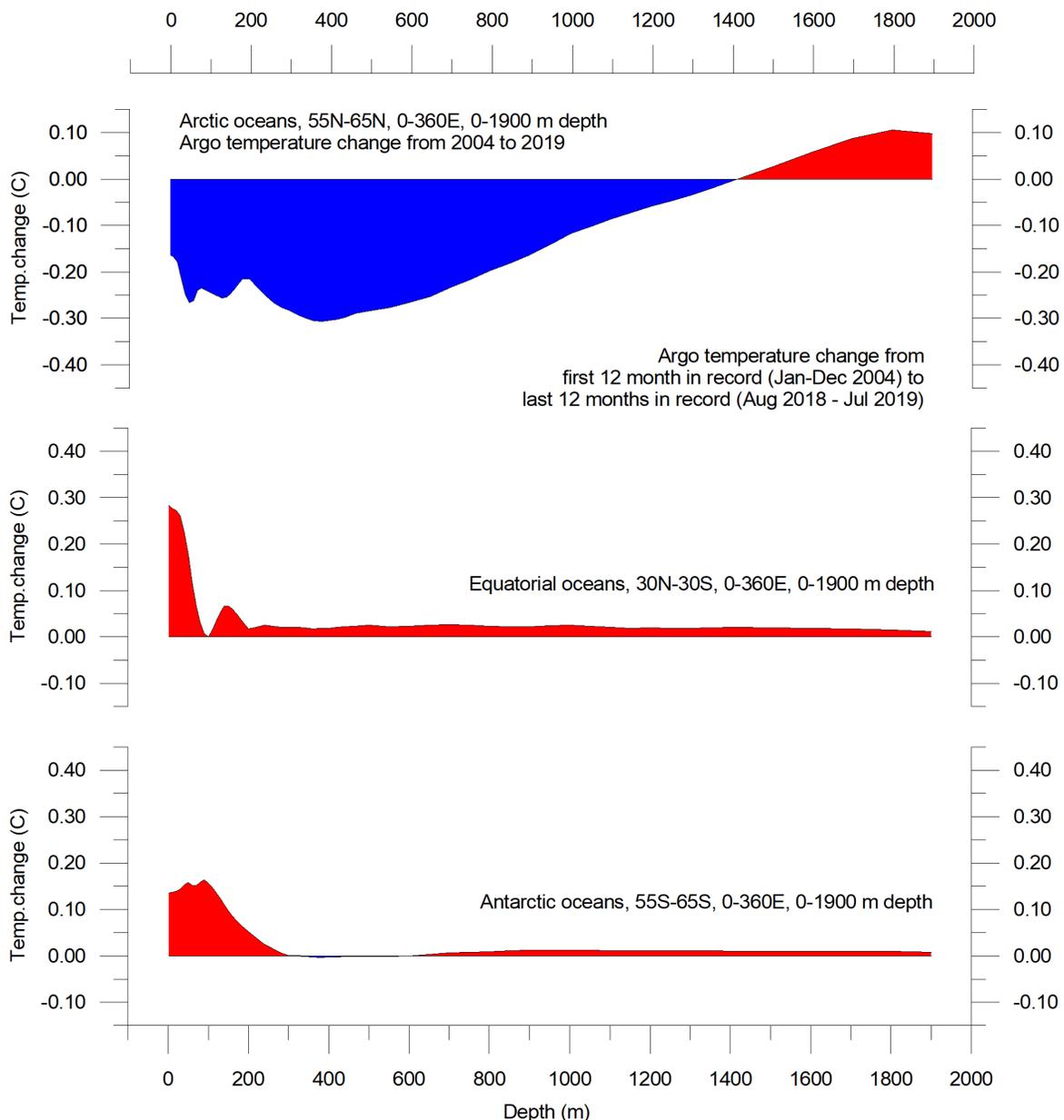


Figure 24: Variation nette de température depuis 2004 de la surface à 1900 m de profondeur dans différentes parties des océans mondiaux, provenant des données d'Argo. Source : *Global Marine Argo Atlas*.

Changements 2004-2019 dans des zones sélectionnées

Dans cette section, je considère les changements nets de température pour la période 2004-2018/19 le long de deux transects nord-sud, l'un le long du 20° W, représentant l'océan Atlantique, et l'autre le long du 150°W, représentant le Pacifique. (En passant, je regarde également un court transect est-ouest, représentant le courant de l'Atlantique Nord.) Les emplacements des transects sont illustrés à la figure 25 et les changements de température aux figures 26 à 28. Pour élaborer ce dernier, les températures moyennes des océans sur 12 mois pour les périodes janvier-décembre 2018 et août 2018-juillet 2019 ont été comparées aux températures moyennes annuelles pour 2004, ce qui représente les 12 premiers mois dans les enregistrements Argo. Pour donner un aperçu des changements les plus récents, la variation nette des températures moyennes sur 12 mois est indiquée pour 2004-2018 (en haut) et 2004-2018/19. Les couleurs chaudes indiquent un réchauffement net de 2004 à 2018/19 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.

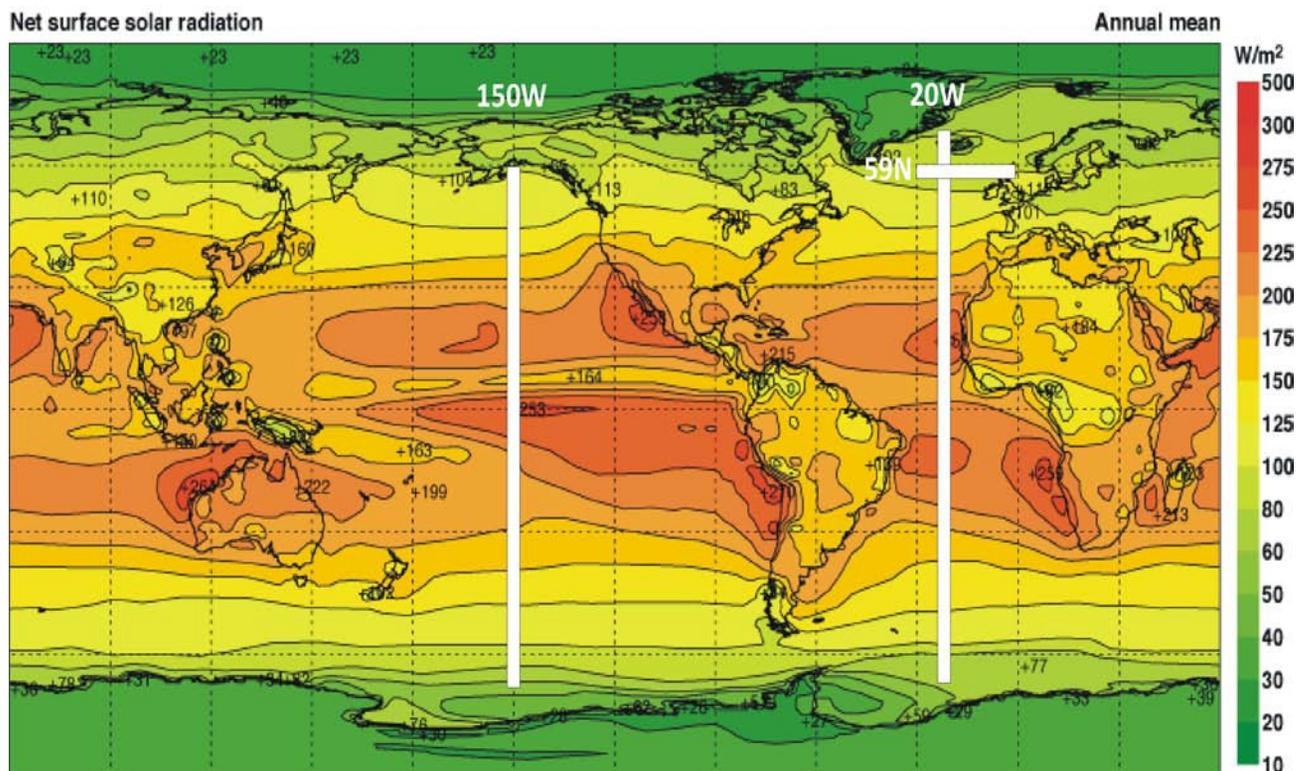
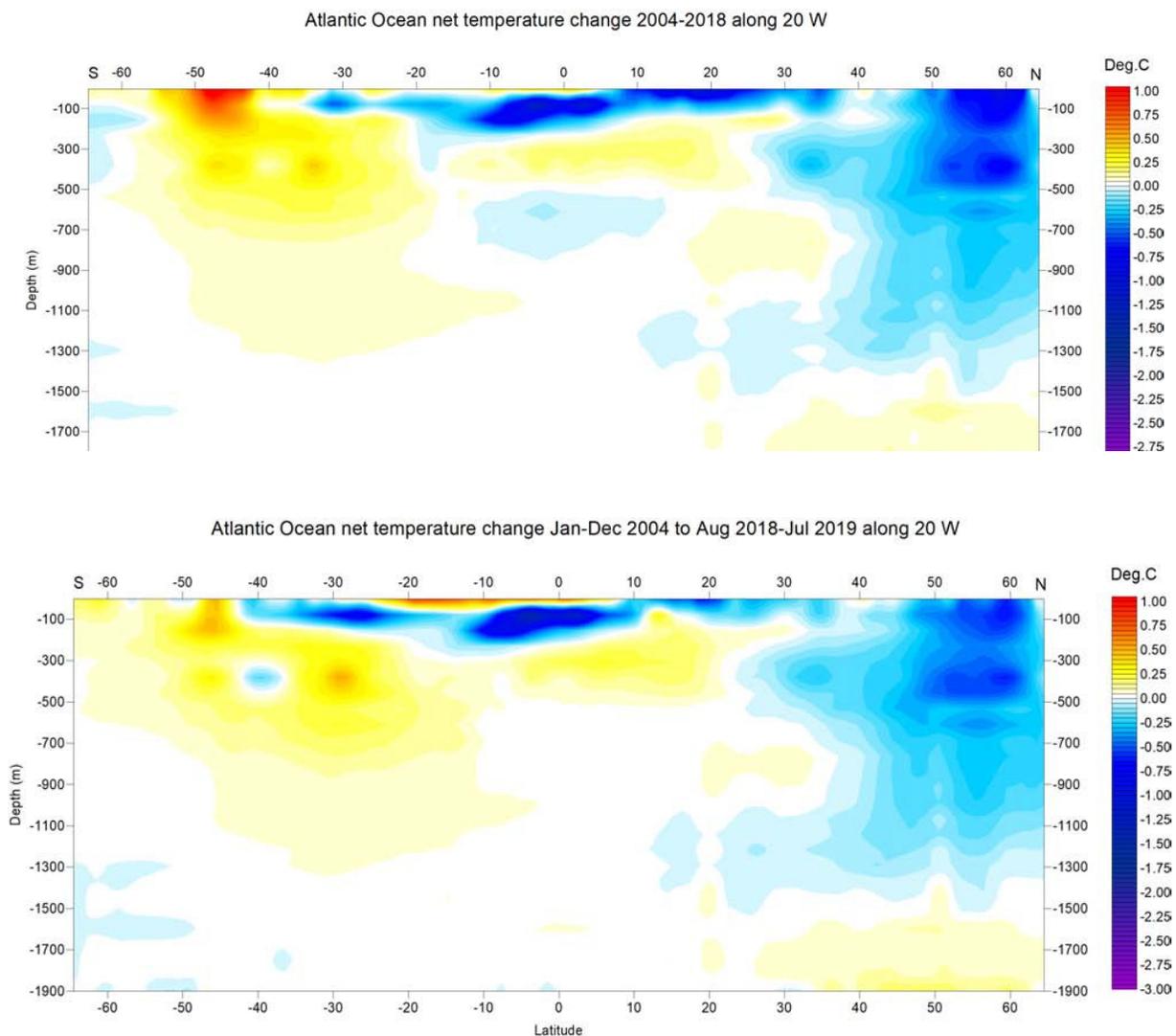


Figure 25 : Rayonnement solaire net annuel moyen en surface (W/m²) et l'emplacement de trois profils

L'Atlantique

La figure 26 révèle pour le transect atlantique plusieurs caractéristiques intéressantes, en particulier un refroidissement net accusé à la surface au nord de l'équateur, et surtout au nord de 25°N, où des couches plus profondes (jusqu'à 1500 m de profondeur) sont également impliquées. À l'équateur et au sud de celui-ci, le réchauffement domine à la surface, bien que le refroidissement domine à 50–250 m de profondeur. Le réchauffement net maximal de l'océan Atlantique au cours de cette période se situe entre 10 et 55°S, affectant principalement des profondeurs d'eau comprises entre 200 et 1100 m. Le réchauffement dans l'Atlantique Sud est en baisse par rapport au diagramme 2004-2018. De même, le refroidissement net au nord de 30°N est un peu moins prononcé en 2019 qu'en 2018.

