

L'état du climat mondial en 2018 : le rapport du GWPF (Global Warming Policy Foundation)

 climato-realistes.fr/etat-du-climat-en-2018-rapport-gwpf/

April 7,
2019

Par le GWPF (Global Warming Policy Foundation)

La *Global Warming Policy Foundation* a publié son rapport sur l'état du climat pour 2018. Rédigé par Ole Humlum, Professeur émérite à l'Université d'Oslo, ce rapport est un examen complet du climat mondial. Ci-dessous une traduction exhaustive de ce document de 50 pages.

Principales conclusions

1. Selon les relevés de température de la période instrumentale (depuis environ 1850), l'année 2018 a été l'une des années les plus chaudes jamais enregistrée, plus froide cependant que les années 2016 et 2017.
2. Fin 2018, la température moyenne de l'air dans le monde poursuivait sa baisse progressive vers le niveau qui caractérisait les années précédant le fort épisode El Niño 2015-16. Ce qui suggère que le pic de température de surface du globe de 2015-2016 a été causé principalement par ce phénomène océanographique du Pacifique. Cela suggère également que ce que l'on a appelé la pause des températures ou hiatus pourrait se poursuivre à l'avenir.
3. Il y a toujours un écart entre les températures moyennes de l'air estimées par les stations de surface et celles estimées par les satellites, les stations de surface mesurant des températures systématiquement plus élevées que les satellites. Cette divergence s'est accentué depuis 2003.
4. Les variations de température enregistrées dans la basse troposphère se retrouvent en général aussi à des altitudes plus élevées, de sorte que la pause des températures commencée en 2002 se constate à toutes les altitudes, y compris la tropopause et au-dessus, la stratosphère. Dans la stratosphère cependant, la pause de la température avait déjà commencé autour de 1995 soit 5 à 7 ans avant que celle-ci ne soit enregistrée dans la basse troposphère, près de la de la surface de la planète. La pause de la température stratosphérique dure maintenant sans interruption depuis environ 24 ans.
5. L'événement *El Niño* de 2015-2016 a été l'un des plus puissants depuis le début des observations en 1950. Cependant, si l'on considère tout l'historique, on constate que les alternances d'épisodes *El Niño* et *La Niña* ne sont pas rares.

6. Depuis 2004, date à laquelle les flotteurs Argo sont entrés en service, les océans de la planète se sont en moyenne quelque peu réchauffés au-dessus de 1900 m de profondeur. Le réchauffement maximal (entre la surface et 120 m de profondeur) a principalement affecté les océans situés près de l'équateur, là où le rayonnement solaire entrant est le plus important. En revanche, un refroidissement net a été observé dans l'Atlantique Nord depuis 2004.

7. Les données des marégraphes du monde entier donnent une élévation moyenne mondiale du niveau de la mer de 1-1,5 mm par an, alors que les mesures satellitaires suggèrent une augmentation d'environ 3,2 mm par an. L'écart entre ces deux ensembles de données n'a toujours pas reçu d'explication largement acceptée.

8. Depuis 1979, l'étendue de la banquise Arctique a diminué, tandis que celle de l'Antarctique a augmenté. A ces tendances générales se superposent toutefois des variations de plus courte durée, avec une périodicité de 5,3 ans pour l'Arctique, et d'environ 4,5 ans pour l'Antarctique. Ces deux cycles ont atteint leurs minima simultanément en 2016, ce qui explique le minimum de l'étendue globale des deux banquises. Une nouvelle phase de croissance de la banquise pourrait avoir déjà commencé dans les deux hémisphères.

9. L'étendue de la couverture de neige dans l'hémisphère Nord a subi d'importantes variations locales et régionales d'une année à l'autre. Toutefois, depuis 1972 l'étendue globale de la couverture neigeuse est stable.

10. Depuis 1970, les valeurs de l'énergie cyclonique accumulée (ACE) par les tempêtes tropicales et les ouragans ont affiché d'importantes variations d'une année à l'autre, mais globalement on n'observe aucune tendance générale à la baisse ou à la hausse de l'activité cyclonique. Il en va de même pour le nombre d'ouragans qui ont touché terre aux États-Unis qui sont répertoriés depuis 1851.

Panorama général de l'année 2018

Ce rapport met l'accent sur les observations et non sur les résultats des modèles numériques. Toutes les références et sources de données sont répertoriées à la fin du rapport.

Températures de l'air

L'année 2018 est la deuxième année qui a suivi le puissant El Niño 2015-2016. Par rapport aux températures enregistrées depuis 1850/1880, ce fût une année chaude, mais plus froide que les années 2016 et 2017. En 2018, la température mondiale moyenne a continué de

baisser pour se rapprocher du niveau des années précédant cet événement El Niño. Ainsi, le pic global de température de 2015-2016 semble pouvoir être attribué à ce phénomène océanographique cyclique.

De nombreuses régions arctiques ont connu des températures record en 2016, mais en 2017 comme en 2018, les conditions ont été généralement plus fraîches. Le pic de température arctique en 2016 pourrait bien avoir été dû à la libération de chaleur par l'océan Pacifique au cours de l'El Niño de 2015-2016, chaleur ensuite transportés dans la région arctique.

Dans ce rapport, de nombreux diagrammes se concentrent sur la période commençant en 1979, année du début de l'ère satellitaire depuis laquelle un large éventail d'observations, y compris les températures, est disponible avec une couverture presque mondiale. Ces données fournissent une vue détaillée des variations de température dans le temps à différentes altitudes de l'atmosphère et révèlent que, bien que la *pause* de la température de la troposphère inférieure ayant commencé vers 2002 soit largement reconnue, un plateau de température stratosphérique similaire a commencé en 1995, plusieurs années avant le début de la *pause* près de la surface de la planète.

La différence entre les températures atmosphériques mondiales moyennes estimées par les stations de surface (HadCRUT, NCDC et GISS) et par les satellites (UAH et RSS) perdure. Après le début de mesures en 1979, les températures satellitaires ont souvent (mais pas toujours) été sensiblement supérieures aux température moyennes estimées à partir des observations de surface. A partir de 2004, toutefois, l'estimation de la température des stations de surface a commencé à diverger des estimations basées sur les mesures satellitaires et sont maintenant en moyenne d'environ 0,1 ° C supérieures, même si en 2017, l'un des jeux de données satellitaires (RSS) a été ajusté et montre depuis lors des températures plus élevées que celles publiées précédemment.

Les températures de l'air mesurées près de la surface de la planète sont encore au cœur de nombreuses controverses, mais la signification de toute hausse ou baisse à court terme des températures de l'air en surface interprétée avec précaution. Chaque fois que la terre connaît des épisodes chauds *El Niño* ou froids *La Niña*, des échanges thermiques importants ont lieu entre l'océan Pacifique et l'atmosphère, désignées comme un signal de l'estimation de la température globale de l'air. Cependant, cela ne correspond pas à des changements dans le contenu thermique total du système atmosphère-océan. En fait, les changements nets globaux peuvent être faibles, et de tels échanges thermiques peuvent principalement refléter la redistribution de l'énergie entre océan et atmosphère. Il est donc tout aussi important d'évaluer la dynamique des températures océaniques que les variations de la température de l'air en surface.

Les océans

Le programme Argo a déjà assuré 14 ans de couverture mondiale, avec un niveau de couverture au départ relativement faible avec 1000 flotteurs dans le monde en 2004, puis plus de 3000 balises fin 2007, arrivant à environ 3900 flotteurs à l'heure actuelle. Le déploiement de nouveaux flotteurs se poursuit aujourd'hui au rythme de 800 par an. Depuis 2004, les flotteurs Argo 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 profond que 1900 m, et la série de données Argo soit encore relativement courte, plusieurs caractéristiques intéressantes apparaissent maintenant dans les données.

Depuis 2004, la couche de l'océan située au dessus de 1900 m de profondeur a connu en moyenne un réchauffement net. Le réchauffement maximum (0,08 à 0,15 ° C) affecte les 100 premiers mètres. Ce réchauffement est observé principalement les régions proches de l'équateur, où la plus grande quantité de rayonnement solaire est reçue. À une plus grande profondeur, un faible réchauffement net de 0,02 ° C a été enregistré entre 2004 et 2018 par les balises Argo.

Les changements de la température de l'océan dans le monde depuis 2004 affecte l'évolution des océans équatoriaux situés entre 30° N et 30° S qui, en raison de la forme sphérique de la planète, représentent une très grande surface. Simultanément cependant, les océans nordiques (55–65 ° N) ont en moyenne subi un refroidissement marqué jusqu'à 1400 m de profondeur et un léger réchauffement à des profondeurs supérieures. Les océans de l'hémisphère sud (55–65 ° S) ont connu en moyenne un léger réchauffement dans la plupart des profondeurs depuis 2004. Cependant, les moyennes peuvent être trompeuses et, bien souvent, de meilleures analyses sont obtenues en étudiant les détails, comme discuté plus loin dans ce rapport.

Les banquises

En 2018, l'étendue de la banquise mondiale est restée très inférieure à la moyenne de l'ère satellitaires (depuis 1979), mais avec une tendance à la hausse se manifestant au cours des deux dernières années. À la fin de 2016, l'étendue mondiale de banquise avait atteint un minimum marqué, au moins en partie à cause des cycles distincts de variation naturelle de la banquise dans les hémisphères nord et sud. Ces cycles ont eu des minima simultanés en 2016, avec pour conséquence un minimum de l'étendue globale des banquises arctique et antarctique. Un retournement de tendance, à savoir une plus grande étendue de glace aux deux pôles, semble déjà amorcé.

La couverture neigeuse

Les variations de la couverture neigeuse globale sont principalement causées par des changements dans l'hémisphère nord, où se trouvent toutes les grandes zones terrestres. L'étendue de la couverture neigeuse de l'hémisphère sud est essentiellement contrôlée par

la calotte glaciaire de l'Antarctique et est donc relativement stable. La couverture neigeuse moyenne de l'hémisphère Nord est également stable depuis le début des observations par satellite, bien que les variations interannuelles locales et régionales puissent être importantes. Les changements saisonniers depuis 1979 sont les suivants :

- l'étendue automnale est en légère augmentation ;
- l'étendue au milieu de l'hiver est en grande partie stable ;
- l'étendue au printemps est en légère diminution.

En 2018, l'étendue de la couverture de neige saisonnière de l'hémisphère Nord était proche de celle des années précédentes.

Le niveau de la mer

Le niveau de la mer est surveillé globalement par l'altimétrie satellitaire et par des mesures directes à partir des marégraphes le long des côtes. Les mesures par satellite suggèrent une élévation globale du niveau de la mer d'environ 3,2 mm par an, tandis que les données des marégraphes du monde entier suggèrent une élévation globale du niveau de la mer stable inférieure à 1,5 mm par an. Aucun des deux types de mesures n'indique une accélération récente de l'élévation du niveau de la mer. La différence marquée (rapport d'au moins 1 à 2) entre les deux ensembles de données n'a toujours pas reçu d'explication largement acceptée. Cependant, pour les besoins de la planification des côtes locales, ce sont les données des marégraphes qui sont pertinentes, comme indiqué plus loin dans ce rapport.

Tempêtes et ouragans

Les données les plus récentes (2017) sur l'énergie cyclonique accumulée par les tempêtes tropicales et les ouragans dans le monde (ACE) se situent bien dans la plage des valeurs observées depuis 1970. En fait, la série de données ACE affiche une variabilité temporelle, mais sans tendance claire vers une hausse ou une baisse de l'activité cyclonique. Une série de données ACE plus longue disponible pour le bassin atlantique (depuis 1850) suggère toutefois un rythme naturel d'environ 60 ans pour l'énergie cyclonique accumulée par les tempêtes tropicales et les ouragans mondiaux. En outre, les données récentes sur le nombre d'ouragans ayant *atterri* sur les côtes des États-Unis restent dans la moyenne de toute la période d'observation (1851-2017).

2. Les températures

Schéma spatial des températures de l'air en surface en 2018

En moyenne, la température de surface de l'air a été en 2018 proche de la moyenne des dix dernières années (figure 1a). Les deux années précédentes ont été affectées par un épisode El Niño dans l'océan Pacifique qui a culminé au début de 2016. En 2017, la température de surface de l'air était déjà à l'échelle de la planète, en train de chuter lentement vers son niveau d'avant 2015. Cela a continué tout au long de 2018.

En 2018, les températures de l'hémisphère Nord ont été marquées par des contrastes régionaux. L'évolution la plus marquée a été l'apparition d'une vaste zone relativement froide au Canada et au Groenland. L'ouest de la Russie a été également relativement froide en 2018. En revanche, la majeure partie de l'Europe, la Sibérie et l'Alaska, ont été marqués par des températures légèrement supérieures à la moyenne des 10 années précédentes. Près de l'équateur, la température de l'air de surface a été généralement inférieure ou inférieure à proche de la moyenne des 10 dernières années. C'est seulement dans le Pacifique occidental que les températures ont été relativement élevées (figure 1a). Dans l'hémisphère sud, la température de l'air en surface était proche ou inférieure à la moyenne des 10 dernières années. En particulier, l'océan Indien à l'ouest de l'Australie et dans l'Atlantique Sud, les températures ont été légèrement inférieures à la moyenne. cependant, à une latitude d'environ 50°S, les températures ont été relativement élevées dans l'Atlantique Sud et dans une partie de l'Océan Pacifique, affectant la température moyenne 2018 de la Nouvelle Zélande.

Dans l'Arctique, les températures de la zone Canada – Groenland ont été en 2018 inférieures à la moyenne (Figure 1b). En revanche, la Sibérie et l'Alaska ont connu des températures supérieures à la moyenne. La température de l'Arctique pour 2018 est toutefois dans une certaine mesure affectée par ce qui est probablement un artefact de l'algorithme utilisé pour interpoler les températures arctiques à partir de données sous polaires. Cela pourrait avoir donné lieu à un modèle de température circulaire artificiel au nord de 80° parallèle Nord. Le continent antarctique a été principalement caractérisé en 2018 par des températures supérieures à la moyenne, seule une partie de l'Antarctique occidental ayant connu des températures inférieures à la moyenne des 10 dernières années (figure 1c). Un artefact d'interpolation a probablement affecté la température au sud du 80° parallèle également.

En résumé, pour 2018, les températures moyennes de l'air à l'échelle mondiale se rapprochent lentement du niveau des années qui ont précédé le récent El Niño 2015-2016. Ainsi, le pic de température de l'air de surface de 2015-2016 semble avoir été principalement causé par ce phénomène cyclique.