Figure 26 (ci-dessous) : Variation nette des températures depuis 2004 de la surface à 1 900 m de profondeur à 20 ° W dans l'océan Atlantique, à l'aide des données Argo. En haut: 2004-2018, en bas: 2004-2019. Voir la figure 25 pour l'emplacement géographique du transect. Source de données : Global Marine Argo

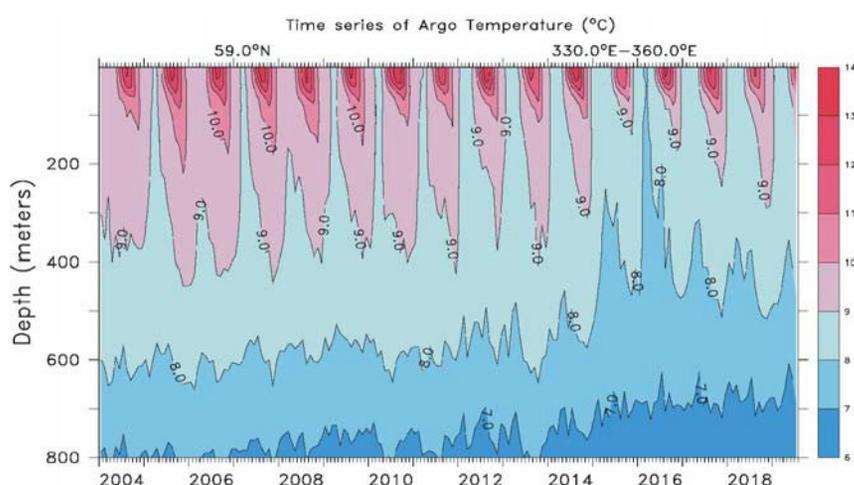


Le courant de l'Atlantique Nord

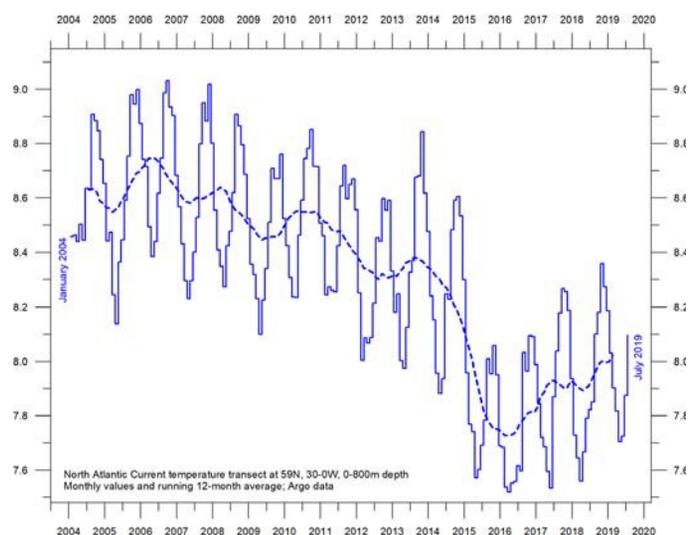
Avant de passer au transect de l'océan Pacifique, il est également intéressant de regarder le court transect le long de 59°N, qui traverse le courant de l'Atlantique Nord, juste au sud des îles Féroé (voir figure 25). Ceci est important pour le temps et le climat dans une grande partie de l'Europe. La figure 27a montre une série chronologique de 30°W à 0°W le long de cette ligne, de la surface à 800 m de profondeur. Il représente ainsi une section à travers les masses d'eau affectées par le courant de l'Atlantique Nord. Les températures océaniques supérieures à 9°C sont indiquées par des couleurs rouges.

Cette série chronologique, bien que relativement courte, présente une dynamique intéressante. L'eau chaude (au-dessus de 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. Le changement observé du pic au creux, qui se déroule sur environ 11 ans, pourrait suggérer l'existence d'une variation de température d'environ 22 ans, mais nous devons attendre que la série Argo soit un peu plus longue avant de pouvoir tirer des conclusions.

Atlas.



(a) Profils de température par profondeur



(b) Température moyenne de l'océan profondeurs intégrées

Figure 27 : Profil de température du courant Nord Atlantique Séries chronologiques janvier 2004 à juillet 2019 des températures océaniques à 59 ° N, 30 à 0 ° W, 0-800 m de profondeur, à l'aide des données d'Argo. Voir la figure 25 pour l'emplacement géographique du transect. Source: *Global Marine Argo Atlas*.

Le Pacifique

La figure 28 montre les variations nettes sur le période 2004-2018/19 le long du 150° W, représentant le Pacifique. Équivalent à la figure 26 pour l'Atlantique, élaboré de la même manière et avec les mêmes mises en garde. Une caractéristique importante de 2019 est le refroidissement net au sud de 35°S, affectant presque toutes les profondeurs d'eau jusqu'à 1900 m. Cependant, par rapport au diagramme 2004-2018, le refroidissement devient moins prononcé et moins étendu dans le diagramme 2004-2019. Le refroidissement net pour 2004-2019 est particulièrement prononcé dans deux bandes, une au nord et une au sud de l'équateur (respectivement à 25°S et 20°N), qui s'étendent toutes les deux de la surface à 500 m. Le réchauffement net de la surface se produit dans trois régions, centrées sur 50°S, l'équateur et 50°N, affectant notamment les eaux jusqu'à 500 mètres de profondeur. Ni les transects de l'Atlantique ni ceux du Pacifique ne montrent dans quelle mesure les changements nets sont causés par la dynamique des océans opérant à l'est et à l'ouest des deux profils considérés. Pour cette raison, les diagrammes ne doivent pas être surinterprétés. Les deux transects longitudinaux suggèrent cependant un contraste intéressant, l'océan Pacifique se réchauffant principalement au nord de l'équateur et se refroidissant au sud, l'inverse se produisant dans l'Atlantique.

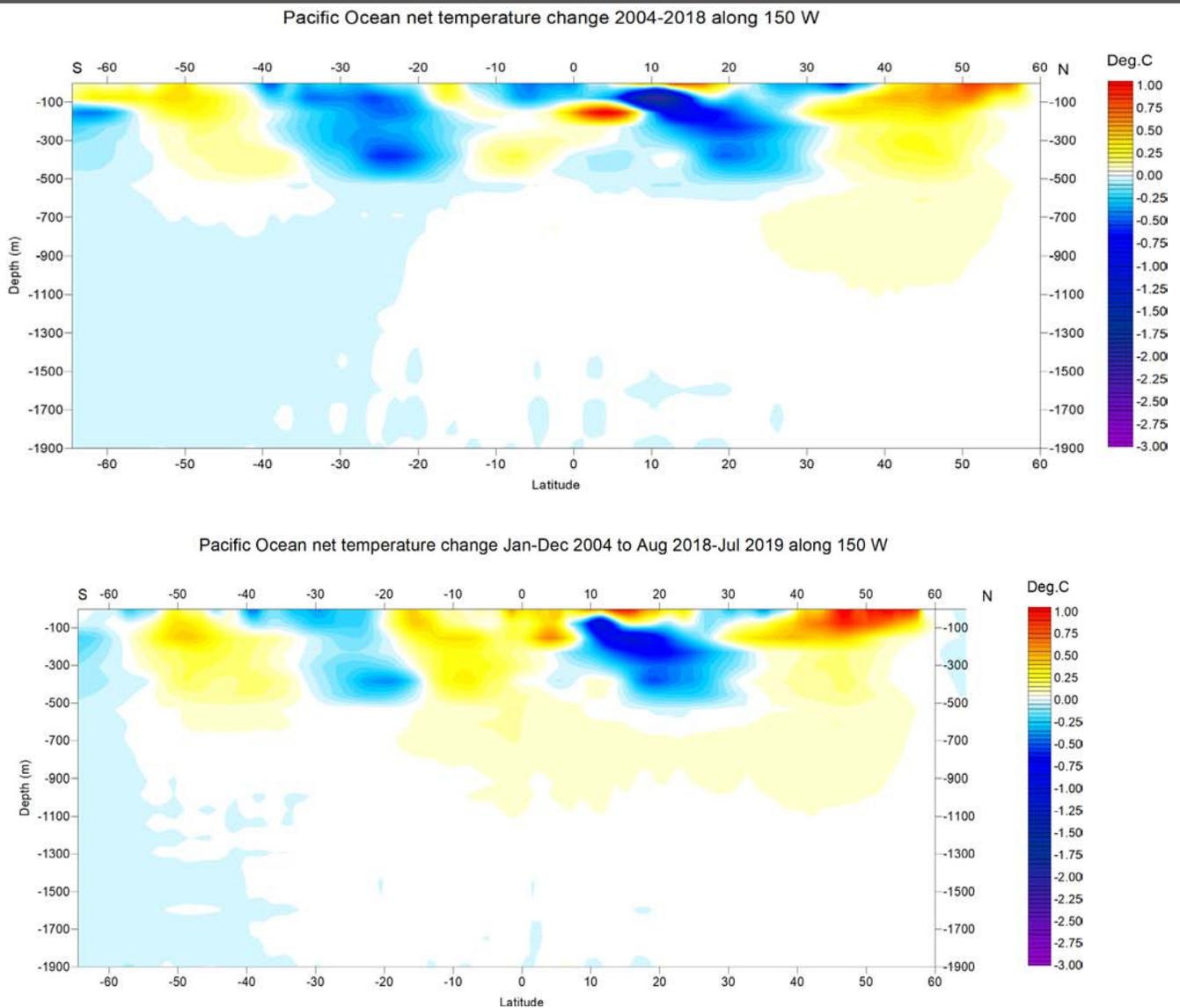


Figure 28: changement net de température depuis 2004 de la surface à 1900 mètres à 20°O dans l'Océan Atlantique, d'après les données Argo. En haut : 2004-2018. En bas : 2004-2019. Voir la figure 25 pour la localisation géographique des transects. Source : *Global Marine Argo Atlas*.

4. Cycles océaniques

Index de l'Oscillation Australe

Les valeurs négatives soutenues de l'indice d'oscillation australe (SOI) montrées par la figure 29 indiquent souvent des épisodes El Niño. Ces valeurs négatives s'accompagnent généralement 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 sont généralement associées à des alizés du Pacifique plus forts et à des températures de surface de la mer plus élevées au nord de l'Australie, indiquant des épisodes de La Niña. Les eaux des océans Pacifique central et oriental tropical se refroidissent pendant cette période. L'Australie orientale et septentrionale reçoit généralement des précipitations

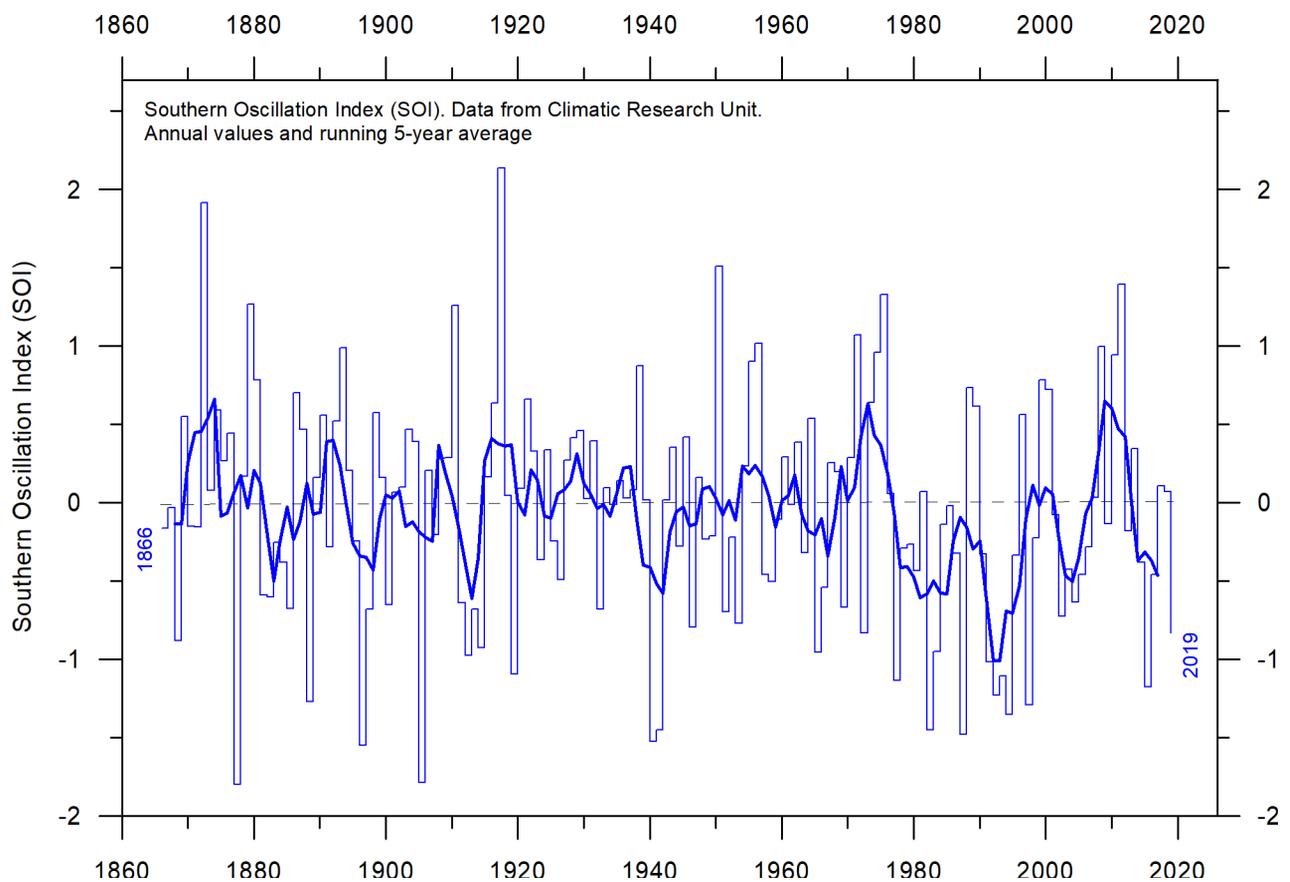


Figure 29: Anomalies de l'Oscillation australe (SOI) depuis 1866. L'indice d'oscillation australe (SOI) est calculé à partir des fluctuations mensuelles ou saisonnières de la différence de pression atmosphérique entre Tahiti et Darwin. La ligne mince représente les valeurs annuelles, tandis que la ligne épaisse est la moyenne mobile sur 5 ans. Source : Unité de recherche climatique, Université d'East Anglia.