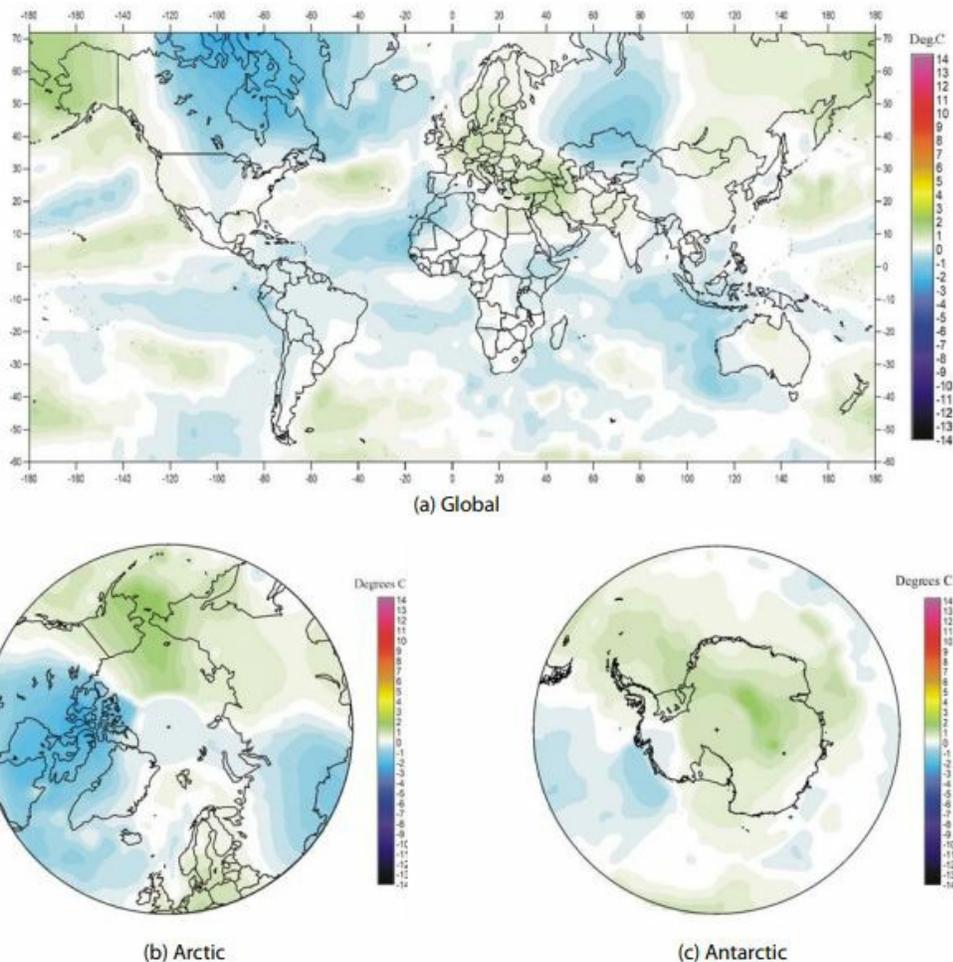


Figure 1: Températures de l'air en surface en 2018 par rapport à la moyenne des 10 dernières années. Les couleurs vert-jaune-rouge indiquent les zones où la température est supérieure à la moyenne, tandis que les couleurs bleues indiquent des températures inférieures à la moyenne. Source de données: Institut Goddard d'études spatiales (GISS) utilisant les températures de surface de l'océan HadI_Reyn_v2.

Température globale de l'air dans la basse troposphère depuis 1979

Les deux principaux jeux de données satellitaires des températures de la basse troposphère montrent clairement le pic de température associé au El Niño 2015-2016 suivi de la baisse progressive vers le niveau précédant l'événement (figures 2 et 3). Les données annualisées donnent les mêmes résultats (Figure 4). Les effets des El Niños de 1998, 2010 et 2015-2016 sont clairement visibles sur la Figure 3, de même que la tendance des El Niños à culminer pendant l'hiver de l'hémisphère Nord.

Une comparaison des derniers enregistrements (décembre 2018) et de mai 2015 (rouge) montre que quelques ajustements mineurs ont été apportés à la série UAH (Figure 2). En revanche, en 2017, la série RSS a fait l'objet d'ajustements importants provoquant une hausse (environ +0,1 ° C) à partir de 2002.

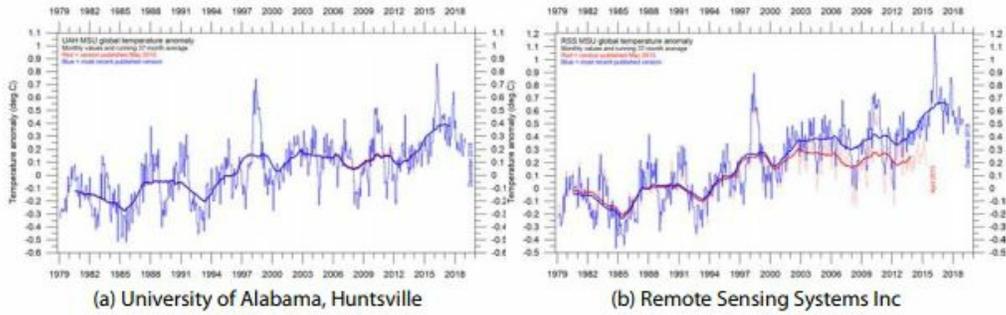


Figure 2: Températures moyennes mensuelles globales dans la basse troposphère depuis 1979. Ces enregistrements représentent des conditions à près de 2 km d'altitude. Dans chaque cas, la ligne épaisse correspond à la moyenne mobile simple des 37 derniers mois, correspondant approximativement à la moyenne mobile des 3 dernières années.

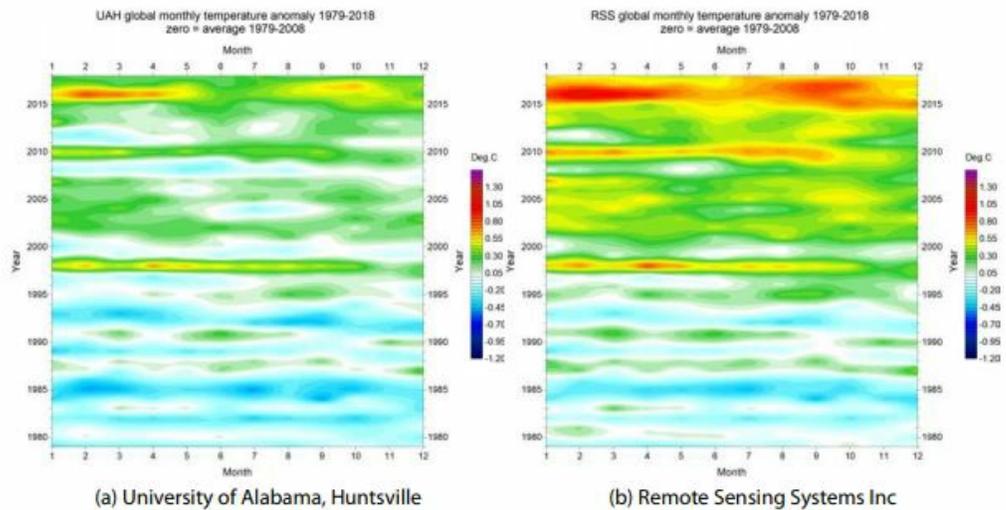


Figure 3: Développement temporel des températures de la basse troposphère. Données mensuelles, mondiales, 1979-2018. Les différentes bases de données de température utilisant différentes périodes de référence, les séries ont été rendues comparables en fixant à zéro leur moyenne individuelle sur 30 ans (1979-2008).

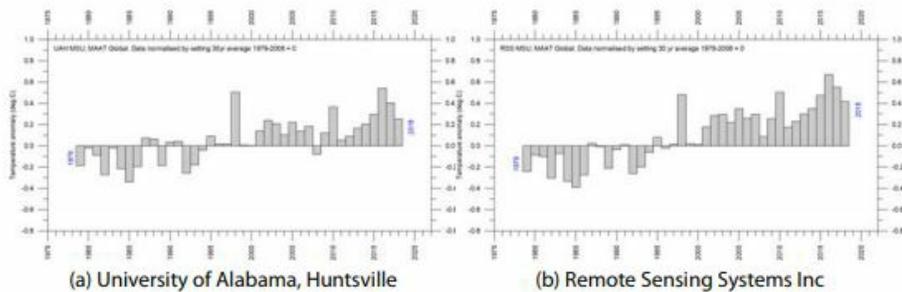


Figure 4: Températures mondiales moyennes annuelles de l'air dans la basse troposphère depuis 1979

Températures de l'air annuelles moyennes à la surface

Les trois enregistrements de température de l'air de surface montrent clairement le pic de température associé à El Niño 2015-2016 (figures 5 et 6). À la fin de 2018, cependant, la température globale baissait lentement vers le niveau général caractérisant la période précédant le *El Niño* récent.

En comparant l'enregistrement le plus récent (décembre 2018) et l'enregistrement de mai 2015 (rouge) on voit que relativement peu d'ajustements ont été apportés aux données HadCRUT, tandis que de nombreux et relativement substantiels changements ont été apportés aux enregistrements NCDG et GISS (figure 5). Les trois enregistrements de surface, cependant, confirment que le récent épisode El Niño a culminé au début de 2016 et que le retour ultérieur aux conditions antérieures a été graduel. Ceci est également démontré par les données annualisées (Figure 7). Les trois estimations moyennes de la température de l'air en surface indiquent que l'année 2016 sera la plus chaude enregistrée. Cependant, 2016 a été fortement influencée par le récent puissant épisode El Niño .

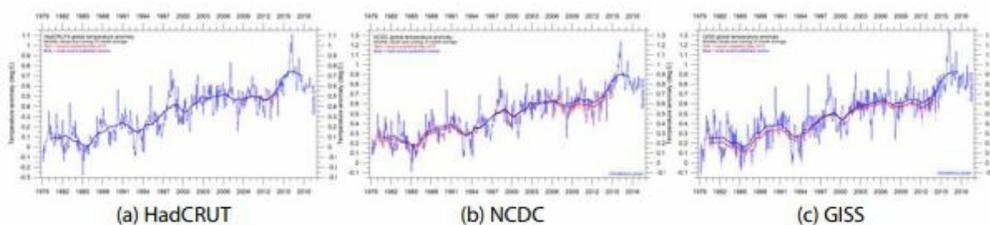


Figure 5: Température moyenne mensuelle de l'air à la surface de la planète depuis 1979. La ligne épaisse correspond à la moyenne simple des 37 derniers mois, correspondant à peu près à la moyenne des trois dernières années.

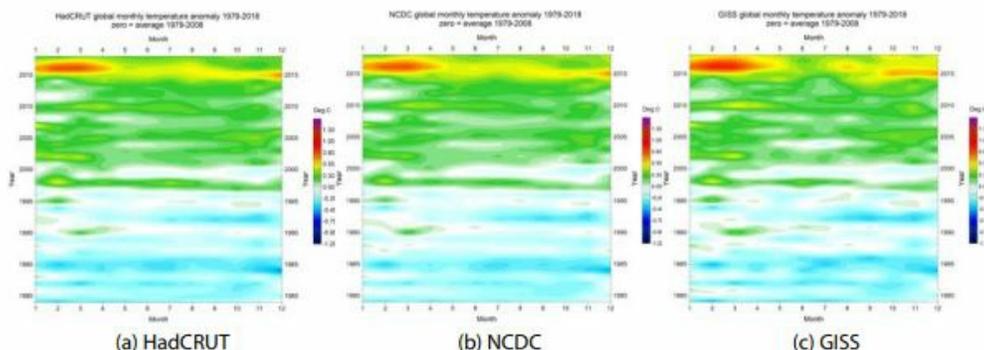


Figure 6: Évolution temporelle des températures de l'air en surface depuis 1979. Les différentes bases de données sur la température utilisant différentes périodes de référence, les séries ont été rendues comparables en fixant leur moyenne individuelle sur 30 ans (1979-2008) à zéro.

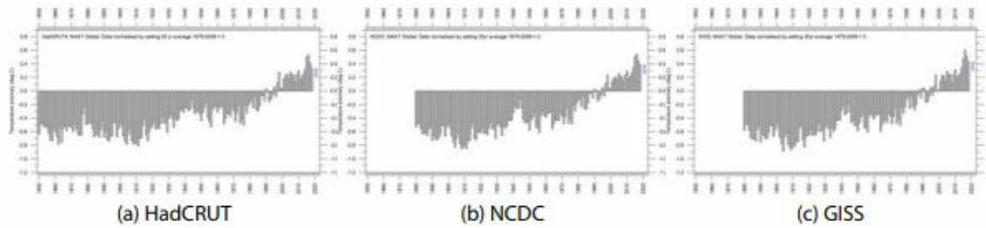


Figure 7: Température annuelle moyenne de l'air à la surface de la planète depuis 1979. Les différentes bases de données sur la température utilisant différentes périodes de référence, les séries ont été rendues comparables en fixant leur valeur moyenne individuelle sur 1979 à 2008 à zéro.

Comparaison des températures de la surface et de la basse troposphère

Il reste une différence entre les températures de l'air estimées par les stations de surface et celles des satellites, comme illustré par la figure 8. Au début des premières mesures effectuées par satellite à partir de 1979, les températures étaient souvent un peu plus élevées que celles estimées par les observations de surface. A partir de 2004, toutefois, les deux systèmes de mesure ont commencé à diverger, les stations de surface donnant des températures plus élevées que celles estimées par satellite. L'ajustement de l'enregistrement satellite RSS en 2017 a réduit cet écart par rapport à la situation des années précédentes.

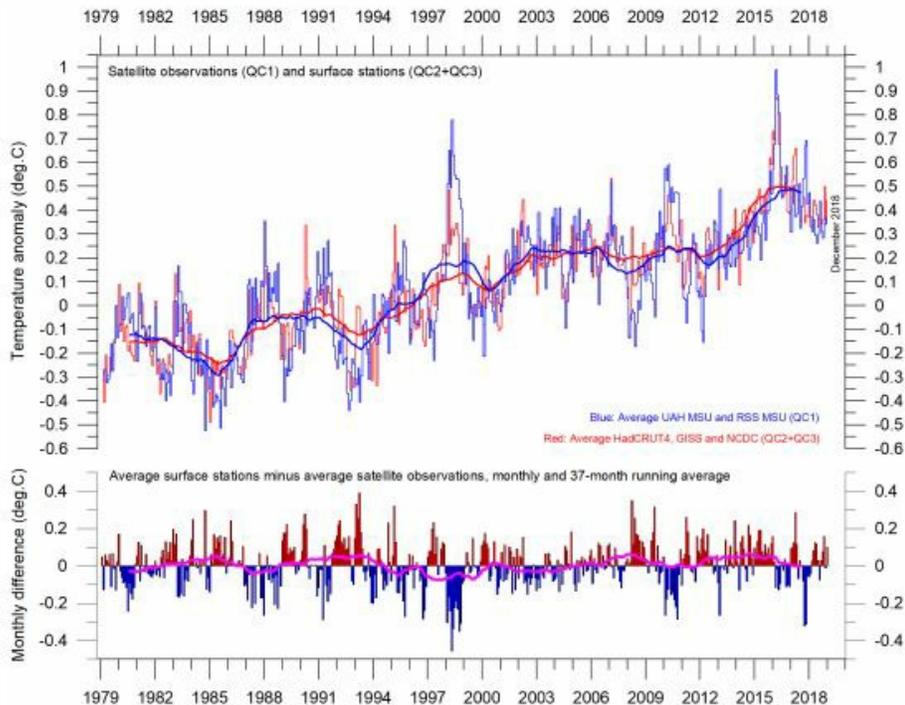


Figure 8: Comparaison de la basse troposphère et des températures de surface. En haut – la moyenne des enregistrements de surface (en rouge) par rapport à la moyenne des enregistrements satellites (en bleu); en bas, la différence entre les deux. Dans chaque cas, les lignes épaisses sont les moyennes simples sur 37 mois, correspondant presque à une moyenne sur 3 ans. Comme les périodes de base diffèrent 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.