L'Oscillation Pacifique décennale

L'oscillation décennale du Pacifique (AOP), illustrée à la figure 30, est un schéma de variabilité climatique de type El Niño à longue durée de vie, dont nous disposons de données à partir de janvier 1900. Les causes de l'AOP ne sont pas actuellement connues, mais même en l'absence d'une compréhension théorique, les informations sur l'oscillation améliorent les prévisions climatiques d'une saison à l'autre et d'une année à l'autre en Amérique du Nord en raison de sa forte tendance à la persistance sur plusieurs saisons et sur plusieurs années. L'AOP semble également être à peu près en phase avec les changements de température globale. Ainsi, du point de vue des impacts sociétaux, la reconnaissance de l'AOP est importante car elle montre que les conditions climatiques « normales » peuvent varier sur des périodes comparables à la durée de la vie humaine.

L'AOP illustre bien comment les températures mondiales sont liées aux températures de la surface de la mer dans l'océan Pacifique, le plus grand océan de la Terre. Lorsque les températures de la surface de la mer sont relativement basses (phase négative de l'AOP), comme c'était le cas de 1945 à 1977, la température globale de l'air diminue. Lorsque les températures à la surface de la mer sont élevées (phase positive de l'AOP), comme c'était le cas de 1977 à 1998, la température mondiale de l'air à la surface augmente (figure 30).

Une transformée de Fourier (non présentée ici) montre que l'AOP est influencée par un cycle de 5,7 ans, et peut-être aussi par un cycle plus long d'environ 53 ans.

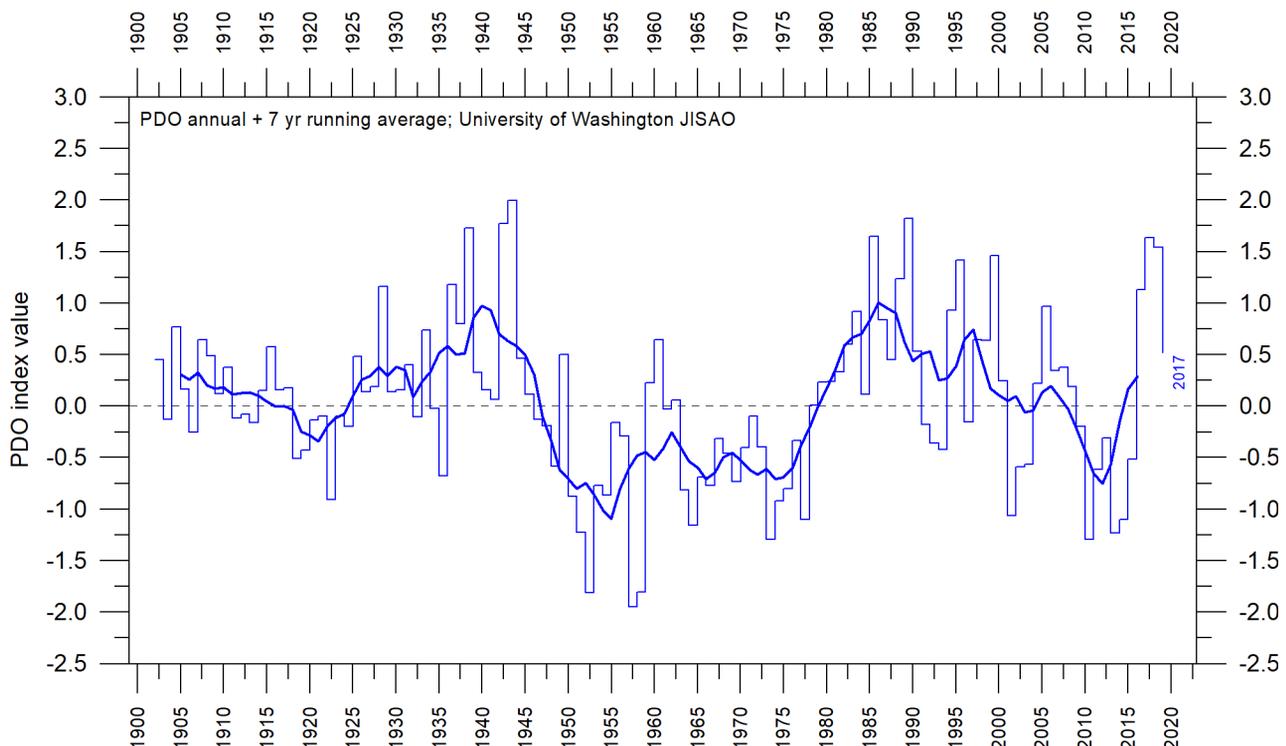


Figure 30 : Valeurs annuelles de l'oscillation décennale du Pacifique (AOP). La ligne mince montre les valeurs annuelles de l'AOP et la ligne épaisse est la moyenne mobile sur 7 ans. Notez que la valeur annuelle de PDO n'est pas encore mise à jour au-delà de 2017. Source: Joint Institute for the Study of the Atmosphere and Ocean (JISAO), un joint venture entre la NOAA et l'Université de Washington aux États-Unis.

L'Oscillation Atlantique multi décennale

L'oscillation multi décennale de l'Atlantique (AMO), voir figure 31, est un mode de variabilité qui produit ses effets sur la température de surface de l'Atlantique Nord. Basiquement, l'AMO est un indice de la température de surface de l'Atlantique Nord.

L'indice AMO semble être corrélé aux températures de l'air et aux précipitations sur une grande partie de l'hémisphère Nord. L'association semble être élevée pour le nord-est du Brésil, les précipitations dans le Sahel africain et le climat estival en Amérique du Nord et en Europe. L'indice AMO semble également être associé à des changements dans la fréquence des sécheresses en Amérique du Nord et se reflète dans la fréquence des ouragans violents de l'Atlantique.

À titre d'exemple, l'indice AMO peut être lié à la survenance passée de sécheresses majeures dans le Midwest et le Sud-Ouest des États-Unis. Lorsque l'AMO est élevée, ces sécheresses ont tendance à être plus fréquentes ou prolongées, et vice versa pour les valeurs faibles. Aux États-Unis, deux des sécheresses les plus graves du 20^e siècle (la *Dust Bowl* des années 30 et les années 50), se sont produites pendant des périodes de valeurs élevées de l'AMO. En revanche, la Floride et le Pacifique Nord-Ouest sont à l'opposé : une AMO élevée dans ces régions est associée à des précipitations relativement élevées.

Une transformation de Fourier (non présentée ici) montre que les données AMO sont contrôlées par un cycle de 67 ans et, dans une moindre mesure, par un cycle de 3,5 ans.

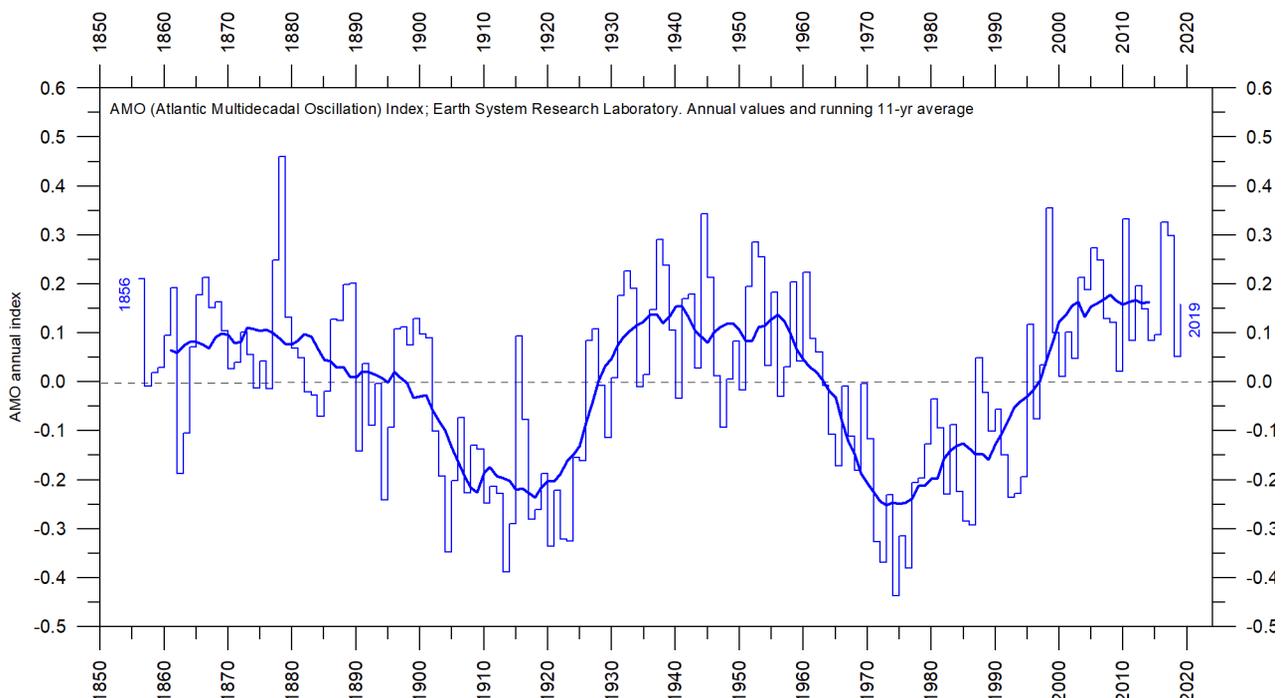


Figure 31: Oscillation multi décennale de l'Atlantique. Valeurs de l'index non lissés depuis 1856. La fine ligne bleue montre les valeurs annuelles, et la ligne épaisse est la moyenne mobile sur 11 ans. Source de données : Earth System Research Laboratory, NOAA, USA.

5 La mer

Introduction

La variation globale (ou eustatique) du niveau de la mer est mesurée par rapport à un niveau de référence idéal, le géoïde, produit à l'aide de modèles mathématiques, de la surface de la planète Terre [3]. Le niveau global de la mer est fonction du volume des bassins océaniques et du volume de l'eau qu'ils contiennent. Les changements du niveau mondial de la mer sont causés (sans être exhaustifs), par quatre mécanismes principaux :

- des changements de pression atmosphérique et de vent locaux et régionaux, et les changements de marée introduits par la Lune ;
- des changements dans le volume du bassin océanique causés par les forces tectoniques (géologiques) ;
- des changements dans la densité de l'eau de l'océan causés par les variations des courants, de la température de l'eau et de la salinité; des changements dans le volume d'eau de mer causés par les changements dans le bilan massique des glaciers terrestres.



Les mesures par altimétrie satellitaire

L'altimétrie satellitaire est un relativement nouveau et précieux système de mesure, avec une couverture presque mondiale. Il fournit des informations uniques sur la topographie de surface détaillée des océans et son évolution. Cependant, ce n'est probablement pas un outil précis pour estimer les changements absolus du niveau mondial de la mer en raison des hypothèses qui doivent être faites lors de l'interprétation des données brutes. L'un d'eux (figure 32) est l'ajustement du rebond isostatique glaciaire (GIA). Le GIA englobe le transfert de masse à grande échelle et à long terme des océans vers la terre, et le déclin des grandes calottes glaciaires quaternaires en Amérique du Nord et en Europe du Nord. Cet énorme transfert de masse provoque des changements rythmiques de la charge de surface, entraînant un écoulement viscoélastique du manteau et des effets élastiques dans la croûte supérieure de la Terre. Aucune technique ou réseau d'observation ne peut fournir des informations suffisantes pour permettre d'estimer un GIA précis, de sorte que différentes hypothèses doivent être faites. Ces hypothèses sont difficiles à vérifier. Ils dépendent du modèle de déglaciation utilisé (pour la dernière glaciation) et du modèle utilisé pour le manteau et la croûte. De ce fait (et aussi pour d'autres raisons), les interprétations du changement moderne du niveau de la mer dans le monde basées sur l'altimétrie par satellite varient entre 1,9 mm et 3,5 mm par an environ.