Comparaison des températures de la basse troposphère sur les terres et les océans

Depuis 1979, les températures dans la basse troposphère ont augmenté davantage au-dessus des terres que des océans. Depuis environ 2006 spécialement, les températures enregistrées sur les terres sont constamment plus élevées qu’au-dessus des océans. Il peut y avoir plusieurs raisons à cela : variations d’ensoleillement, couverture nuageuse, changement de l’utilisation des terres, affectant principalement les continents. Cette évolution coïncide apparemment avec la divergence susmentionnée entre les observations de surface (évaluant des températures plus élevées que celles basées sur les observations satellitaires) (voir paragraphe précédent).

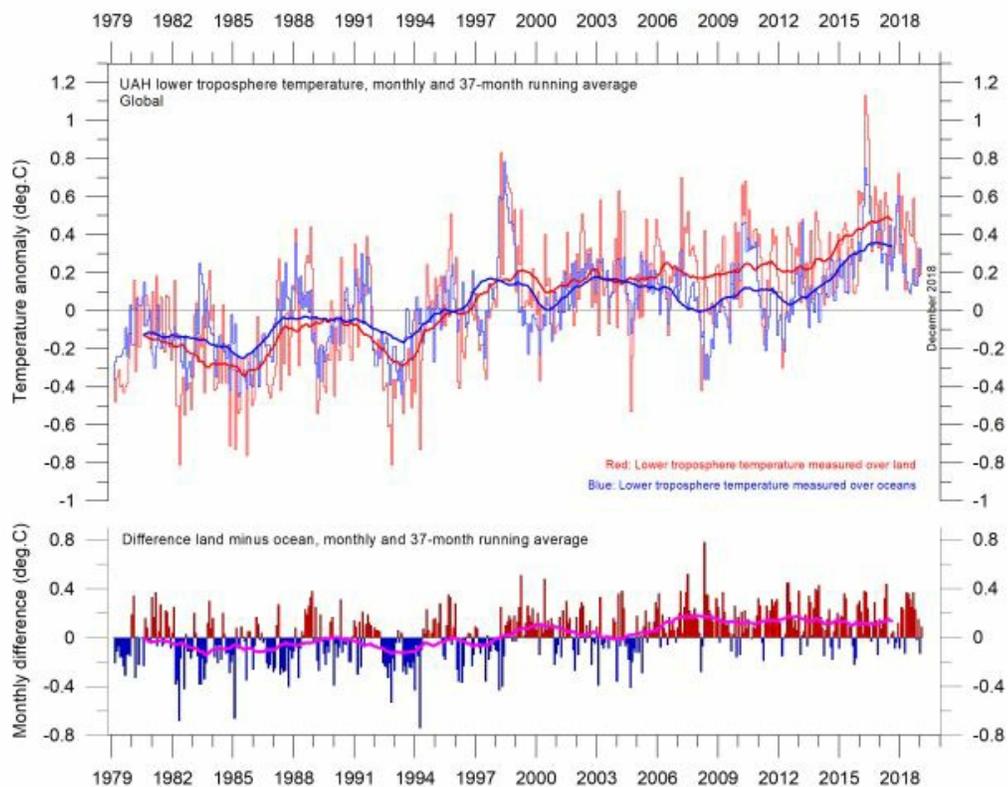


Figure 9: Comparaison des températures troposphériques au-dessus des terres et des océans. La moyenne mensuelle mondiale de la température de la basse troposphère depuis 1979 est mesurée sur les terres et les océans, respectivement en rouge et en bleu, selon

l'Université de l'Alabama à Huntsville (UAH), États-Unis. Les lignes fines représentent la moyenne mensuelle et les lignes épaisses, la moyenne courante des 37 derniers mois, ce qui correspond presque à la moyenne des trois dernières années.

Comparaison des températures atmosphériques de la surface à 17 km d'altitude

Les variations de température enregistrées dans la troposphère inférieure se retrouvent généralement à des altitudes plus élevées, jusqu'à environ 10 km (Figure 10).

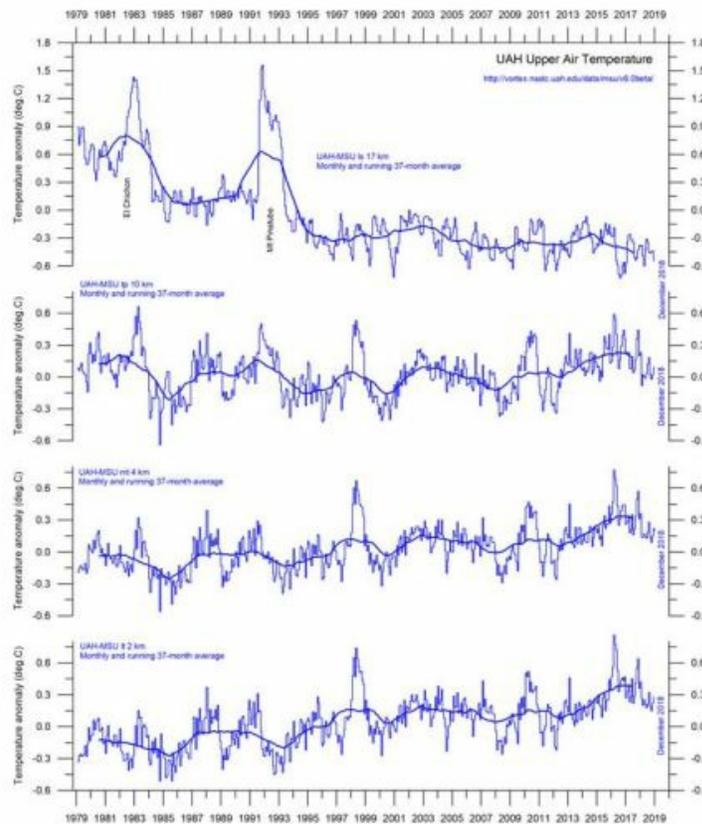


Figure 10: Températures à différentes altitudes. Température moyenne mensuelle mondiale à différentes altitudes selon l'Université de Alabama à Huntsville (UAH), États-Unis. Les lignes fines représentent la moyenne mensuelle et les lignes épaisses, la moyenne courante des 37 derniers mois, ce qui correspond presque à la moyenne des trois dernières années.

Le plateau de température global depuis environ 2002 s'observe à toutes ces altitudes. À haute altitude, près de la tropopause, un schéma de refroidissement de l'atmosphère peut encore être identifié, mais pour toute la période d'enregistrement des données (depuis 1979), aucune tendance à la hausse ni à la baisse des températures n'est perceptible. Plus haut, dans la stratosphère, à 17 km d'altitude, deux pics de température prononcés sont visibles avant le tournant du siècle. Ces deux pics peuvent être reliés à des éruptions volcaniques majeures, comme indiqué dans le diagramme. En ignorant ces pics, jusqu'en 1995 environ, les températures de la stratosphère montre un déclin persistant, attribué par

certaines scientifiques à l'effet de piégeage de la chaleur par le CO₂ dans la troposphère en dessous. Cependant, cette baisse de température se termine vers 1995-96, et depuis lors, un long plateau de température caractérise la stratosphère. Ainsi, la «pause» de la température stratosphérique a commencé 5 à 7 ans avant le début d'une «pause» similaire dans la basse troposphère.

Gaz à effet de serre atmosphériques : vapeur d'eau et dioxyde de carbone

La vapeur d'eau est le plus important gaz à effet de serre de la troposphère. La concentration la plus élevée se situe entre les latitudes allant de 50° Nord à 60° Sud. Les deux régions polaires de la troposphère sont par comparaison sèches.

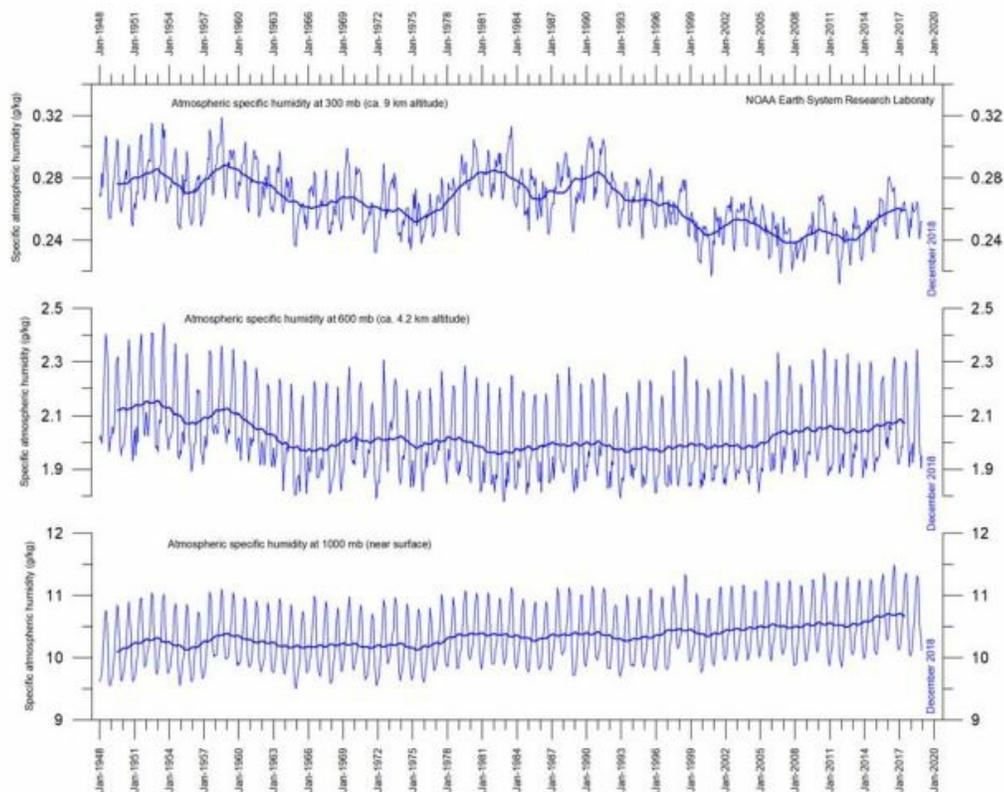


Figure 11: Humidité atmosphérique spécifique à trois altitudes différentes dans la troposphère. Les fines lignes bleues indiquent les valeurs mensuelles, tandis que les épaisses lignes bleues indiquent la moyenne des 37 derniers mois (environ 3 ans). Source de données: Laboratoire de recherche sur le système terrestre (NOAA).

L'humidité atmosphérique spécifique s'avère stable ou augmente légèrement jusqu'à environ 4 à 5 kilomètre d'altitude. A des niveaux plus élevés dans la troposphère (environ 9 km), l'humidité spécifique a diminué pendant la période d'observation (depuis 1948), mais avec des variations plus courtes superposées à cette tendance à la baisse. Une analyse par transformée de Fourier (non illustrée ici) montre que cette tendance est influencée

notamment par une variation périodique d'environ 3,7 ans. La diminution persistante de l'humidité spécifique à environ 9 km d'altitude est intéressante, car cette altitude correspond approximativement au niveau où l'effet théorique du dioxyde de carbone atmosphérique sur la température devrait initialement se manifester. Le dioxyde de carbone (CO₂) est un gaz à effet de serre important, bien que moins important que la vapeur d'eau.

Pendant la durée de la période des enregistrements des concentrations de CO₂ à Mauna Loa, une tendance à l'augmentation est visible, sur laquelle se superpose un cycle annuel (Figure 12a). À la fin de 2018, la quantité de CO₂ atmosphérique était légèrement inférieure à 410 parties par million (ppm). Généralement, le CO₂ est considéré comme un gaz relativement bien mélangé dans la troposphère.

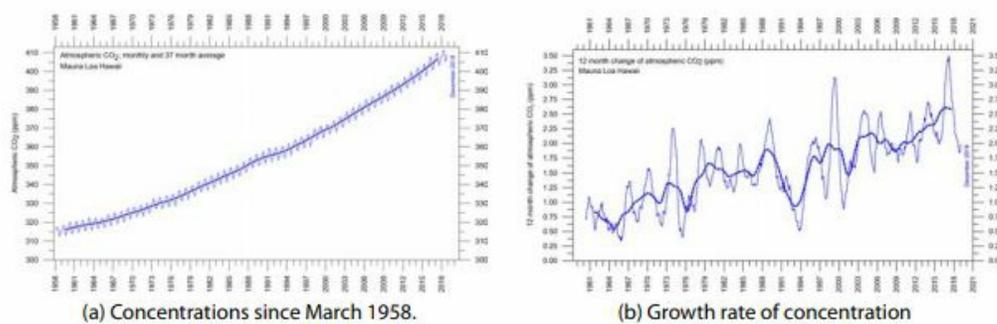


Figure 12: Evolution des niveaux de CO₂ dans l'atmosphère. Les lignes fines sont des valeurs mensuelles, alors que les lignes épaisses représentent une moyenne simple de 37 mois, ce qui correspond presque à une moyenne de 3 ans.

Le CO₂ troposphérique augmente d'environ +1 ppm par an dans la première partie de la période d'enregistrement, jusqu'à plus de +3 ppm par an vers la fin de la période d'enregistrement (Figure 12b). Une Analyse par transformée de Fourier (non illustrée ici) montre que le changement sur 12 mois du CO₂ troposphérique est influencé en particulier par des variations périodiques d'une durée de 2,5 et 3,8 années respectivement. Il est instructif de comparer la variation annuelle du taux de CO₂ avec celle de la température atmosphérique et celle de la température de surface de la mer (Figure 13). Ces trois jeux de données varient clairement simultanément, mais avec la températures de surface de la mer en avance de quelque mois sur la température mondiale, et de 11 à 12 mois pour le taux de changement pour CO₂ atmosphérique.

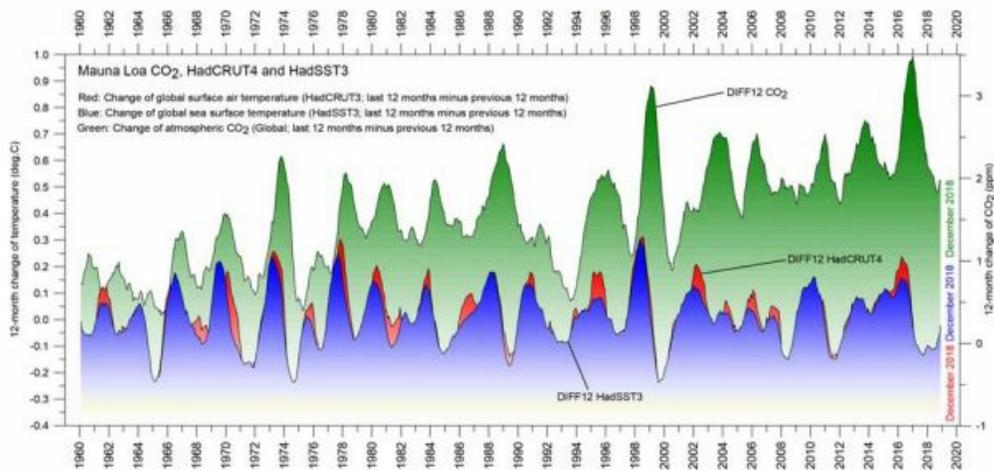


Figure 13: Changement annuel (sur 12 mois) de la concentration de CO₂ atmosphérique global (Mauna Loa; vert), de la température globale de la surface de la mer (HadSST3; bleu) et de la température globale de l'air en surface (HadCRUT4; en pointillé rouge). Tous les graphiques montrent les valeurs mensuelles de DIFF12, la différence entre la moyenne des 12 derniers mois et la moyenne des 12 derniers mois pour chaque série de données.

La figure 14 permet de visualiser la relation entre le changement annuel du CO₂ atmosphérique et les épisodes La Niña et El Niño, soulignant l'importance des changements océanographiques pour comprendre les changements dans la quantité de CO₂ atmosphérique.

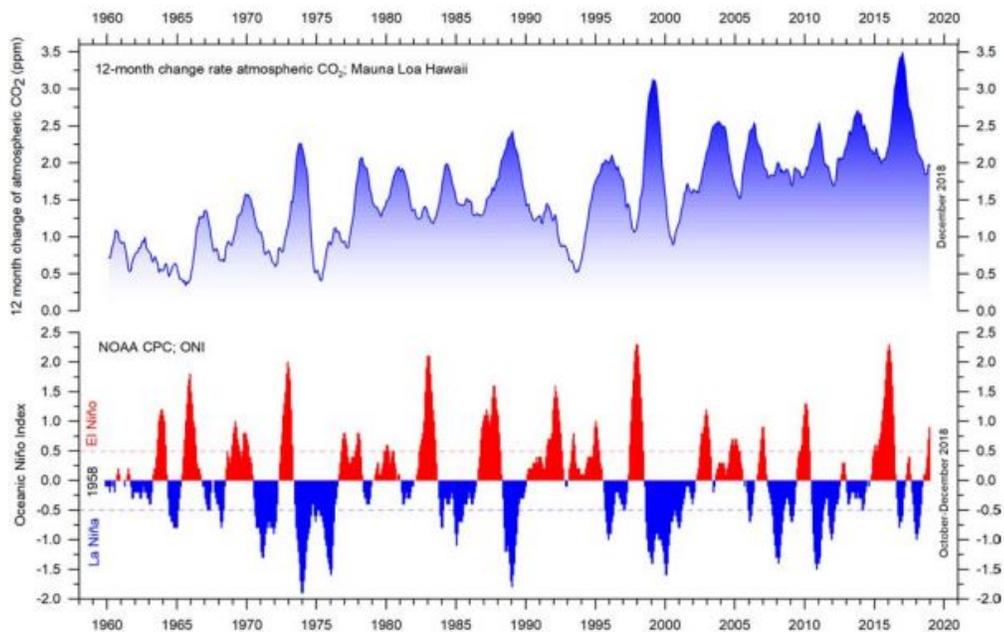


Figure 14: CO₂ et El Niño. Taux de croissance annuel du CO₂ atmosphérique (panneau supérieur) et de l'indice océanique de Niño (panneau inférieur). Voir aussi les figures 12 et 13.

Températures de surface zonales

Le graphique 15 montre que le réchauffement «global» observé après 1980 a été un phénomène qui a principalement marqué l'hémisphère Nord et s'est principalement traduit par un changement marqué entre 1994 et 1999. Ce changement de température apparemment rapide a toutefois été influencé par l'éruption du volcan Pinatubo de 1992-93 et par l'épisode *El Niño* de 1997.

Le diagramme montre également comment les effets sur la température des El Niños équatoriaux de 1997 et 2015-2016 se sont étendus aux latitudes supérieures des deux hémisphères. L'effet sur la température de *El Niño* a toutefois été principalement enregistré dans l'hémisphère Nord et seulement à moindre degré dans l'hémisphère sud.

Températures de l'air polaire

Dans la région arctique, le réchauffement a principalement eu lieu entre 1993 et 1995, et un peu moins par la suite (figure 16). Toutefois, en 2016, les températures ont culminé pendant plusieurs mois, probablement à cause de la chaleur océanique émise dans l'atmosphère lors du El Niño de 2015-2016 (voir également les figures 13 et 14) qui s'est propagée ensuite jusqu'aux latitudes plus élevées.

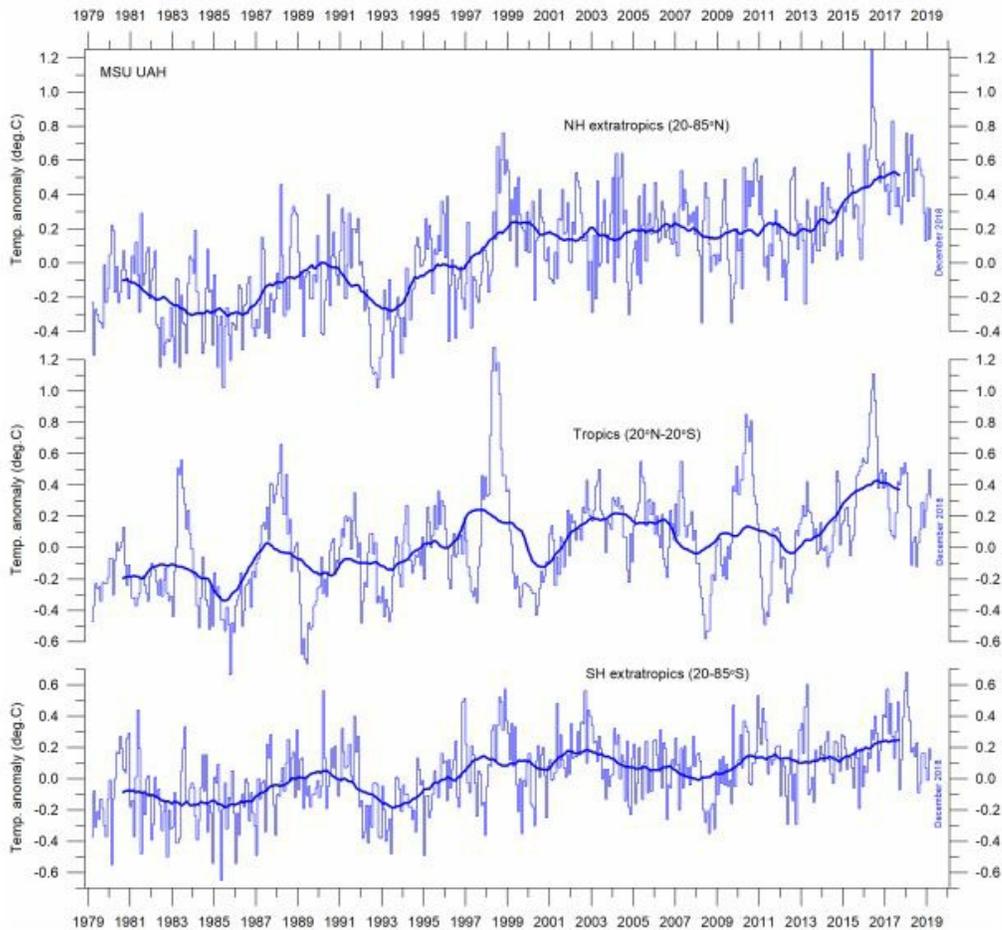


Figure 15: Le changement de température est un problème de l'hémisphère nord. Moyenne mensuelle mondiale de la température de la basse troposphère depuis 1979 pour les tropiques et les extra tropiques du nord et du sud, selon l'Université de l'Alabama à Huntsville, États-Unis. Les lignes épaisses correspondent à la moyenne courante simple sur 37 mois, ce qui correspond presque à la moyenne courante sur 3 ans.

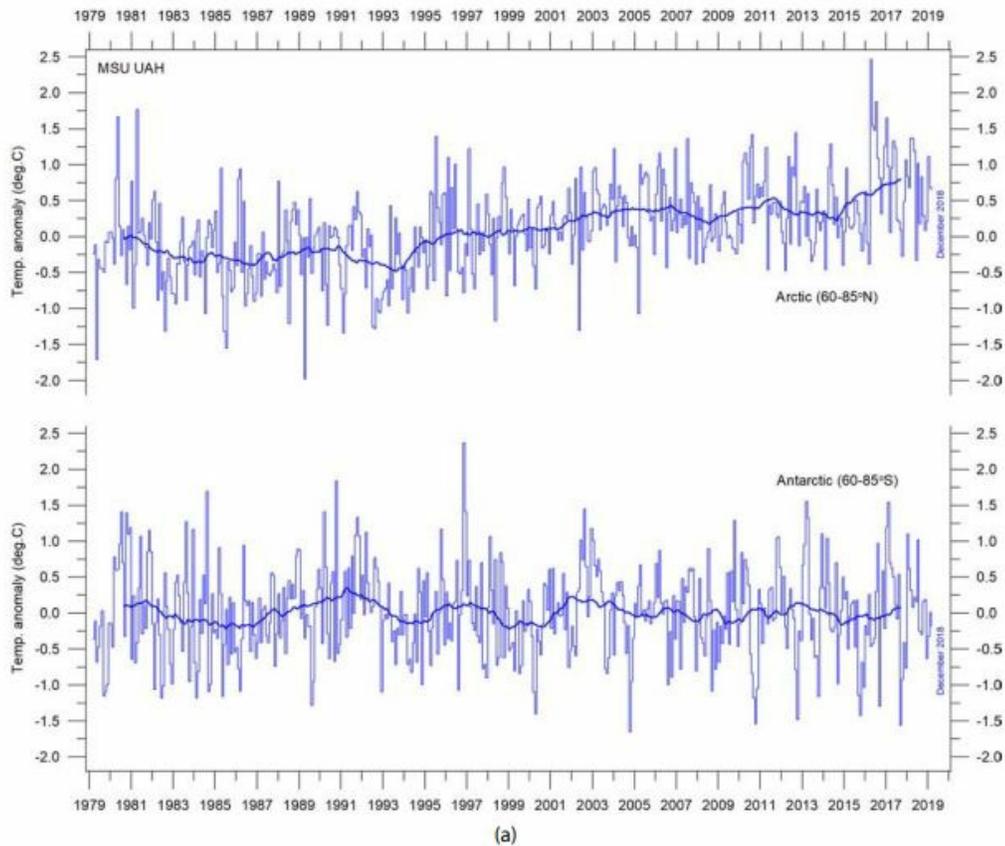
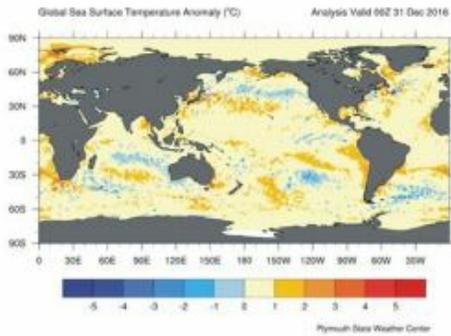


Figure 16: Températures de la basse troposphère pour les régions polaires. Moyenne mensuelle mondiale de la température de la basse troposphère depuis 1979 pour l'Arctique et l'Antarctique, selon l'Université de l'Alabama à Huntsville, États-Unis. Les lignes épaisses correspondent à la moyenne courante simple sur 37 mois, ce qui correspond presque à la moyenne courante sur 3 ans.

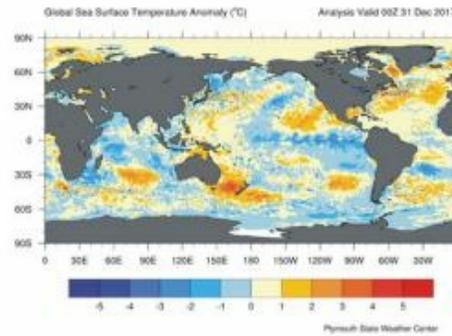
Dans la région antarctique, les températures sont restées presque stables depuis le début des enregistrements satellitaires en 1979. En 2016-17, un petit pic de température visible dans le relevé mensuel peut être interprété comme l'effet atténué du récent épisode *El Niño*.

Anomalies de température de surface de la mer au cours des trois dernières années

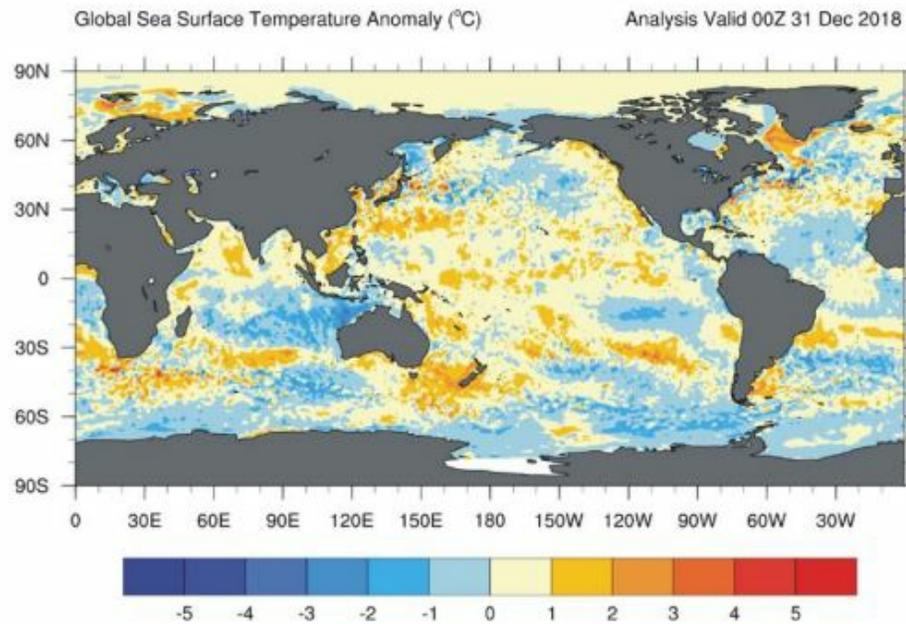
Les trois cartes de la figure 17 montrent la situation après le *El Niño* de décembre 2016, et la faible *La Niña* de décembre 2017 et l'évolution actuelle vers un (jusqu'à présent) faible *El Niño* fin décembre 2018. La figure 18 montre tous les épisodes *El Niño* et *La Niña* depuis 1950. Le récent épisode *El Niño* de 2015-2016 se classe parmi les plus puissants depuis le début des observations en 1950. Si l'on considère l'ensemble des épisodes connus, les récentes variations *El Niño* et *La Niña* ne semblent en aucun cas anormales.