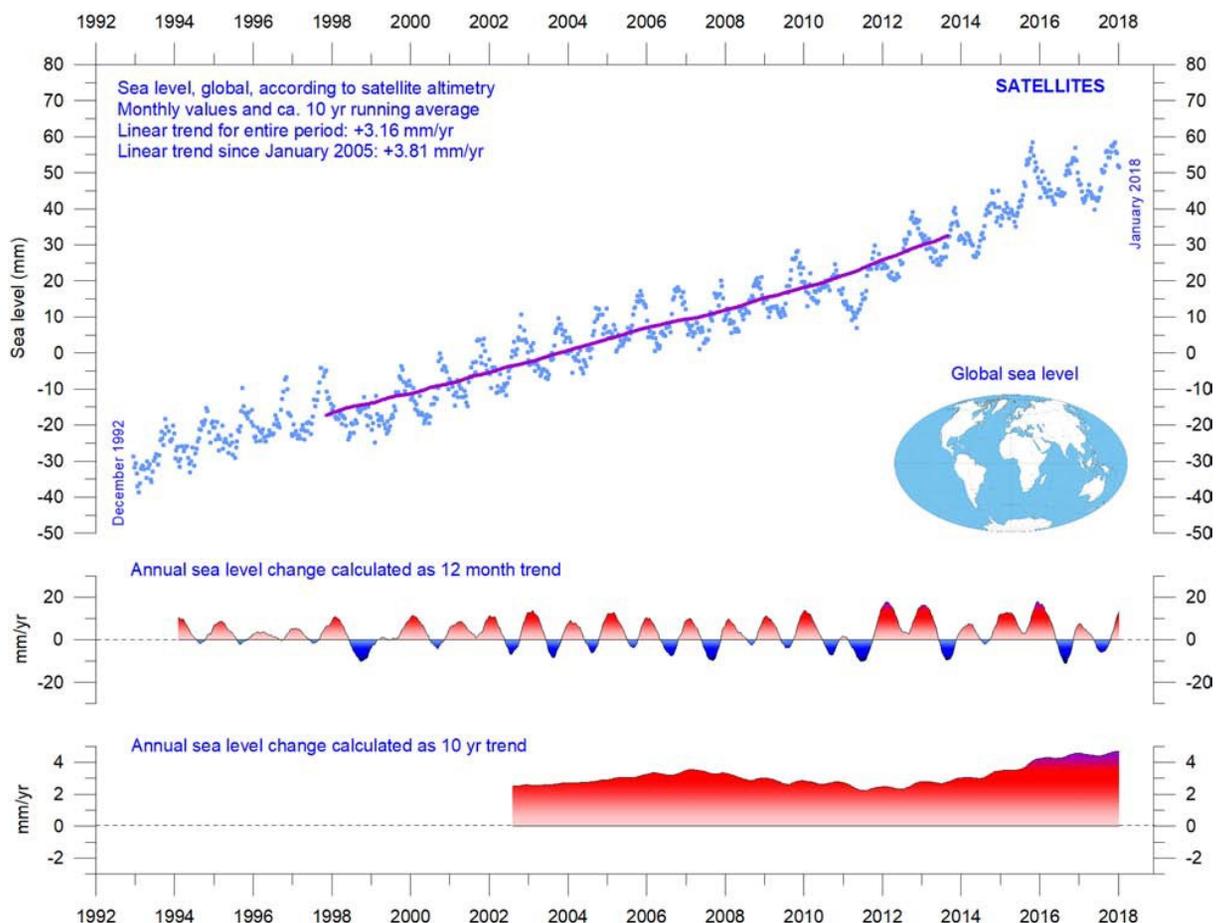


Figure 32: Variation mondiale du niveau de la mer depuis décembre 1992. Les points bleus représentent les observations ponctuelles et la ligne violette représente la moyenne mobile sur 121 mois (environ 10 ans). Les deux panneaux inférieurs montrent la variation annuelle du niveau de la mer, calculée pour des fenêtres temporelles de 1 et 10 ans, respectivement. Ces valeurs sont tracées à la fin de l'intervalle considéré. Source : *Colorado Center for Astroynamics Research* de l'Université du Colorado à Boulder.

Les mesures des marégraphes

Les marégraphes, situés sur des sites côtiers, enregistrent le mouvement net de la surface de l'océan local par rapport à la terre. Les mesures de la variation locale relative du niveau de la mer (figure 33) sont vitales pour la planification côtière, et ce sont les données marégraphiques, plutôt que l'altimétrie par satellite, qui sont pertinentes pour la planification des zones côtières.

D'un point de vue scientifique, le mouvement net du niveau de la mer local, mesuré par les marégraphes, comprend deux composantes :

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

Par exemple, un marégraphe peut enregistrer une augmentation apparente du niveau de la mer de 3 mm par an. Si les mesures géodésiques montrent que la terre s'enfonce de 2 mm par an, l'élévation réelle du niveau de la mer n'est que de 1 mm par an (3 moins 2 mm par an). Dans un contexte de changement global du niveau de la mer, la valeur de 1 mm par an a du sens, mais dans un contexte de planification côtière locale, c'est la valeur de 3 mm par an obtenue à partir du marégraphe qui est le seul facteur pertinent.

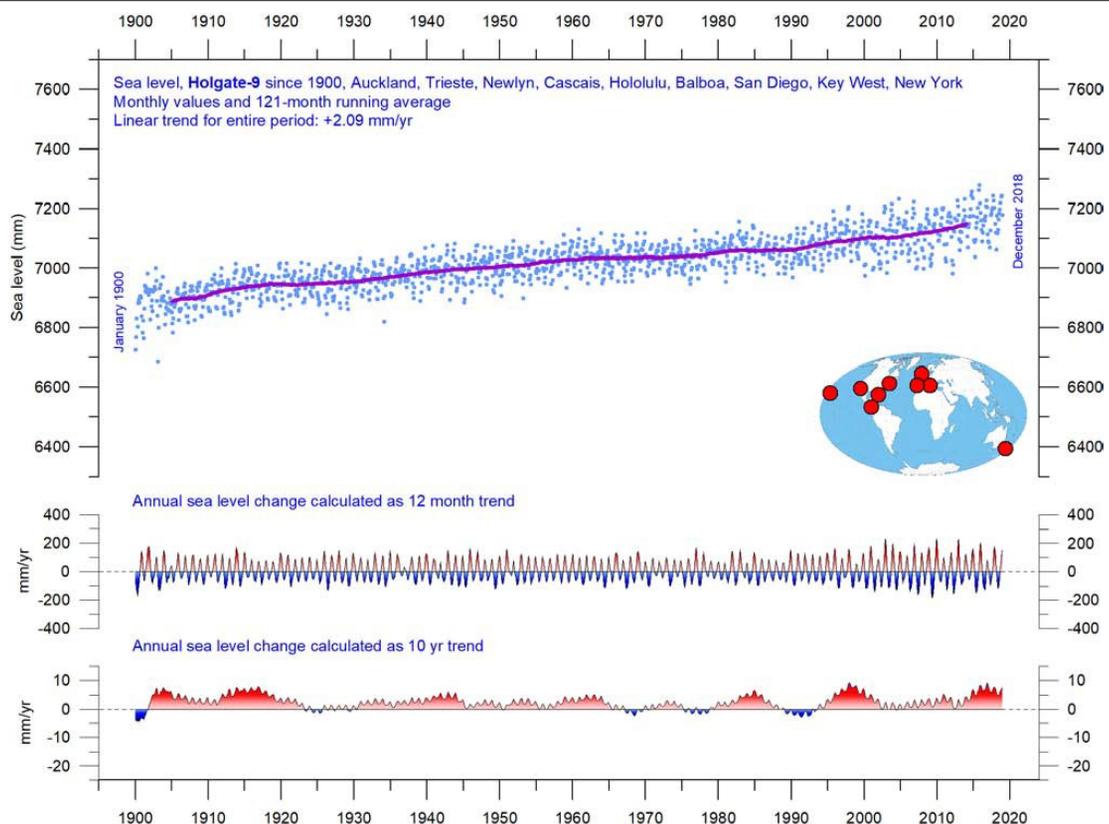


Figure 33: Données marégraphiques mensuelles de Holgate. Source : PSMML Data Explorer. Holgate (2007) a suggéré que les neuf stations listées dans le diagramme reflétaient la variabilité trouvée dans un plus grand nombre de stations au cours du dernier demi-siècle. Pour cette raison, les valeurs moyennes du groupe de stations marégraphiques Holgate-9 sont intéressantes à suivre, même si Auckland (Nouvelle-Zélande) n'a pas communiqué de données depuis 2000 et Cascais (Portugal) depuis 1993. Malheureusement, en raison de cette perte de données, l'hémisphère sud est sous-représenté dans la série Holgate-9 depuis 2000. Les points bleus représentent les observations mensuelles moyennes ponctuelles et la ligne violette représente la moyenne courante de 121 mois (environ 10 ans). 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.

Afin de construire une série chronologique de mesures du niveau de la mer pour chaque marégraphe, il faut réduire les moyennes mensuelles et annuelles à une donnée commune. Cette réduction est effectuée par le PSMSL (*Permanent Service for Mean Sea Level*), en utilisant l'historique des données marégraphiques fourni par l'autorité nationale fournisseur. Le référentiel local révisé de chaque station est défini comme étant à environ 7000 mm en dessous du niveau moyen de la mer, ce choix arbitraire ayant été fait il y a de nombreuses années pour éviter des nombres négatifs dans les valeurs moyennes mensuelles et annuelles résultantes.

Peu d'endroits sur Terre sont complètement stables, et la plupart des marégraphes sont situés sur des sites exposés à un soulèvement ou à un affaissement tectonique (le changement vertical de la surface terrestre). Cette instabilité verticale généralisée a plusieurs causes, mais affecte bien sûr l'interprétation des données des marégraphes individuels. Beaucoup d'efforts sont consacrés à la correction des mouvements tectoniques locaux.

Les données des marégraphes situés sur des sites tectoniquement stables présentent donc un intérêt particulier pour déterminer les changements réels du niveau de la mer à court et à long terme. C'est le cas de Korsør, au Danemark (figure 34). Les données indiquent pour ce site une élévation stable du niveau de la mer d'environ 0,83 mm par an depuis janvier 1897, sans aucune indication d'une accélération récente. Les données des marégraphes du monde entier suggèrent une élévation moyenne du niveau de la mer mondiale de 1,0 à 1,5 mm par an, tandis que les enregistrements satellitaires (figure 32) suggèrent une élévation d'environ 3,2 mm par an ou plus. La différence notable (un rapport d'au moins 1 à 2) entre les deux ensembles de données bien que remarquable, n'a pas reçu d'explications largement acceptées. Il est cependant connu que les observations par satellite sont sujettes à plusieurs difficultés dans les zones proches de la côte [4].

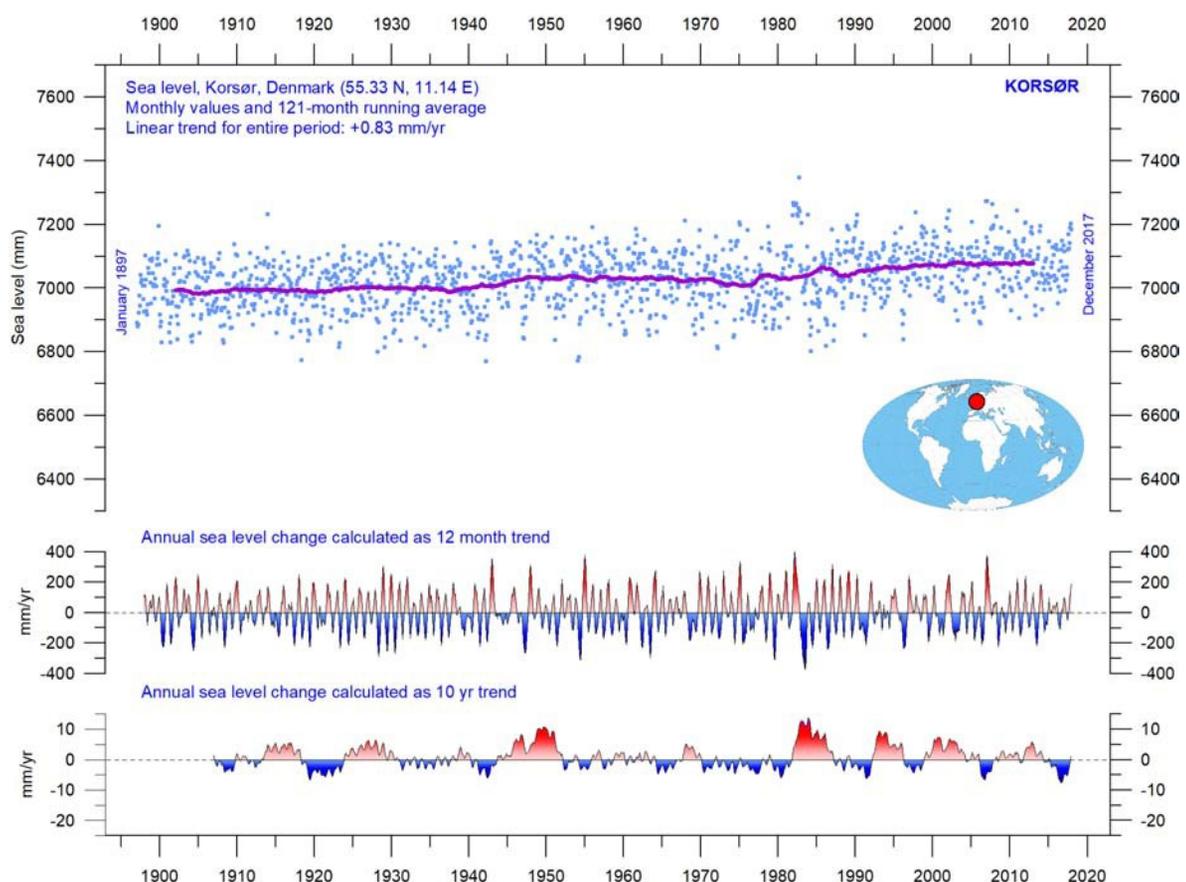


Figure 34 : Données marégraphiques mensuelles de Korsør (Danemark). Source : PSMSL Data Explorer. Les points bleus représentent les observations mensuelles isolément et la ligne violette représente la moyenne mobile de 121 mois (environ 10 ans). Les deux panneaux inférieurs montrent la variation annuelle 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.

6. Les banquises

La figure 35 montre des graphiques sur l'évolution de l'étendue moyenne de la banquise pour les deux pôles au cours de la période 1979-2019. Les tendances dans l'Arctique et l'Antarctique sont contrastées. Dans l'hémisphère Nord l'extension de la banquise tend à diminuer, mais il y a eu en même temps une augmentation dans l'hémisphère Sud, au moins jusqu'en 2016. Puis, il y a eu une diminution extraordinairement rapide dans l'hémisphère Sud au cours du printemps 2016, plus rapide que lors de toute saison printanière précédente à l'époque des satellites, et qui a de plus été observée dans tous les secteurs de l'Antarctique, mais en particulier dans les mers de Weddell et de Ross.