(a) December 2016



(b) December 2017



(c) December 2018

Figure 17: Evolution récente des températures de surface de la mer. Anomalies de température de surface de la mer à fin décembre 2016, 2017 et 2018, respectivement (de haut en bas, en degrés C). Les cartes montrent l'anomalie actuelle (écart par rapport à la normale) de la température de surface des océans de la Terre. Période de référence: 1977-1991. Le gris foncé représente les zones terrestres. Source de la carte: Centre météorologique de l'État de Plymouth.

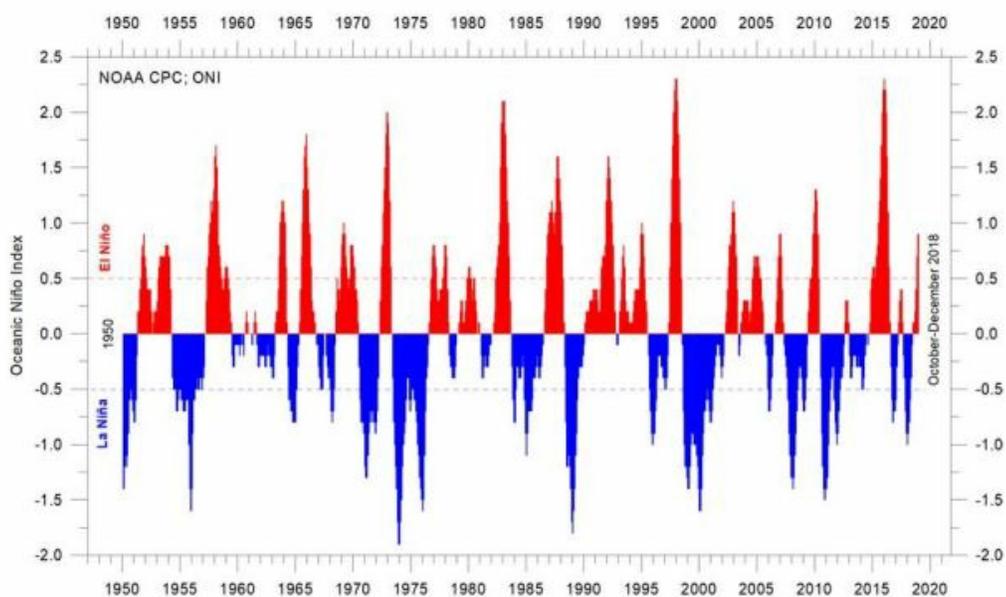


Figure 18: Données ENSO sur longue périodes. Épisodes chauds et froids de l'indice océanique de Niño (ONI), définis comme la moyenne mobile sur 3 mois des anomalies ERSSTv4 SST dans la région de Niño 3.4 (5 ° N-5 ° S, 120 ° -170 ° W). Les anomalies sont centrées sur des périodes de base de 30 ans mises à jour tous les 5 ans.

Températures globales moyennes à 1900 mètres de profondeur

La figure 19 montre que, en moyenne, la température des océans du globe jusqu'à 1900 m de profondeur a augmenté depuis environ 2011. En outre, on constate que cette augmentation depuis l'année 2013 est principalement due aux changements océaniques se produisant près de l'équateur, entre 30 ° N et 30 ° S. En revanche, pour les océans circum-arctiques au nord du 55° N, les températures en profondeur de l'océan ont diminué depuis 2011. Près de l'Antarctique, au sud du 55°S, les températures sont restées essentiellement stables. À la plupart des latitudes, une variabilité annuelle est clairement observée.

Températures globales de l'océan à différentes profondeurs

La figure 20 montre les températures océaniques moyennes mondiales à différentes profondeurs. La variabilité annuelle peut être décelée à environ 100 m de profondeur. Dans les 100 premiers mètres, les températures ont augmenté depuis environ 2011, encore que les eaux proches de la surface aient apparemment atteint un pic de température en 2016. À 200-400 m de profondeur, les températures ont peu varié pendant la période d'observation.

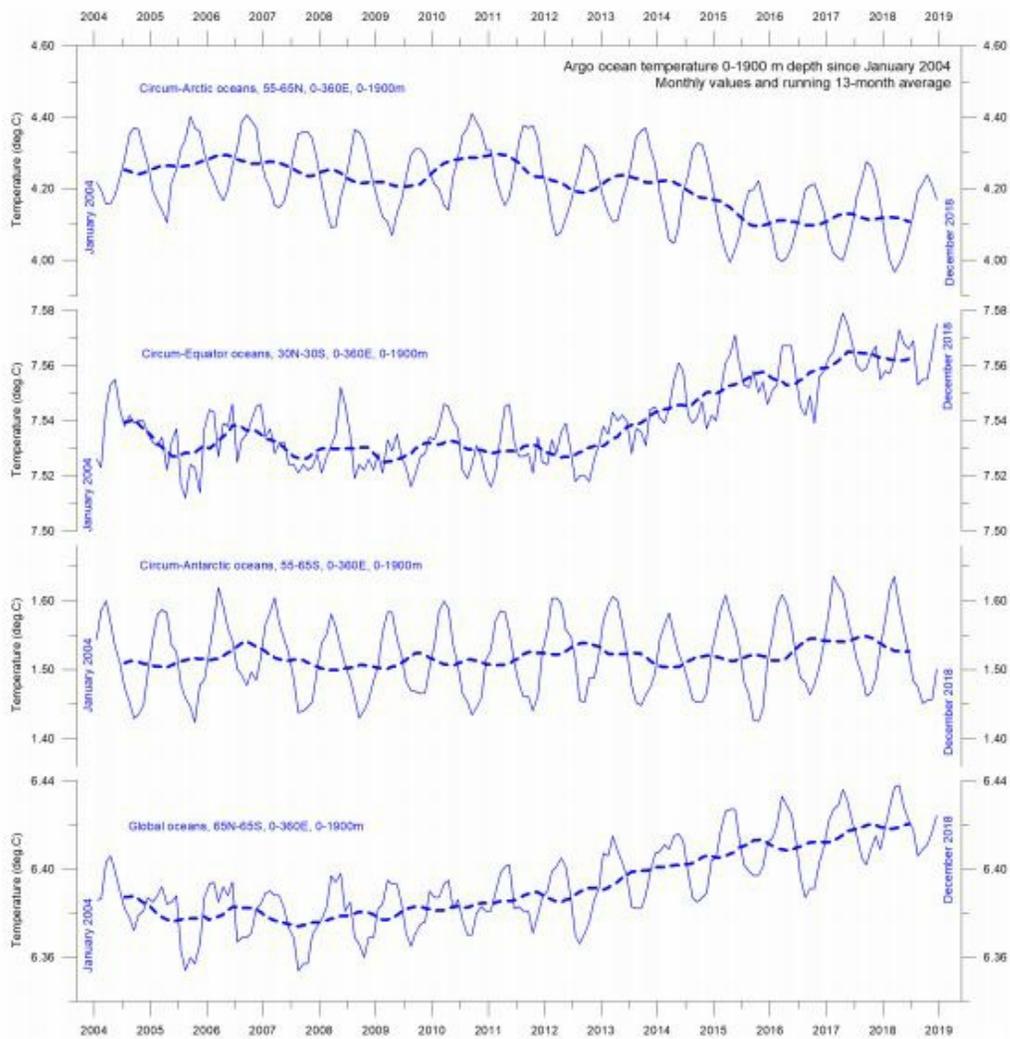


Figure 19: Variations de la température de l’océan dans différentes bandes de latitude. Températures océaniques moyennes de janvier 2004 à décembre 2018 à une profondeur de 0 à 1 900 m dans certaines bandes de latitude, à l’aide des données Argo (Roemmich et Gilson, 2009). La ligne mince montre les valeurs mensuelles et la ligne épaisse montre la moyenne des 13 derniers mois. Source: Global Marine Argo Atlas.

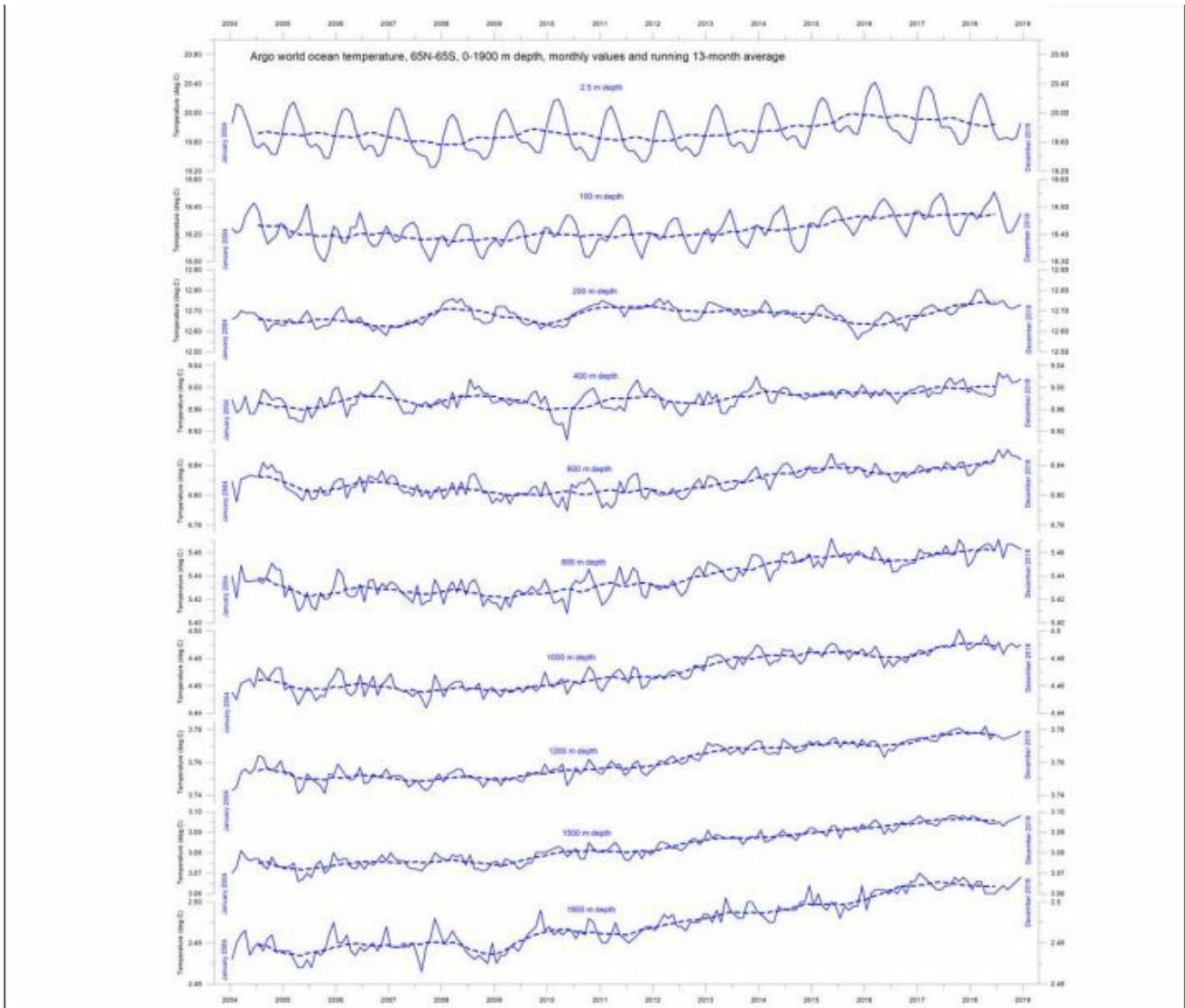


Figure 20: Températures océaniques à différentes profondeurs. Températures océaniques globales de janvier 2004 à décembre 2018 à différentes profondeurs comprises entre 65 ° N et 65 ° S, à l'aide des données Argo. La ligne mince affiche les valeurs mensuelles et la ligne en pointillé indique la moyenne des 13 derniers mois. Source: Global Marine Argo Atlas.

Pour les profondeurs d'eau supérieures à 400 m, toutefois, les températures ont augmenté entre 2004 et 2018. Le diagramme suggère que cette augmentation a commencé pour la première fois à 1900 m de profondeur autour de l'année 2009, et à partir de là, s'est progressivement propagée vers le haut. À 600 m de profondeur, l'augmentation de la température a commencé vers 2012, soit environ trois ans plus tard qu'à 1900 m de profondeur.

Le « timing » de ces changements dynamiques montrent que les températures moyennes dans la couche supérieure à 1900 m des océans sont non seulement influencées par les conditions régnant à la surface de l'océan ou à proximité, mais aussi par des processus intervenant à des profondeurs supérieures à 1900 m. Ainsi, une partie du réchauffement

actuel de l'océan semble être due à des caractéristiques de la circulation océaniques qui ne sont pas directement liées aux processus intervenant à (ou près) de la surface. Cette hypothèse est confirmée par la figure 21, qui montre le changement net de la température globale des océans à différentes profondeurs, calculé comme la différence nette entre les moyennes sur 12 mois de 2004 et 2018. Les changements nets les plus importants se seraient produit au dessus des 250 premiers mètres de la colonne d'eau. Cependant, bien que utiles, les valeurs moyennes montrées dans ce diagramme, masquent également de nombreuses disparités régionales, comme indiqué dans la prochaine section.

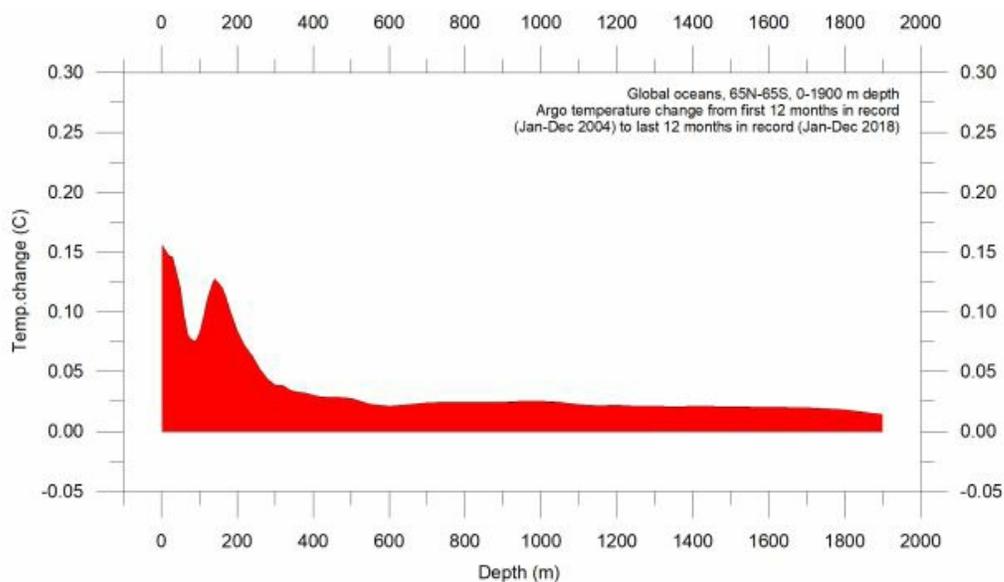


Figure 21: Variation de la température nette globale des océans depuis 2004, de la surface à 1900 m de profondeur. Source: Global Marine Argo Atlas.