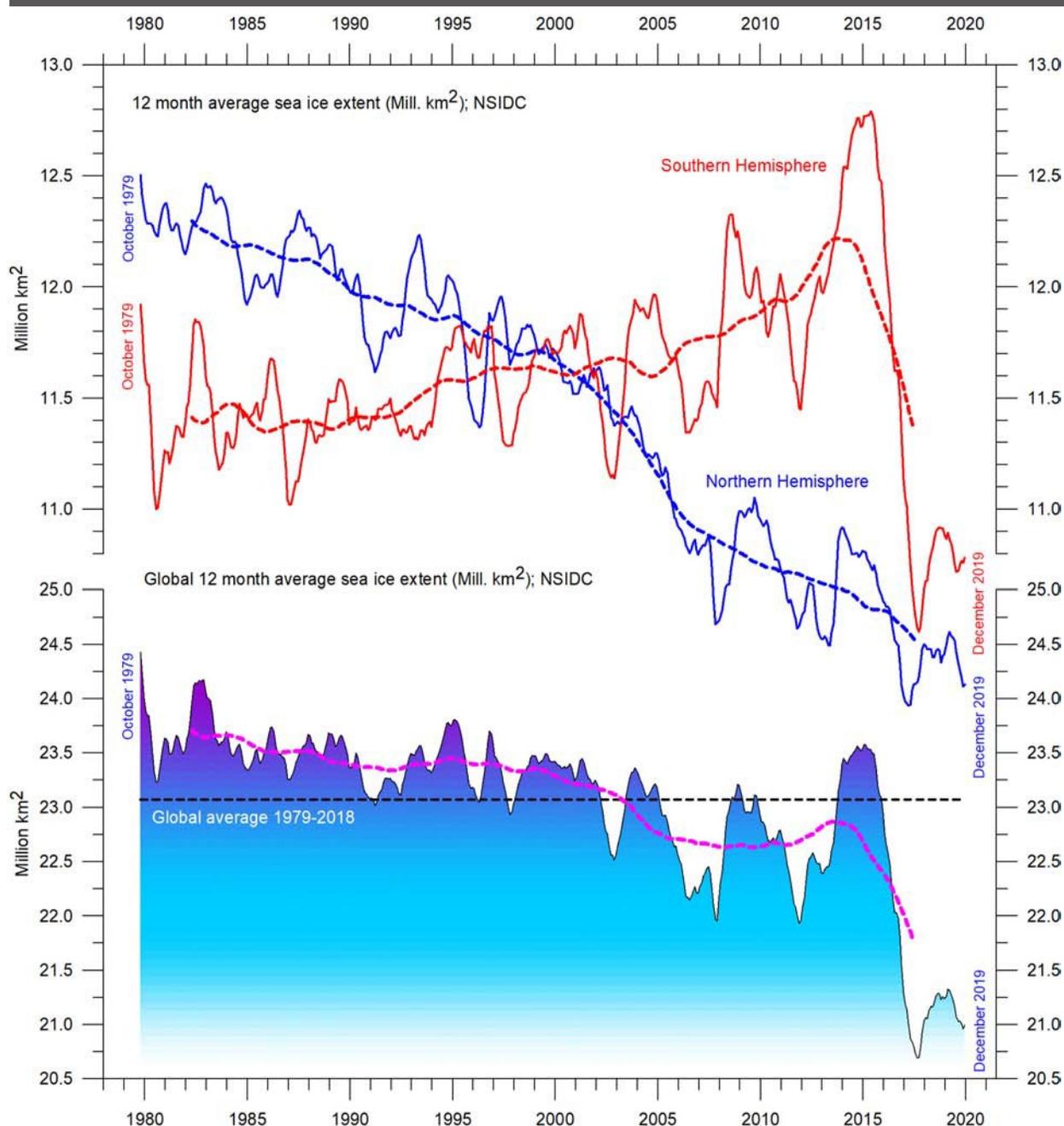


Figure 35 : Étendue moyenne globale des banquises sur 12 mois à l'échelle mondiale par hémisphère depuis 1979. La valeur d'octobre 1979 représente la moyenne mensuelle de novembre 1978 à octobre 1979, la valeur de novembre 1979 représente la moyenne de décembre 1978 à novembre 1979, etc. Les lignes pointillées 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 de données : *National Snow and Ice Data Center (NSIDC)*.

Dans ces secteurs, de forts vents de surface du nord (chauds) ont repoussé la glace de mer vers le continent antarctique. Les conditions inhabituelles de vent en 2016 ont été discutées dans la littérature scientifique [5] et semblent être liées à la variabilité climatique naturelle. Les observations par satellite de la banquise sont encore récentes et ne prennent pas pleinement en compte les variations naturelles qui se déroulent sur plus d'une décennie ou deux.

Ce qui ressort des enregistrements est néanmoins instructif. Les deux graphiques montrant les moyennes sur 12 mois (figure 35) présentent des variations cycliques se superposant à la tendance générale. La banquise de l'Arctique est fortement influencée par un cycle de 5,3 ans et celle de l'Antarctique par un cycle d'environ 4,5 ans. Ces deux cycles ont atteint leurs minima simultanément en 2016, ce qui explique au moins en partie le minimum simultané de l'étendue globale des deux banquises.

Pour les prochaines années, ces cycles pourraient induire une augmentation de l'étendue de la banquise aux deux pôles, avec pour conséquence une augmentation du total mondial. En fait, cette tendance a peut-être déjà commencé (figure 35). Cependant, dans les années à venir, les minima et maxima de ces variations ne se produiront pas de manière synchrone en raison de leurs périodicités différentes, et le minimum (ou maximum) global pourrait donc être moins prononcé qu'en 2016.

La figure 36 montre l'étendue et l'épaisseur globales de la banquise arctique de la fin 2018 à la fin 2019, telles que publiées par l'Institut danois de météorologie. Le changement le plus notable a été une augmentation globale de la banquise dans certaines parties du secteur Europe-Russie de l'océan Arctique. De plus, de la glace relativement épaisse s'est déplacée dans le secteur des îles Svalbard-Franz Josef en 2019, par rapport à la situation à la fin de 2018. En revanche, au nord du Canada et du Groenland, la glace épaisse s'est en partie éloignée.

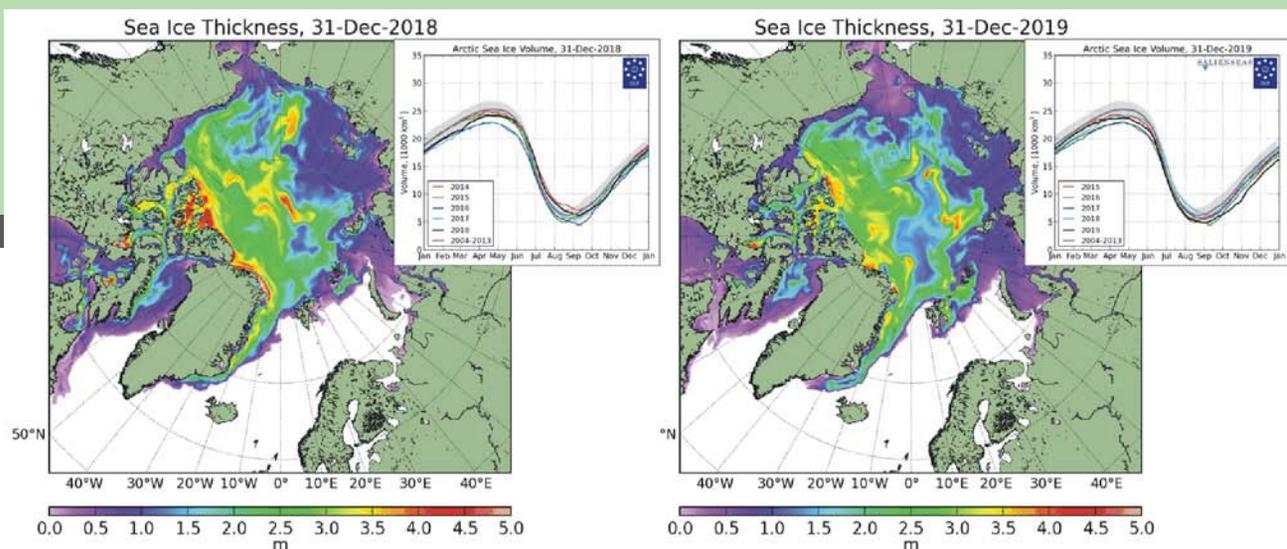


Figure 36 : Étendue et épaisseur de la banquise arctique. 31 décembre 2018 (à gauche) et 2019 (à droite) et les cycles saisonniers du volume total calculé de glace de la mer arctique, selon l'Institut météorologique danois (DMI). Le volume moyen de la banquise et l'écart-type pour la période 2004–2013 sont indiqués par un ombrage gris dans les diagrammes en encart.

7. La neige

L'enneigement global dépend principalement des changements dans l'hémisphère Nord (figure 37), où se trouvent toutes les principales zones terrestres. L'étendue de la couverture neigeuse de l'hémisphère Sud est essentiellement contrôlée par la calotte glaciaire de l'Antarctique est donc relativement stable.

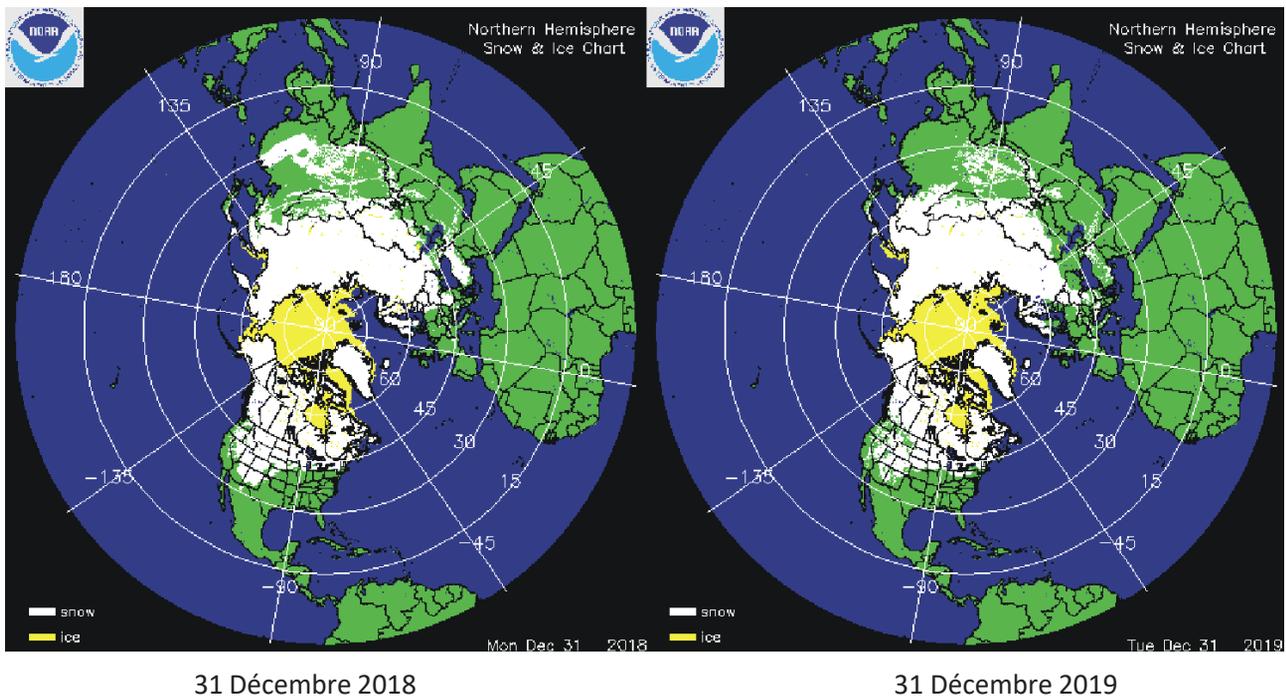


Figure 37: Extension et épaisseur de la banquise arctique. Source : National Ice Center (NIC).

L'étendue de la couverture neigeuse de l'hémisphère Nord est sujette à de grandes variations locales et régionales d'une année à l'autre. Cependant, la tendance générale depuis 1972 est la stabilité, comme l'illustrent les figures 38 et 39.

Pendant l'été de l'hémisphère Nord, la couverture neigeuse diminue habituellement 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, elle augmente à environ 50 000 000 km², ce qui représente 33% de surface terrestre totale de la planète Terre (figure 38).