Variation des températures régionales de 0 à 1900 m de profondeur

La figure 22 montre la variation en latitude des variations nettes de la température océanique de janvier à Décembre 2004 par rapport à janvier-décembre 2018 pour différentes profondeurs, calculées comme dans le diagramme précédent. Les trois graphiques montrent respectivement les changements nets dans les océans Arctique (55-65° N), équatorial (30N-30° S) et Antarctique (55-65° S). Le réchauffement maximum net de la surface (jusqu'à environ 150 m de profondeur) affecte les zones équatoriales et les océans antarctiques, mais pas les océans arctiques. En fait, un refroidissement net prononcé se constate à 1400 m de profondeur pour les océans du nord. Cependant, la majeure partie des terres émergées de la Terre se trouve dans l'hémisphère Nord, la surface (et le volume) de l'océan arctiques sont donc beaucoup plus petits que ceux de l'océan Antarctique, qui est à son tour 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 entre la variation nette de température enregistrée au cours de la période 2004-2018 pour les différentes bandes de latitude est instructif. Pour les deux océans polaires, les

données fournies par les balises Argo semblent démontrer l'existence d'une bascule bipolaire, comme décrit par Chylek et al. (2010). Non moins intéressant est le fait que la température de l'eau proche de la surface dans les deux océans polaires contraste avec la tendance générale à l'extension de la banquise dans les régions polaires (voir section 5).

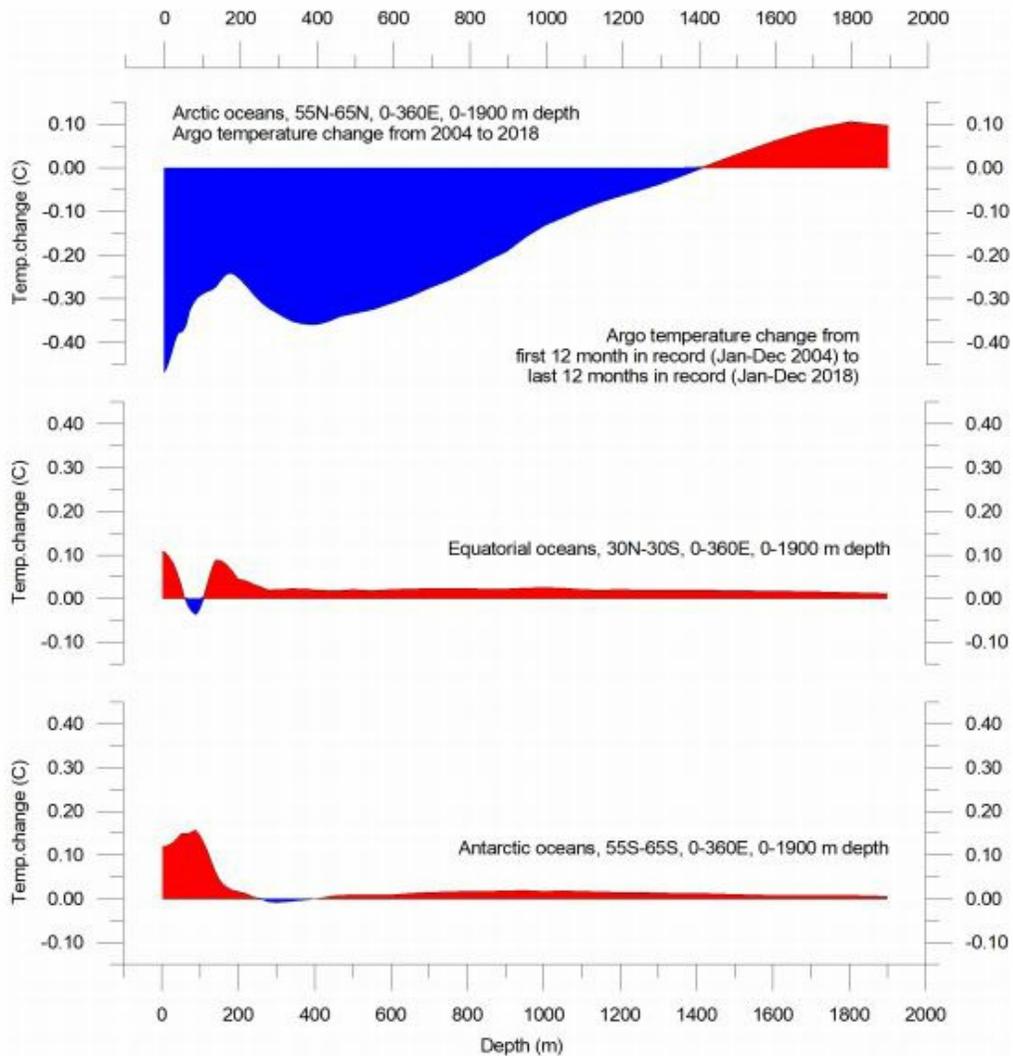


Figure 22: Changements régionaux de la température des océans. Changement de température nette depuis 2004 de la surface à 1900 m de profondeur dans différentes parties des océans du monde, en utilisant les données Argo. Source: Global Marine Argo Atlas.

Variation nette de la température des océans dans certains secteurs sur la période 2004-2018

Cette section examine les changements de température de l'océan le long de deux transects longitudinaux, à 20° W et 150° W, représentant respectivement les océans Atlantique et Pacifique, et une petite partie d'océan latitudinal, à 59 ° N, 30-0 ° W. Celles-ci sont illustrées à la figure 23.

Les deux diagrammes de l'océan Atlantique de la figure 24 illustrent les changements nets pour les périodes 2004-2017 et 2004-2018 le long du méridien 20° W, en utilisant les données obtenues à partir des flotteurs Argo. Pour établir les diagrammes, les températures moyennes annuelles des océans pour 2017 et 2018 ont été comparées à la moyenne annuelle de 2004, qui est la première année des enregistrements Argo. Pour donner une vue plus précise des changements les plus récents, la variation nette des températures moyennes annuelles est indiquée pour 2004-2017 (en haut) et 2004-2018. Les couleurs chaudes indiquent un réchauffement net de 2004 à 2017/18, et les couleurs bleues un refroidissement. En raison de la forme sphérique de la Terre, les zones septentrionales et les latitudes méridionales ne représentent que de petits volumes d'océan par rapport aux latitudes proches de l'équateur. Sous cette réserve, les diagrammes du transect Atlantique à 20° W révèlent néanmoins plusieurs caractéristiques intéressantes.

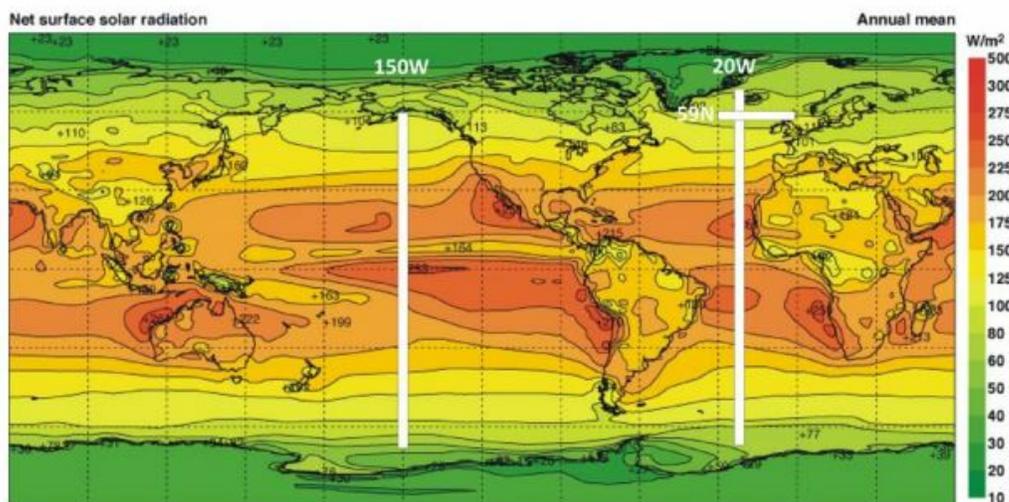


Figure 23: Carte montrant le rayonnement solaire annuel moyen à la surface et l'emplacement des trois profils décrits ci-dessous.

La caractéristique la plus importante du profil atlantique sur la période 2004-2018 (figure 24b) est un refroidissement net marqué à la surface au nord de l'équateur, et surtout au-delà du 30° N, où les couches profondes (jusqu'à 1500 m de profondeur) sont également impliquées. Au sud de l'équateur, le réchauffement domine à la surface, bien que le refroidissement prévale à une profondeur de 50 à 200 m. Le réchauffement maximum net de l'océan atlantique entre 2004 et 2018 s'est produit entre les latitudes 40 et 55° S, affectant la couche située au-dessus de 200 m de la colonne d'eau. Au-dessous de 200 m et au sud du 20° S, des profondeurs allant jusqu'à 1300 mètres ont connu un réchauffement net depuis 2004. Aux profondeurs supérieures à 1500 mètres, un léger réchauffement net s'est produit au nord de 30°N à la latitude 20° W. Le réchauffement de l'Atlantique Sud apparaît plus marqué dans la période 2004-2018 que ce n'était le cas dans la période 2004-2017. De plus, le refroidissement net au nord de 30° N est un peu moins prononcé en 2018 qu'en 2017.

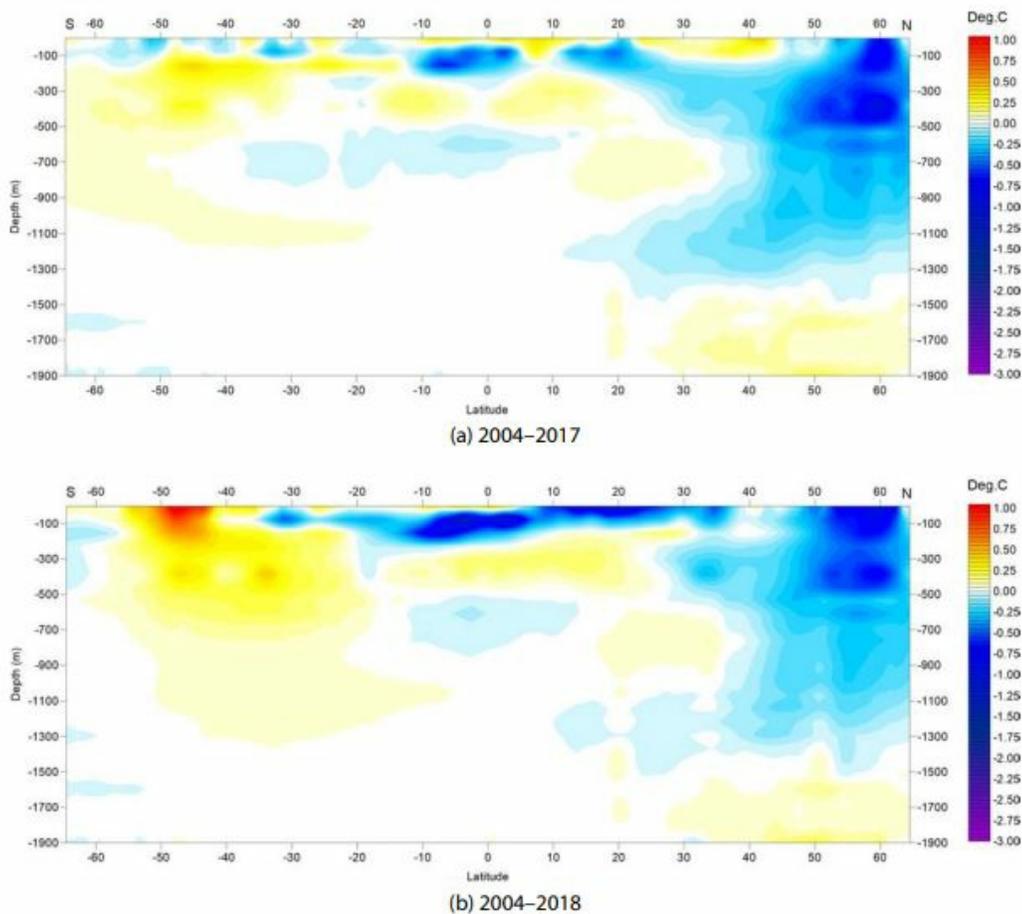


Figure 24: Changements de température dans l'océan Atlantique. Variation de la température nette depuis 2004 de 0 à 1 900 m de profondeur à 20 ° W, en utilisant les données Argo. Source: Global Marine Argo Atlas

La dynamique de la température affichée dans le transect à 59° N à travers le courant de l'Atlantique Nord, juste au sud des îles Féroé (Figure 25a) est particulièrement intéressante car d'une grande importance pour la météo et le climat d'une grande partie de l'Europe. Le diagramme ci-dessous montre une série chronologique à 59° N, aux longitudes allant du 30° à 0° Ouest, de 0 à 800 mètres de profondeur, représentant en gros une portion des masses d'eau affectées par le courant de l'Atlantique Nord. Les températures océaniques supérieures à 9° C sont signalées par des couleurs rouges.

Cette série temporelle, bien que relativement courte, présente également une dynamique intéressante. La prévalence d'eaux chaudes (supérieure à 9 ° C) a apparemment atteint un pic au début de 2006 ; elle a progressivement diminué jusqu'en 2016. Depuis lors, une reprise partielle de la température a eu lieu dans le secteur analysé. Le changement observé du pic au creux se produisant sur une période d'environ 11 ans ce qui pourrait éventuellement suggérer l'existence d'une variation de température d'environ 22 ans, mais nous devons attendre que la série Argo soit plus longue avant de pouvoir conclure quoi que

ce soit à ce sujet. La figure 25b présente la même série temporelle (59° N, 30-0 ° Ouest, 0-800 mètres de profondeur, 2004-2018) sous la forme d'un graphique de la température moyenne de l'océan.