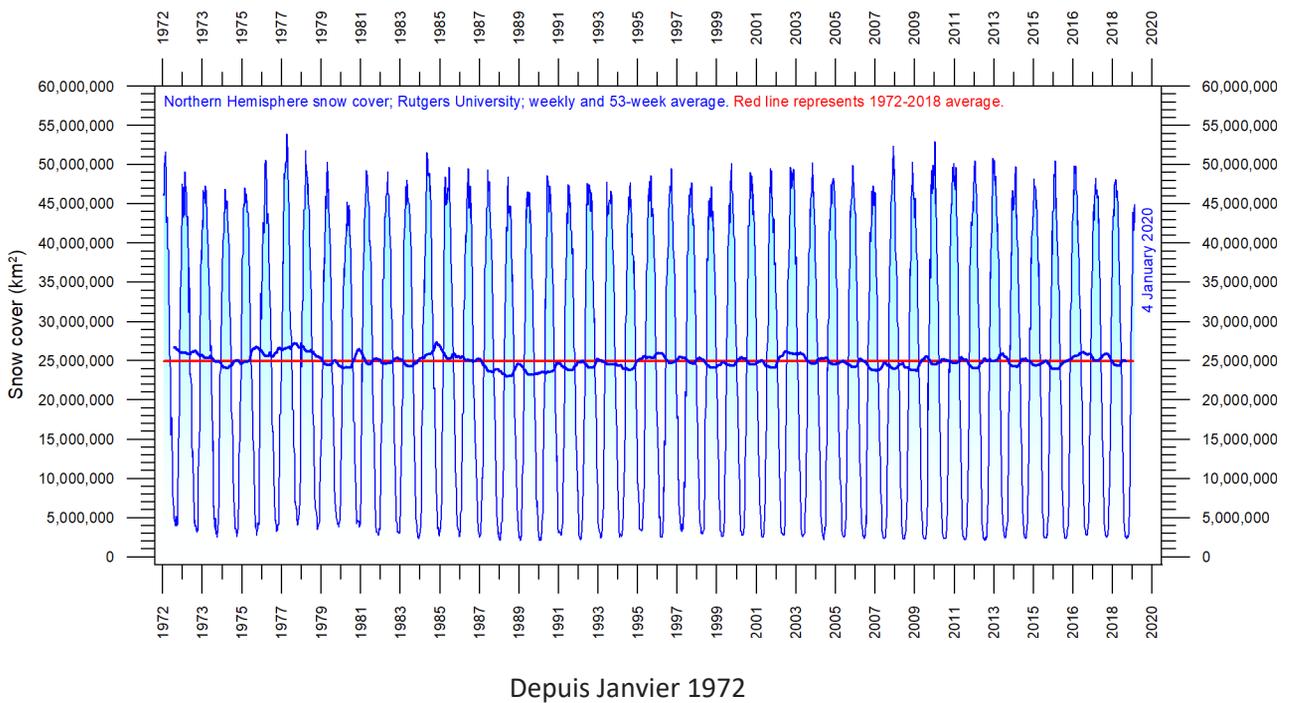
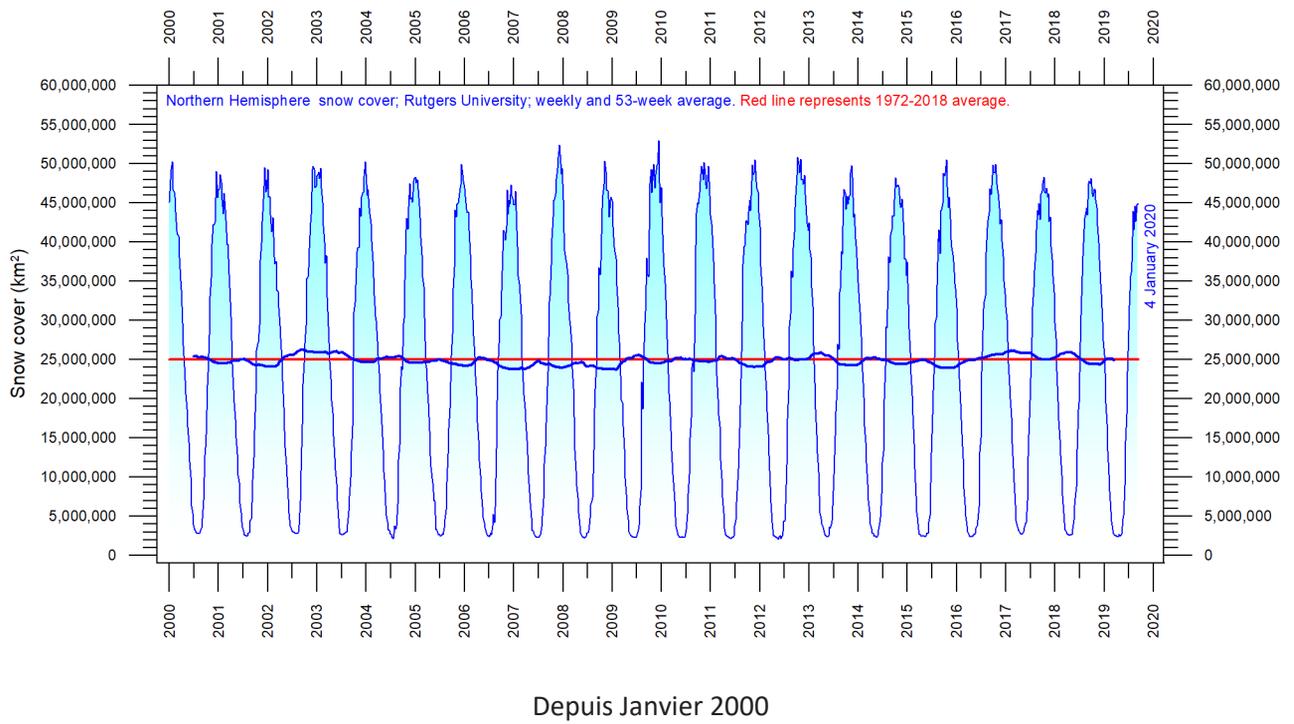


Figure 38 : Étendue hebdomadaire de couverture de neige de l'hémisphère Nord.

Source : Rutgers University Global Snow Laboratory. La ligne bleue représente les données hebdomadaires, la ligne bleue épaisse est la moyenne de 53 semaines mobile (environ 1 an). La ligne rouge horizontale est la moyenne de 1972-2018.

La figure 39 montre les tendances de l'enneigement saisonnier dans l'hémisphère Nord. L'étendue de la couverture neigeuse augmente légèrement automne, mi-hiver est stable en hiver et diminue légèrement au printemps. En 2019, l'étendue de la couverture neigeuse de l'hémisphère Nord était inchangée par rapport à 2018.

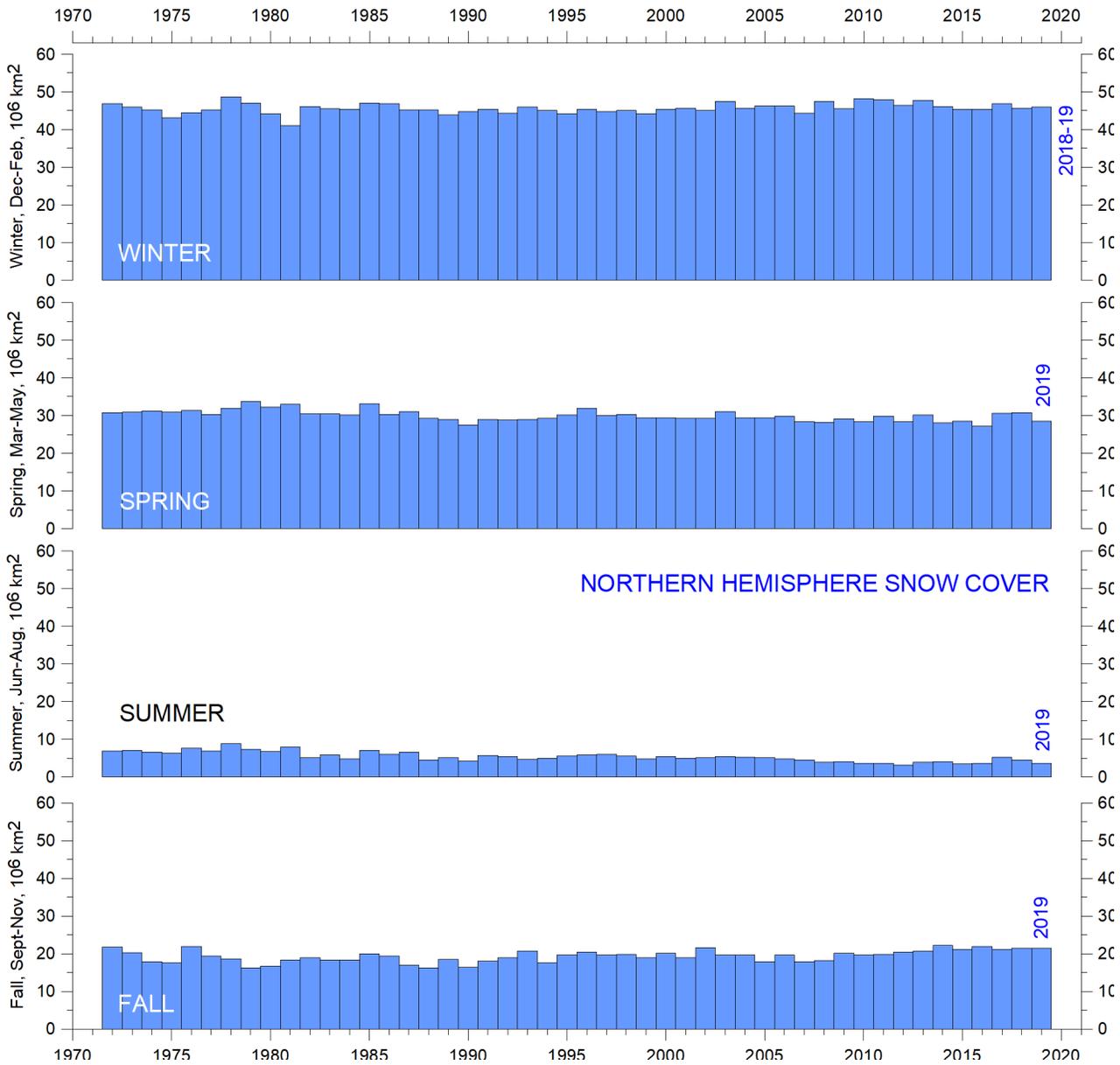


Figure 39 : Extension hebdomadaire de la couverture neigeuse dans l'hémisphère nord. Source : Rutgers University Global Snow Laboratory.

8. Tempêtes

Tempêtes tropicales et cyclones.

L'énergie cyclonique accumulée (ACE) est une mesure utilisée par l'agence américaine NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*) pour mesurer à la fois l'activité des cyclones tropicaux pris séparément et celle de saisons cycloniques tropicales entières. L'ACE est calculé comme le carré de la vitesse du vent toutes les 6 heures et est ensuite mis à l'échelle par un facteur de 10 000 pour une meilleure facilité d'utilisation, en utilisant une unité de vitesse de 104 nœuds. L'ACE d'une saison est la somme de l'ACE pour chaque tempête et résume ainsi le nombre, la force et la durée de toutes les tempêtes tropicales de la saison.

Le potentiel de dommages d'un cyclone est proportionnel au carré ou au cube de la vitesse maximale du vent, et donc l'ACE est donc non seulement une mesure de l'activité des cyclones tropicaux, mais aussi une mesure du potentiel de dommages d'un cyclone individuel ou d'une saison. Les enregistrements existants (figure 40) ne suggèrent aucune activité cyclonique anormale ces dernières années.

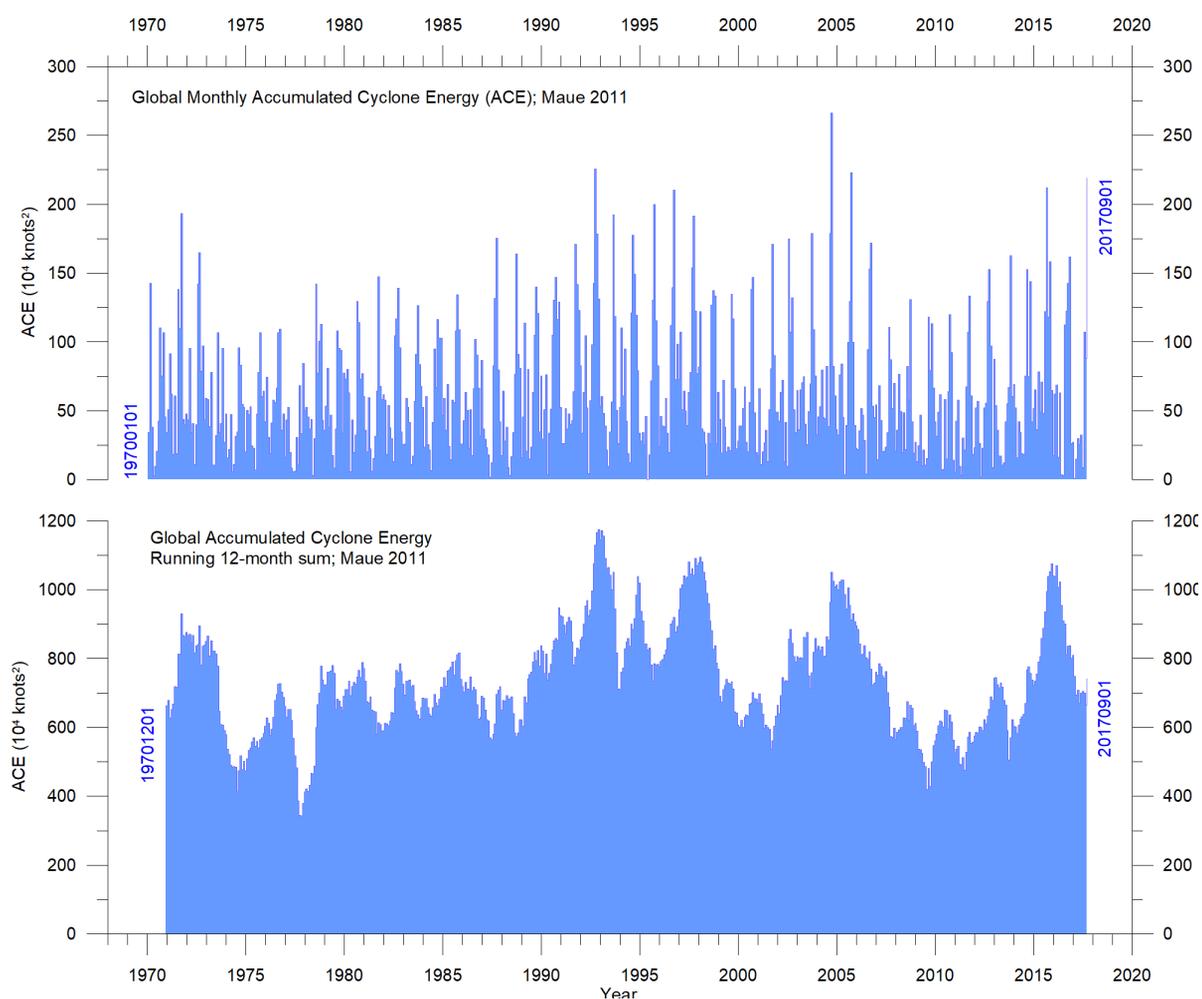


Figure 40 : Evolution de l'ACE depuis janvier 1970. En haut : mensuelle, et en bas : somme sur 12 mois. La somme des 12 mois courants (panneau inférieur) est tracée à la fin de l'intervalle de temps considéré. Source de données : Maue (2011). Notez que les données n'ont pas encore été mises à jour après septembre 2017 .