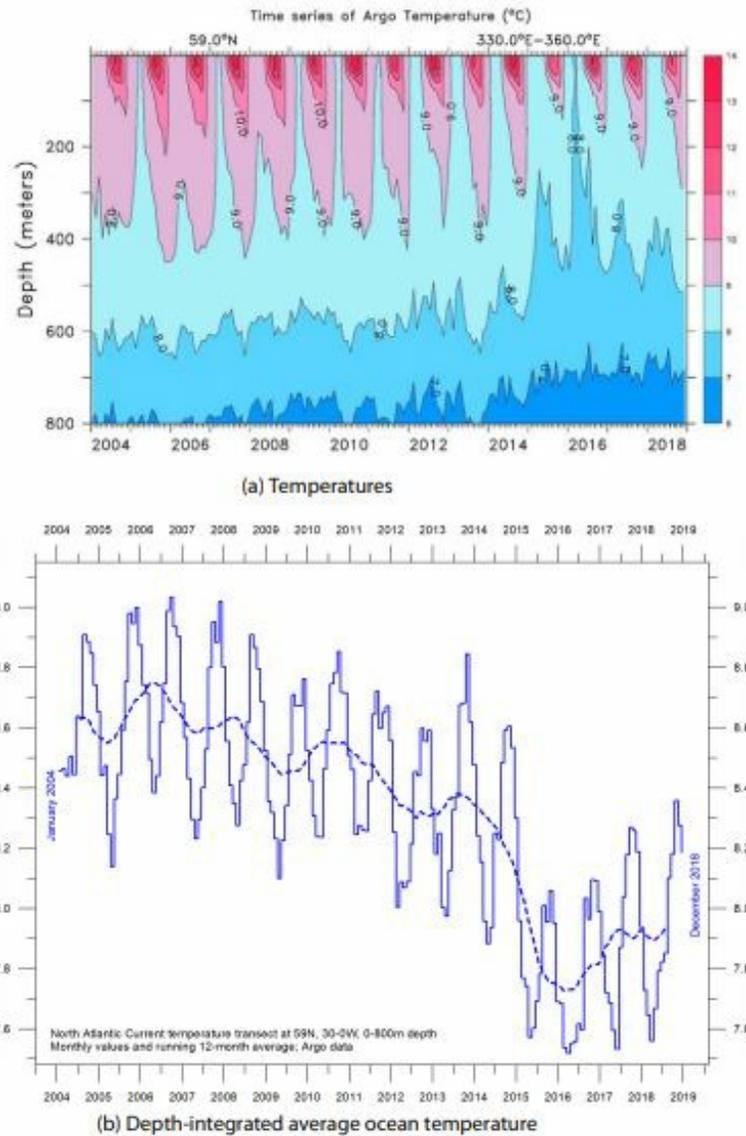


Figure 25: Variation de température le long de 59 ° N. Séries chronologiques depuis janvier 2004 de températures océaniques à 59 ° N, 30 à 0 ° W, de 0 à 800 m de profondeur, à l'aide de données Argo. Source: Global Marine Argo Atlas.

La figure 26 est la vue équivalente le long du transect pour l'océan Pacifique. Encore une fois, les latitudes nord et sud ne représentent que des volumes océaniques relativement faibles, par rapport aux latitudes près de l'équateur. Le trait le plus marquant pour 2018 est un refroidissement prononcé affectant presque toutes les profondeurs d'eau jusqu'à 1900 m au sud de 20° S.

Par rapport au diagramme représentant la période 2004-2017 le refroidissement devient plus prononcé et plus étendu. Le refroidissement net sur la période 2004-2018 est

particulièrement prononcé dans deux bandes situées à environ 500 m de profondeur, au sud et au nord de l'équateur (à 25° S et 20° N), respectivement. Le réchauffement net se produit dans deux bandes au nord et au sud de l'équateur, centré à 50° S et 50° N, affectant les couches d'eau jusqu'à environ 500 et 1000 m, respectivement.

Aucun des diagrammes longitudinaux ci-dessus pour l'Atlantique et le Pacifique ne montre dans quelle mesure les changements nets affichés sont causés par la dynamique des océans opérant à l'est et à l'ouest des deux profils considérés ; ils ne montrent que les changements nets 2004-2017/18 le long des longitudes choisies. Pour cette raison, les diagrammes ne doivent pas être surinterprétés. Les deux profils longitudinaux suggèrent un contraste intéressant, avec l'océan Pacifique se réchauffant principalement au nord de l'équateur et se refroidissant au sud, pendant que des tendances inverses caractérisent le profil de l'Atlantique: refroidissement au nord et réchauffement au sud.

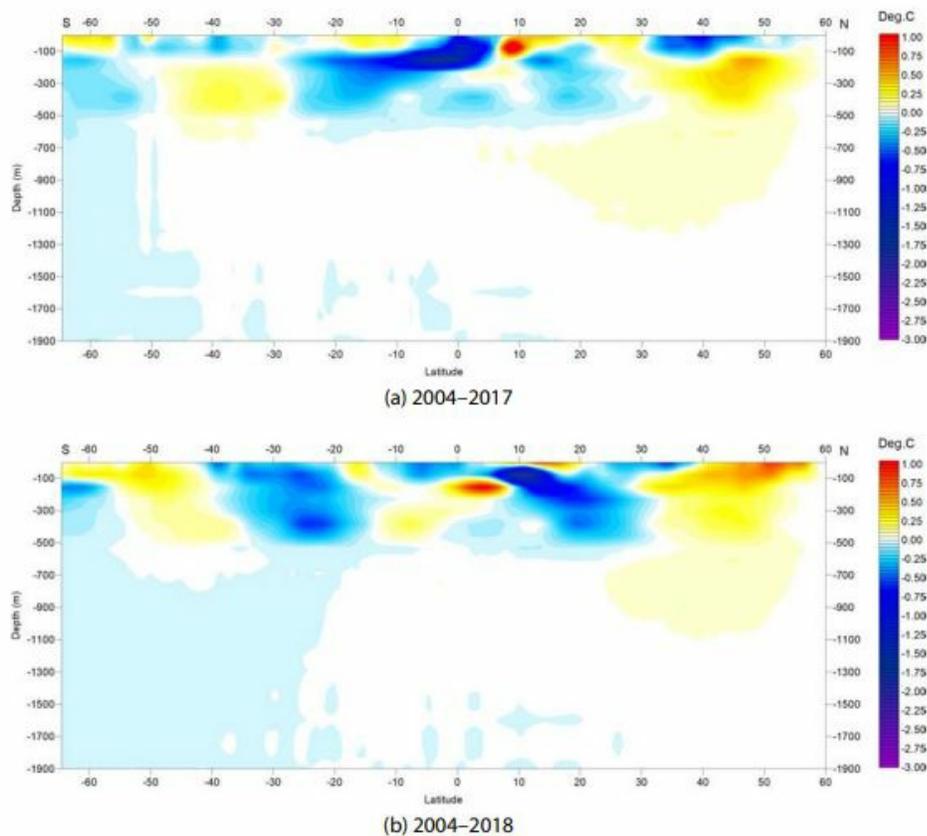


Figure 26: Changements de température dans l'océan Pacifique. Variation nette de la température depuis 2004 de 0 à 1 900 m à 150 ° W, en utilisant les données Argo. Source: Global Marine Argo Atlas.

3. Les oscillations océaniques

L'oscillation australe

L'indice d'oscillation australe SOI (Southern Oscillation Index) est calculé à partir des différences de pression atmosphérique mensuelles ou saisonnières entre Tahiti et Darwin. Des valeurs négatives soutenues indiquent souvent des épisodes El Niño. Ces valeurs négatives s'accompagnent généralement d'un réchauffement prolongé de l'océan Pacifique tropical central et oriental et d'une diminution de la force des vents alizés sur le Pacifique et d'une réduction des précipitations sur l'est et le nord de l'Australie. La figure 27 montre les valeurs annuelles du SOI depuis 1951.

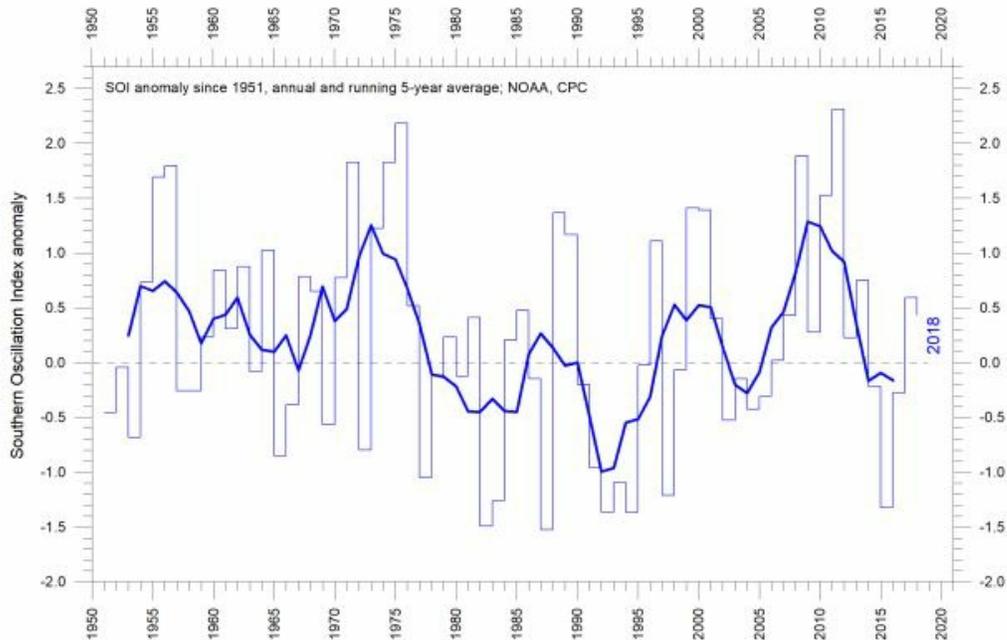


Figure 27: Anomalie de l'indice d'oscillation australe depuis 1951. La ligne mince représente les valeurs annuelles, tandis que la ligne épaisse correspond à la moyenne mobile courante sur 5 ans. Source: Centre de prévision du climat (CPC) de l'Administration océanographique et atmosphérique nationale (NOAA).

Les valeurs positives du SOI sont associées à des vents alizés plus forts dans le Pacifique et à des températures de surface de la mer plus élevées au nord de l'Australie, indiquant des épisodes *La Niña*. Les eaux de l'Océan Pacifique tropical central et oriental deviennent plus froides. L'Australie orientale et septentrionale reçoit généralement plus de précipitations pendant ces périodes.

L'Oscillation décennale du Pacifique

L'Oscillation Décennale du Pacifique PDO (Pacific Decadal Oscillation) (Figure 28) est une oscillation de longue durée sur le mode El Niño. Nous disposons sur la PDO des données remontant à janvier 1900.

Les causes de la PDO ne sont pas encore connues, mais même en l'absence de compréhension théorique, les prévisions climatiques saisonnières et annuelles sur l'Amérique du Nord s'améliorent en raison de sa persistance sur plusieurs saisons et plusieurs années. Comme le montre la figure 28, qui en présente 25, la PDO semble être approximativement en phase avec les changements de température globale. Ainsi, du point de vue des impacts sociétaux, la reconnaissance de la PDO est importante car elle montre que les conditions climatiques «normales» peuvent varier dans le temps à l'échelle d'une vie humaine.

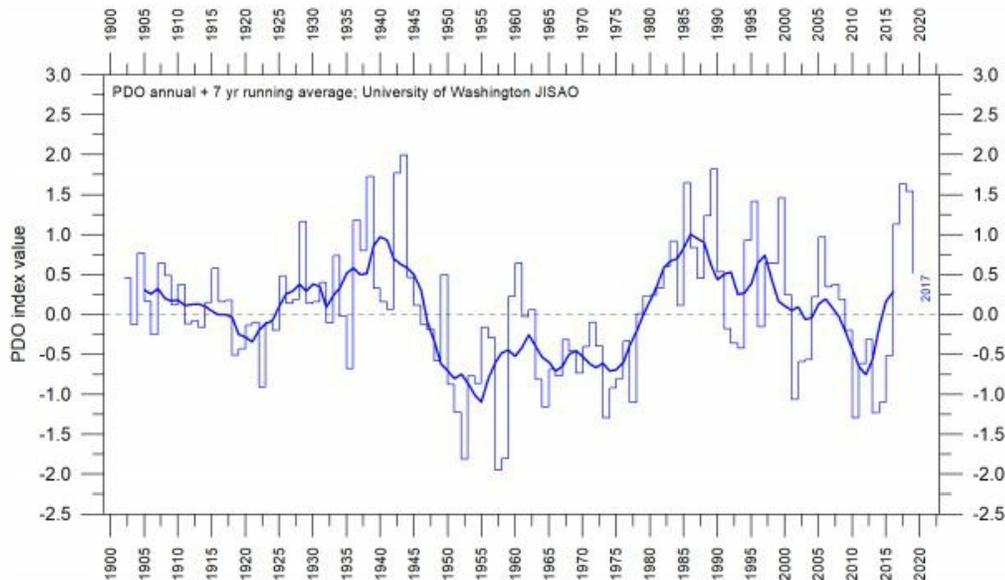


Figure 28: Valeurs annuelles de l'oscillation décennale du Pacifique. La ligne mince indique les valeurs annuelles de la PDO et la ligne épaisse correspond à la moyenne simple des 7 dernières années. Veuillez noter que la valeur annuelle de l'AOP n'est pas encore mise à jour au-delà de 2017. Source: Institut commun pour l'étude de l'atmosphère et des océans

Une transformée de Fourier (non illustrée ici) montre l'influence de cycles de 5,7 ans et possiblement aussi d'un cycle plus long d'environ 53 ans.

L'Oscillation multi décennale de l'Atlantique

L'oscillation multi décennale de l'Atlantique (AMO) est un mode de variabilité qui agit en Atlantique Nord. L'indice AMO qui est essentiellement un indice la température de la surface de la de l'Atlantique Nord est illustrée à la figure 29.

L'indice AMO semble être corrélé aux températures de l'air et aux précipitations sur la majeure partie de l'Hémisphère nord. La corrélation semble être forte également pour le nord-est du Brésil, les précipitations sur le Sahel et le climat estival nord-américain et

européen. L'indice AMO semble également être associé aux changements de 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 mis en relation avec la survenue passée des sécheresses majeures dans le Midwest et le sud-ouest américain. Lorsque l'AMO est élevé, ces sécheresses ont tendance à être plus fréquentes ou prolongées, et inversement pour les faibles valeurs de l'AMO. Deux des plus graves sécheresses du XXe siècle aux États-Unis correspondent à des valeurs maximales d'AMO entre 1925 et 1965: le *Dust Bowl* des années 1930 et les sécheresses des années 1950. Cela semble être le contraire en Floride et le nord-ouest du Pacifique où un indice AMO élevé est associé à des précipitations relativement fortes.

Une transformée de Fourier (non illustrée ici) montre que l'AMO est influencée par un cycle d'environ 67 ans et, dans une moindre mesure par un cycle de 3,5 ans.