Les données globales de l'ACE montrent une variabilité dans le temps (figure 40), mais sans tendance claire. Cela vaut également pour les pour les hémisphères nord et sud pris séparément (figures 41 et 42). La période 1992–1998 a été marquée par des valeurs élevées ; d'autres pics ont été observés en 2004-2005 et en 2016, tandis que les périodes 1973-1990 et 2012-2015 ont été caractérisées par des valeurs faibles. Les pics de 1998 et 2016 ont coïncidé avec de forts événements El Niño dans l'océan Pacifique (voir section 3). [6]

L'ACE de l'hémisphère Nord (figure 41) domine le signal global (figure 40) et présente donc des pics et des creux similaires à ceux des données mondiales, sans tendance claire pour toute la période d'observation. La principale saison des cyclones dans l'hémisphère Nord s'étend de juin à novembre.

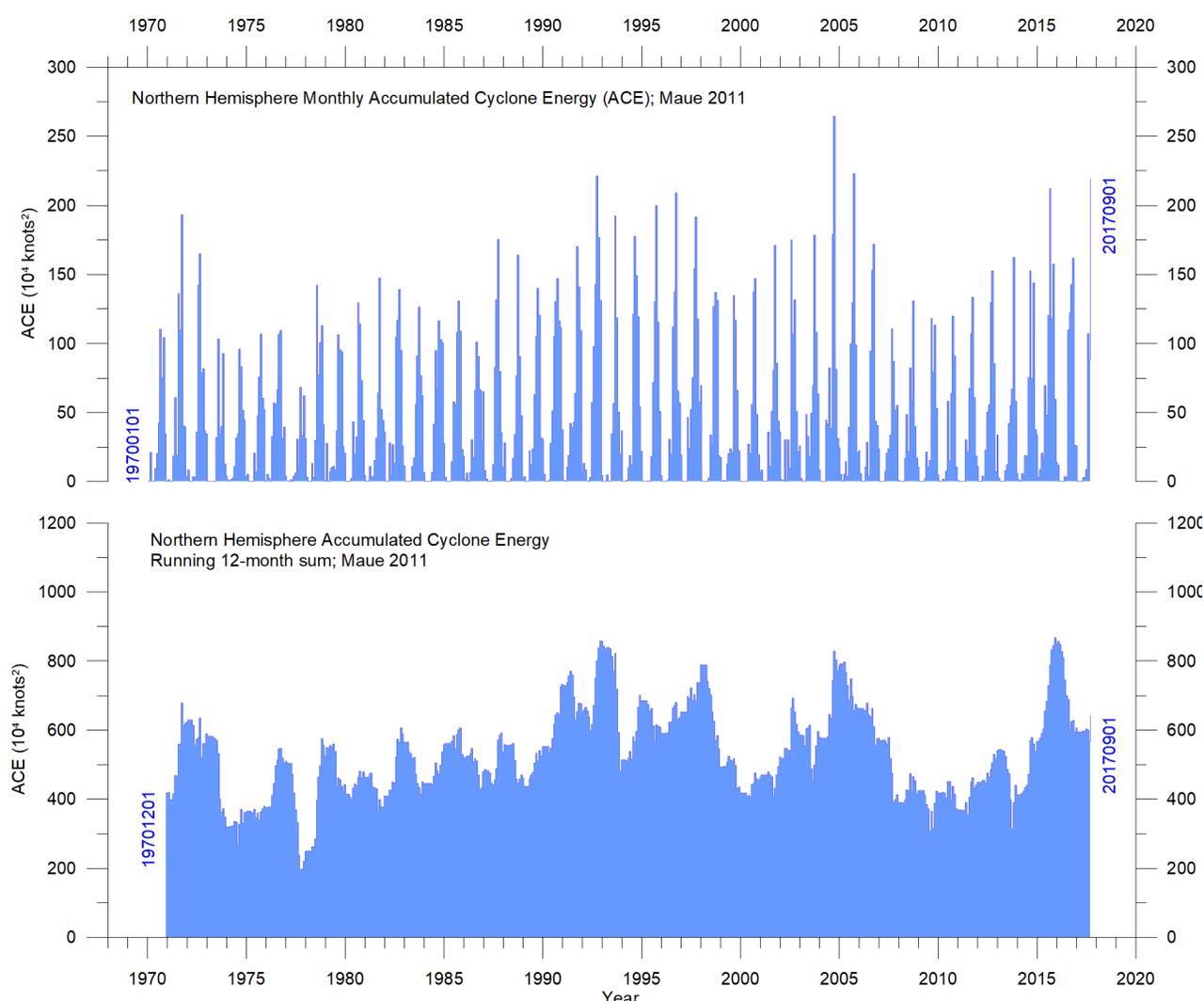


Figure 41 : Evolution de l'activité cyclonique (ACE) dans l'hémisphère Nord depuis janvier 1970. En haut : mensuellement et en bas : moyenne mobile sur 12 mois. La somme des 12 mois courants (panneau inférieur) est tracée à la fin de l'intervalle de temps considéré. Source : Maue (2011). Notez que les données postérieures à septembre 2017 n'ont pas encore été mises à jour.

Les valeurs de l'ACE sont plus faibles dans l'hémisphère sud que dans l'hémisphère Nord (Figure 42). La saison des cyclones s'étend de décembre à avril.

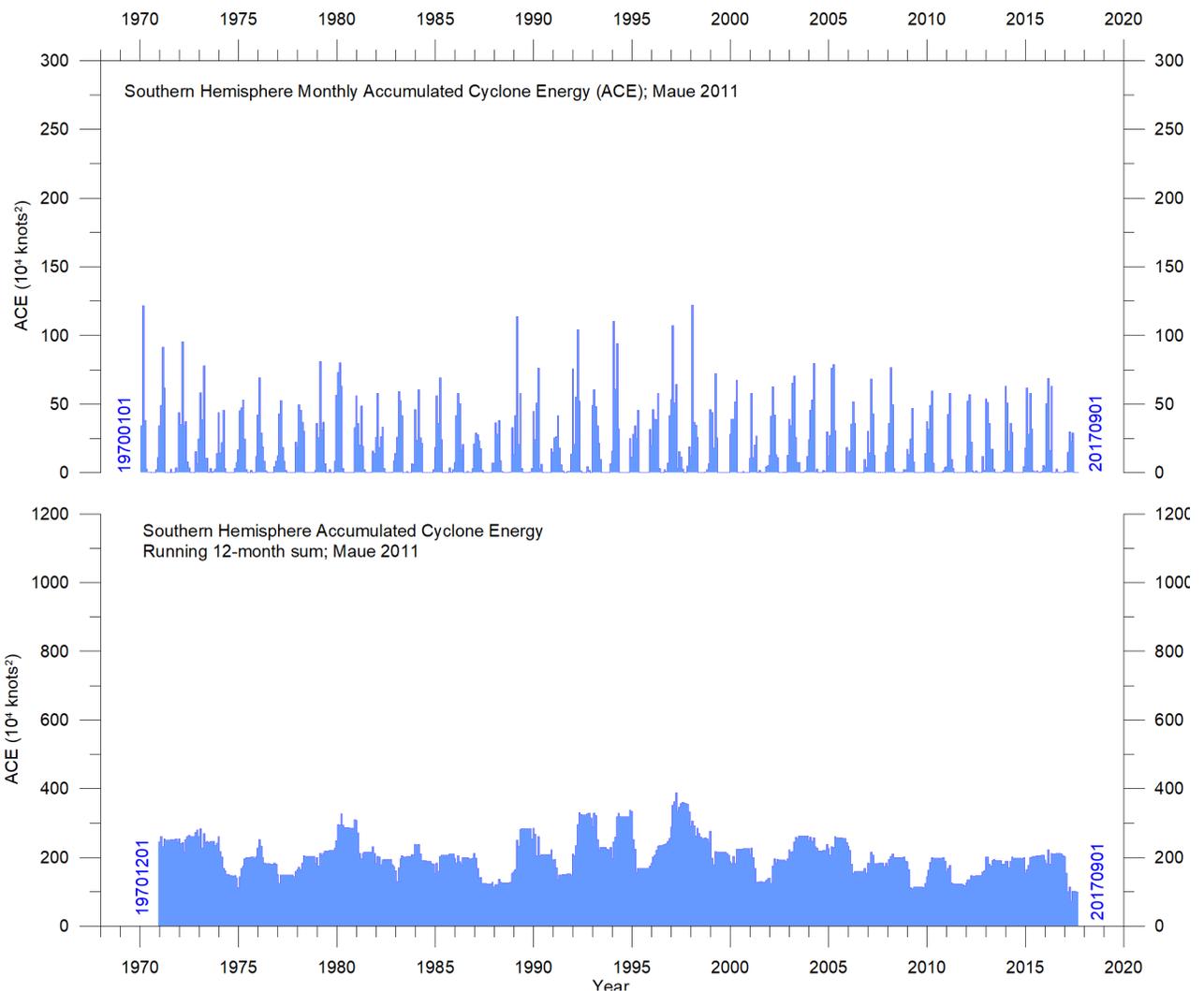


Figure 42: Evolution de l'activité cyclonique (ACE) dans l'hémisphère sud depuis janvier 1970. En haut : mensuellement. En bas: moyennes mobiles sur 12 mois. La somme des 12 mois courants (panneau inférieur) est tracée à la fin de l'intervalle de temps considéré. Source : Maue (2011). Notez que les données postérieures à septembre 2017 n'ont pas encore été mises à jour.

Les données ACE du laboratoire *Atlantic Oceanographic and Meteorological* remontent à 1850. Une transformée de Fourier (non représentée) pour le bassin atlantique (figure 43) suggère que les données ACE sont fortement influencées par une variation périodique d'environ 60 ans. Depuis 2002, les données ACE pour l'atlantique montrent une tendance à la baisse, mais avec de grandes variations interannuelles. La saison des cyclones dans l'Atlantique Nord présente souvent une activité supérieure à la moyenne dans les conditions La Niña à la fin de l'été (août-octobre), comme ce fut le cas en 2017.[7]

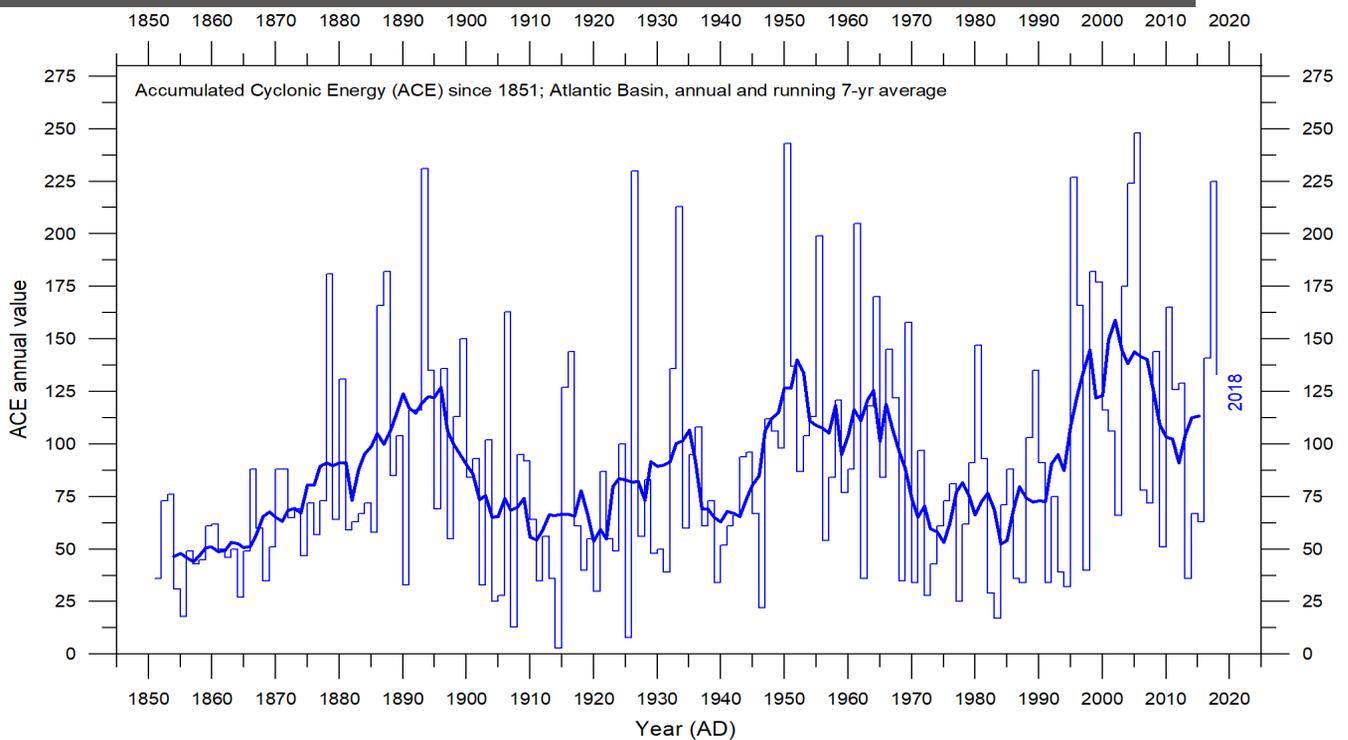


Figure 43 : Evolution de l'ACE pour le bassin atlantique depuis 1850. Les lignes fines indiquent les valeurs annuelles de l'ACE et la ligne épaisse indique la moyenne mobile sur 7 ans. Source de données : NOAA (Laboratoire océanographique et météorologique de l'Atlantique, Division de la recherche sur les ouragans). Notez que ces données au-delà de 2018 n'ont pas encore été mises à jour.

Autres tempêtes et vents

Le nombre de cyclones parvenus jusqu'à la partie continentale des États-Unis est illustré à la figure 44. Au cours de la période d'observation, cette série de données montre des variations considérables d'une année à l'autre, mais il n'est pas possible de détecter une tendance claire. Une transformée de Fourier (non représentée) révèle deux cycles statistiquement significatifs, d'une durée d'environ 3,2 et 4,9 ans.

Un aperçu des changements des conditions de vent dominantes peut également être obtenu à partir de l'inspection des observations effectuées dans les stations météorologiques côtières. Un exemple de ce type de d'observations proviennent du phare de Lista. Le phare se trouve sur un cap exposé à l'extrême sud-ouest du continent norvégien et est représentatif des conditions de vent en mer du Nord et dans le secteur européen de l'Atlantique Nord.

Le phare de Lista dispose de données mensuelles sur le vent remontant à janvier 1931 (figure 45). À cet endroit, les vents les plus forts ont été enregistrés peu de temps après la Seconde Guerre mondiale, depuis lors, ils ont quelque peu diminué. Cela correspond, dans une certaine mesure, à la tendance du nombre d'ouragans qui ont touché terre aux États-Unis (figure 45), sur la rive opposée de l'Atlantique Nord.

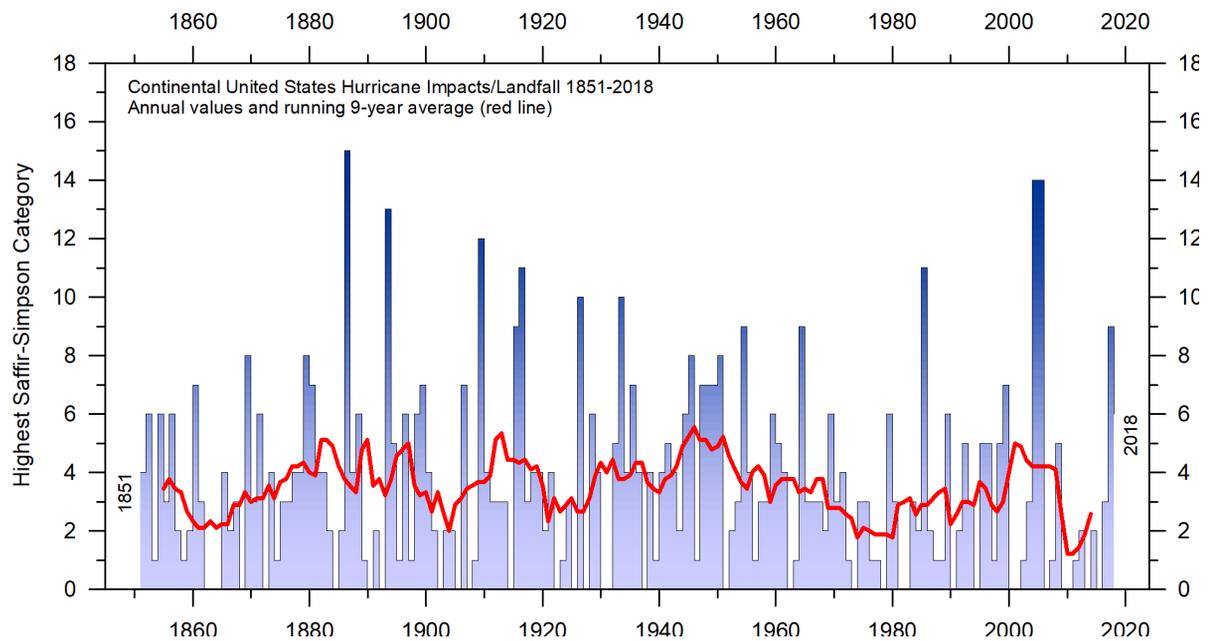


Figure 44 : Nombre de cyclones ayant atterri sur le continent américain, 1851–2018. L'échelle *Saffir-Simpson* aux États-Unis est basé sur l'estimation des vents de surface sur la côte. Source : NOAA (Division de la recherche sur les ouragans. Notez que cette série de données n'est pas encore mise à jour au-delà de 2018).

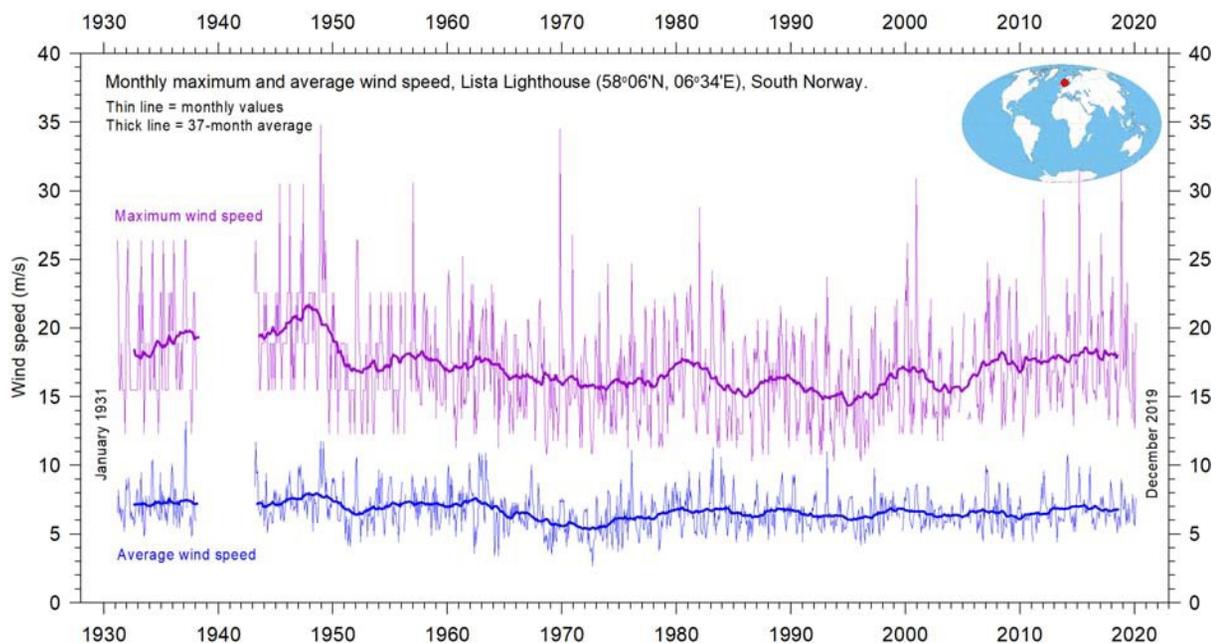


Figure 45 : Vitesses du vent au phare de Lista. Source : eKlima.

Notes

[1] Voir par exemple Vignudelli et al., 2019.

[2] Roemmich and Gilson 2009.

[3] Carter et al. 2014.

[4] Vignudelli et al., 2019 fournissent une synthèse mise à jour des limitations actuelles de l'altimétrie satellitaire dans les régions côtières.

[5] Voir, par exemple, Turner et al., 2017 and Phys.org, 2019.

[6] Les données ACE et la dynamique des cyclones sont détaillées par Maue, 2011.

[7] Voir Johnstone and Curry, 2017.

Références

Etudes citées

Carter R.M., de Lange W., Hansen J.M., Humlum O., Idso C., Kear, D., Legates D., Mörner N.A., Ollier C., Singer F. and Soon W. 2014. *Commentary and Analysis on the Whitehead & Associates 2014 NSW Sea-Level Report*. Policy Brief, NIPCC, 24. September 2014, 44 pp. <http://climatechangereconsidered.org/wp-content/uploads/2014/09/NIPCC-Report-on-NSW-Coastal-SL-9z-corrected.pdf>.

Chylek P., Folland C.K., Lesins G. and Dubey M.K. 2010. Twentieth century bipolar seesaw of the Arctic and Antarctic surface air temperatures. *Geophysical Research Letters*, 37, L08703.

Holgate S.J. 2007. On the decadal rates of sea level change during the twentieth century. *Geophysical Research Letters*, Vol. 34, L01602.

Johnstone J. and Curry J. 2017. *Causes and Predictability of the Exceptionally Active 2017 Atlantic Hurricane Season*. Climate Forecast Applications Network (CFAN). https://curryja.files.wordpress.com/2017/11/hurricane_review_2017-final.pdf.

Maue R.L. 2011. Recent historically low global tropical cyclone activity. *Geophysical Research Letters*, Vol. 38, L14803.

Roemmich D. and Gilson J. 2009. The 2004–2008 mean and annual cycle of temperature, salinity, and steric height in the global ocean from the Argo Program. *Progress in Oceanography*, 82, 81–100.

Turner et al. 2017. Unprecedented springtime retreat of Antarctic sea ice in 2016. *Geophysical Research Letters*, Vol. 44(13), p. 6868–6875.

Vignudelli 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>.

Sources de données (Janvier-Février 2020):

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 Astroynamics 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>.

eKlima: http://sharki.oslo.dnmi.no/portal/page?_pageid=73,39035,73_39049&_dad=portal&_schema=PORTAL.

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/ensostuff/enso-years.shtml.

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

PDO, Joint Institute for the Study of the Atmosphere and Ocean (JISAO): <http://research.jisao.washington.edu/pdo/PDO.latest>.

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: http://sealevel.colorado.edu/files/current/sl_global.txt.

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

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/>.

Tropical storm and hurricane accumulated cyclone energy (ACE): http://wx.graphics/tropical/global_ace.dat.

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

A propos du GWPF (Global Warming Policy Foundation)

Le GWPF (*Global Warming Policy Foundation*) est un groupe de réflexion non-partisan et un organisme caritatif éducatif dûment enregistré qui, tout en étant centré sur la science contestée du réchauffement climatique, se préoccupe aussi des coûts et autres implications des politiques qui sont actuellement préconisées.

Notre objectif principal est d'analyser les politiques de lutte contre le réchauffement climatique et leurs implications économiques. Notre but est aussi de fournir les analyses et les conseils économiques les plus robustes et les plus fiables. Au delà de tout, nous cherchons à informer les médias, la classe politique et le public sur ce sujet en général et sur la désinformation à laquelle ils sont trop fréquemment soumis à l'heure actuelle.

La clé du succès du GWPF est la confiance et la crédibilité que nous avons gagnées aux yeux d'un nombre croissant de décideurs, de journalistes et du public. Le GWPF est financé en grande partie par des dons volontaires d'un certain nombre de particuliers et de fondations caritatives. Afin de marquer sa complète indépendance, le GWPF n'accepte pas les dons des sociétés énergétiques ou de toute personne ayant un intérêt significatif dans une société énergétique.

Les opinions exprimées dans les publications du GWPF sont celles de leurs auteurs, et non celles des administrateurs, membres du Conseil consultatif académique ou des directeurs du GWPF.

THE GLOBAL WARMING POLICY FOUNDATION

Director

Benny Peiser

Honorary President

Lord Lawson

BOARD OF TRUSTEES

Terence Mordaunt (Chairman)

Dr Jerome Booth

Chris Gibson-Smith

Kathy Gyngell

Professor Michael Kelly

Dr Ruth Lea

Charles Moore

Baroness Nicholson

Graham Stringer MP

Lord Turnbull

ACADEMIC ADVISORY COUNCIL

Professor Christopher Essex (Chairman)

Sir Samuel Brittan

Sir Ian Byatt

Dr John Constable

Professor Vincent Courtillot

Christian Gerondeau

Professor Larry Gould

Professor Ole Humlum

Professor Gautam Kalghatgi

Professor Terence Kealey

Bill Kininmonth

Professor Deepak Lal

Professor Richard Lindzen

Professor Ross McKittrick

Professor Robert Mendelsohn

Professor Garth Paltridge

Professor Ian Plimer

Professor Gwythian Prins

Professor Paul Reiter

Dr Matt Ridley

Sir Alan Rudge

Professor Nir Shaviv

Professor Henrik Svensmark

Professor Anastasios Tsonis

Professor Fritz Vahrenholt

Dr David Whitehouse

RECENT GWPF REPORTS

10	Whitehouse	The Global Warming Standstill
11	Khandekar	The Global Warming-Extreme Weather Link
12	Lewis and Crok	Oversensitive
13	Lewis and Crok	A Sensitive Matter
14	Montford, Shade	Climate Control: Brainwashing in Schools
15	De Lange, Carter	Sea-level Change: Living with Uncertainty
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: El Niño and Natural Climate Change
27	Darwall	The Anti-development Bank
28	Booker	Global Warming: A Case Study in Groupthink
29	Crockford	The State of the Polar Bear Report 2017
30	Humlum	State of the Climate 2017
31	Darwall	The Climate Change Act at Ten
32	Crockford	The State of the Polar Bear Report 2018
33	Svensmark	Force Majeure: The Sun's Role in Climate Change
34	Humlum	State of the Climate 2018
35	Peiser (ed)	The Impact of Wind Energy on Wildlife and the Environment
36	Montford	Green Killing Machines
37	Livermore	Burnt Offering: The Biomess of Biomass
38	Kelly	Decarbonising Housing: The Net Zero Fantasy
39	Crockford	The State of the Polar Bear Report 2019
40	Darwall	The Climate Noose: Business, Net Zero and the IPCC's Anticapitalism

Pour plus d'informations sur le GWPF, veuillez visiter notre site Web à www.thegwpf.org.

Le GWPF est un organisme de bienfaisance enregistré avec le numéro 1131448.1131448.