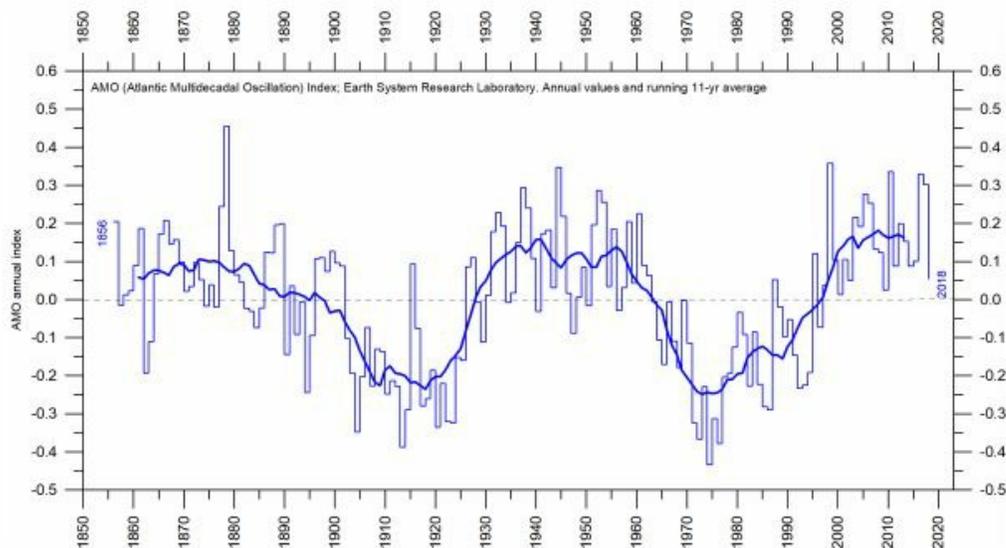


Figure 29: L'oscillation multi décennale de l'Atlantique. Valeurs indexées et non lissées depuis 1856. La fine ligne bleue indique les valeurs annuelles et la ligne épaisse correspond à la moyenne simple des 11 dernières années. Source de données: Laboratoire de recherche sur le système terrestre, NOAA, États-Unis.

4. Le niveau de la mer

Le niveau de la mer par altimétrie satellitaire

L'altimétrie par satellite est une méthode de mesure nouvelle et précieuse, fournissant des informations uniques sur la topographie de la surface des océans. Cependant, ce n'est pas un outil précis pour estimer les variations du niveau global de la mer en raison de plusieurs

hypothèses qui sont retenues lors de l'interprétation des données satellitaires brutes. L'une d'elles est l'ampleur de la correction apportée localement et régionalement pour l'ajustement isostatique glaciaire (GIA) (Figure 30). Le GIA est relatif aux transferts de masse des océans vers la terre à long terme et à grande échelle, prenant la forme d'épisodes de croissance et de décroissance des grandes calottes glaciaires du Quaternaire en Amérique du Nord et en Europe du Nord. Ces énormes transferts de masse provoquent des modifications périodiques de la charge en surface, entraînant un écoulement visco élastique du manteau et des effets élastiques sur la croûte supérieure. Aucune technique ni réseau d'observations unique ne peut fournir suffisamment d'informations sur tous les aspects et conséquences du GIA. Les hypothèses retenues pour l'interprétation des données altimétriques par satellite sont donc difficiles à vérifier. La correction GIA introduite dans l'interprétation des données brutes de l'altimétrie satellitaire dépend du type de modèle utilisé pour l'évaluation de la déglaciation (pour la dernière glaciation) et l'analyse croûte-manteau. Pour cette raison (à laquelle s'ajoutent d'autres facteurs), les évaluations de l'élévation du niveau de la mer basées sur l'altimétrie par satellite varient d'environ 1,7 mm par an à environ 3,2 mm par an.

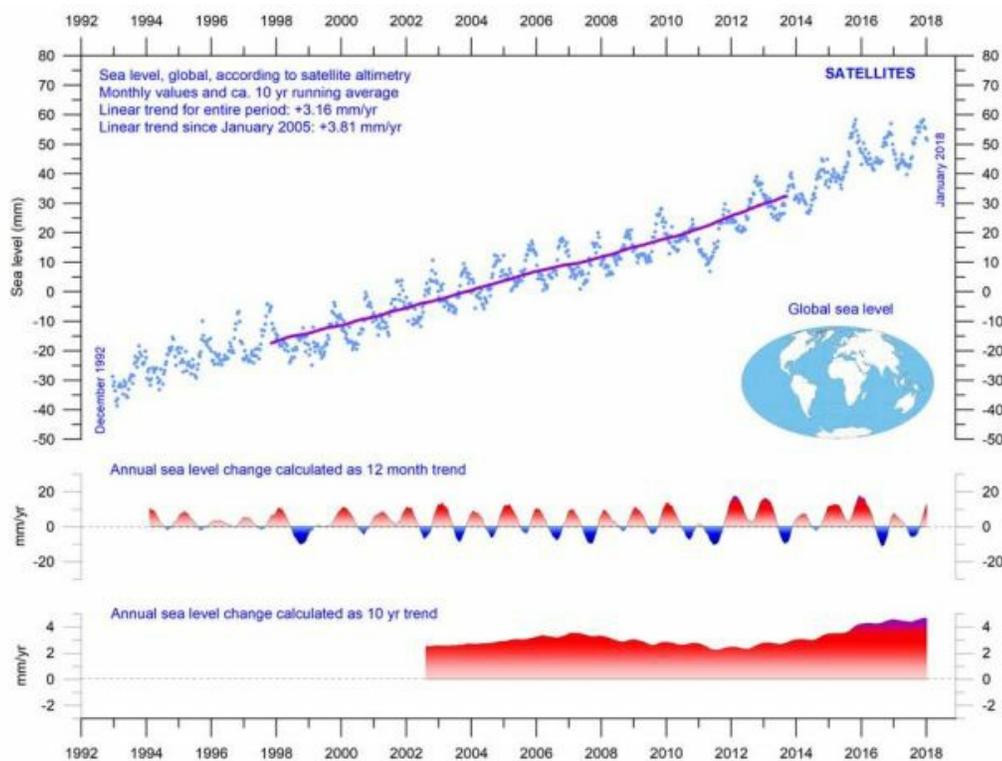


Figure 30: Evolution globale du niveau de la mer depuis décembre 1992. Les points bleus représentent les observations individuelles et la ligne violette représente la moyenne mobile sur 121 mois (environ 10 ans). Les deux cartouches inférieures indiquent le changement annuel du niveau de la mer, calculé respectivement pour les fenêtres temporelles de 1 et 10 ans. Ces valeurs sont tracées à la fin de l'intervalle considéré. Source: Centre de recherche sur l'astrodynamique du Colorado à l'Université du Colorado à Boulder.

Niveau de la mer à partir des marégraphes

Les marégraphes qui sont situés directement sur les sites côtiers enregistrent le mouvement net de la surface de l'océan local par rapport à la terre. Les mesures du changement relatif du niveau de la mer relatif local (Figure 31) sont vitales pour la planification côtière et les données marégraphiques sont donc directement utilisables pour la planification des installations côtières, contrairement à celles fournies par l'altimétrie satellitaire.

Le mouvement net mesuré du niveau de la mer local est composé de deux composantes locales :

- le changement vertical de la surface de l'océan ;
- le changement vertical de la surface du sol.

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 le sol s'enfonce de 2 mm par an, l'élévation réelle du niveau de la mer n'est plus que de 1 mm par an. Dans l'optique de l'étude du changement du niveau de la mer, c'est la valeur de 1 mm par an qui est pertinente, mais pour les besoins de la planification côtière locale, c'est la valeur de 3 mm par an obtenue par le marégraphe classique qui est la donnée utile pour les autorités locales. Pour construire des séries chronologiques de mesures du niveau de la mer de chaque marégraphe, les moyennes mensuelles et annuelles doivent être réduites à un dénominateur commun. Cette réduction est effectuée par le Service permanent du niveau moyen de la mer (PSMSL) en utilisant l'historique des marégraphes fourni par l'autorité nationale concernée. La référence locale révisée (RLR) de chaque station est définie comme se situant à environ 7 000 mm sous le niveau moyen de la mer. Ce choix arbitraire a été fait il y a de nombreuses années afin d'éviter des nombres négatifs dans les valeurs moyennes mensuelles et annuelles du RLR obtenues. Peu de lieux sur Terre sont complètement stables et la plupart des marégraphes sont situés sur des sites exposés à un soulèvement tectonique ou à un enfoncement (le changement vertical de la surface du sol). Cette instabilité verticale généralisée a plusieurs causes, mais elle affecte bien sûr l'interprétation des données des marégraphes individuels, bien que beaucoup d'efforts soient déployés pour corriger ces effets. Les données des marégraphes situés sur des sites tectoniquement stables sont donc d'un intérêt particulier pour l'estimation du changement réel du niveau de la mer à court et à long terme. Un exemple de longue durée obtenue à partir d'un tel site est présenté dans le diagramme ci-dessous (Figure 32). Cet enregistrement indique une élévation stable du niveau de la mer d'environ 0,84 mm par an, sans indication d'accélération récente.

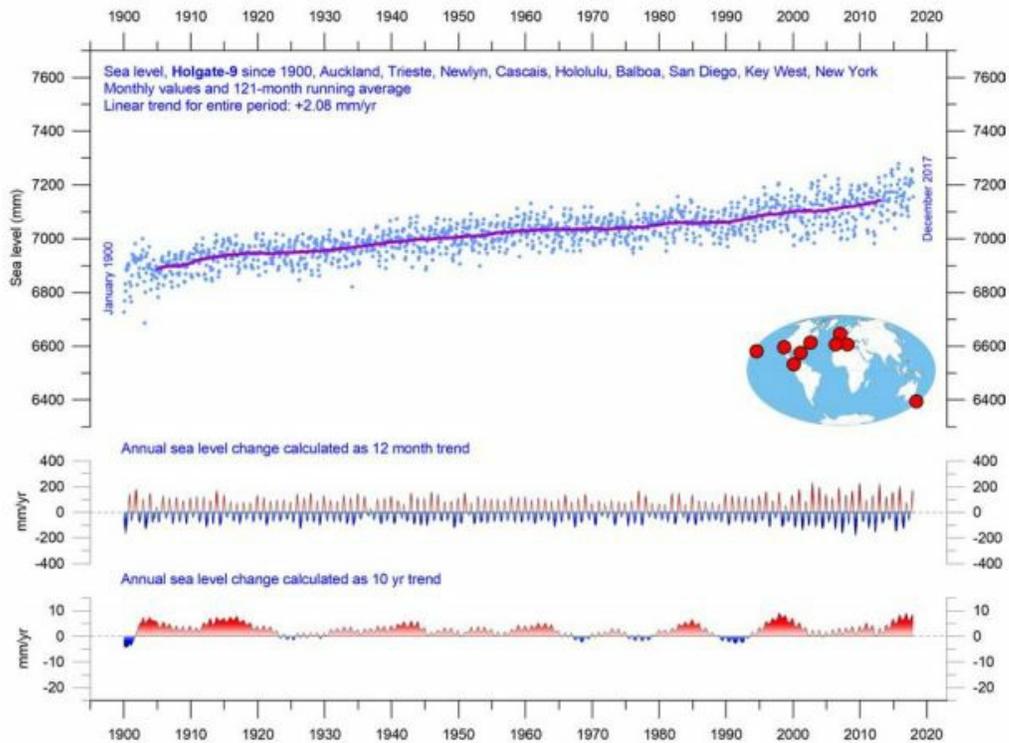


Figure 31: Enregistrements mensuels des marégraphes Holgate-9. Holgate (2007) suggère que les neuf stations répertoriées dans le diagramme rendent compte de la variabilité observée dans un plus grand nombre de stations au cours des cinquante dernières années étudiées précédemment. Pour cette raison, il est intéressant de suivre les valeurs moyennes du groupe de stations marégraphiques Holgate-9. Les points bleus représentent les observations mensuelles moyennes individuelles et la ligne violette représente la moyenne cumulée des 121 mois (environ 10 ans). Les deux panneaux inférieurs indiquent le changement annuel du niveau de la mer, calculé respectivement pour les fenêtres temporelles de 1 et 10 ans. Ces valeurs sont tracées à la fin de l'intervalle considéré. Données de PSMSL Data Explorer.

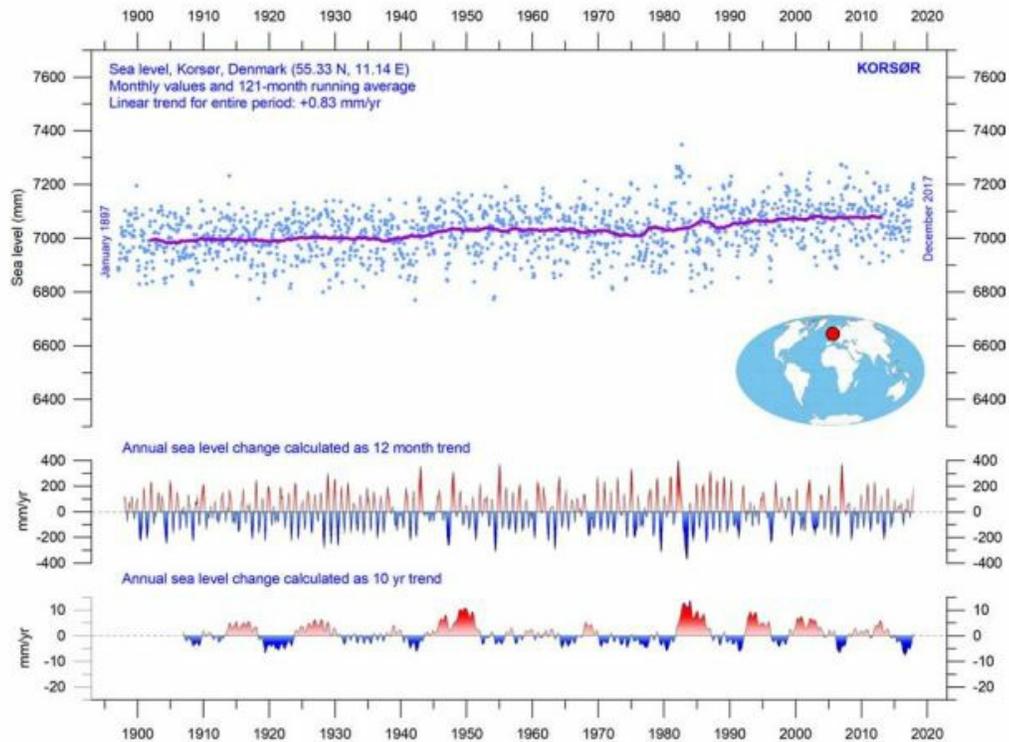


Figure 32: Données marégraphiques mensuelles de Korsør (Danemark). Les points bleus représentent les observations mensuelles individuelles et la ligne violette représente la moyenne mobile sur 121 mois (environ 10 ans). Les deux cartouches inférieures indiquent le changement annuel du niveau de la mer, calculé respectivement pour les fenêtres temporelles de 1 et 10 ans. Ces valeurs sont tracées à la fin de l'intervalle considéré. Données de PSMSL Data Explorer.

Les données des marégraphes du monde entier suggèrent une élévation moyenne du niveau de la mer se situant entre 1 et 1,5 mm par an, alors que l'altimétrie satellitaire (Figure 30) suggère une augmentation de 3 mm par an, ou plus. La différence notable (rapport d'au moins 1 à 2) entre les deux ensembles de données n'a pas reçu d'explication largement acceptée.

5. La cryosphère

Étendue mondiale des banquises arctique et antarctique

Les deux graphiques de l'étendue moyenne de la glace de mer sur 12 mois représentés à la figure 33 illustrent l'évolution contrastée des hémisphères nord et sud. Le graphique bleu montre clairement la tendance à la réduction de l'étendue de la banquise dans l'hémisphère Nord, et la tendance simultanée à l'augmentation de l'étendue de la banquise dans l'hémisphère Sud.

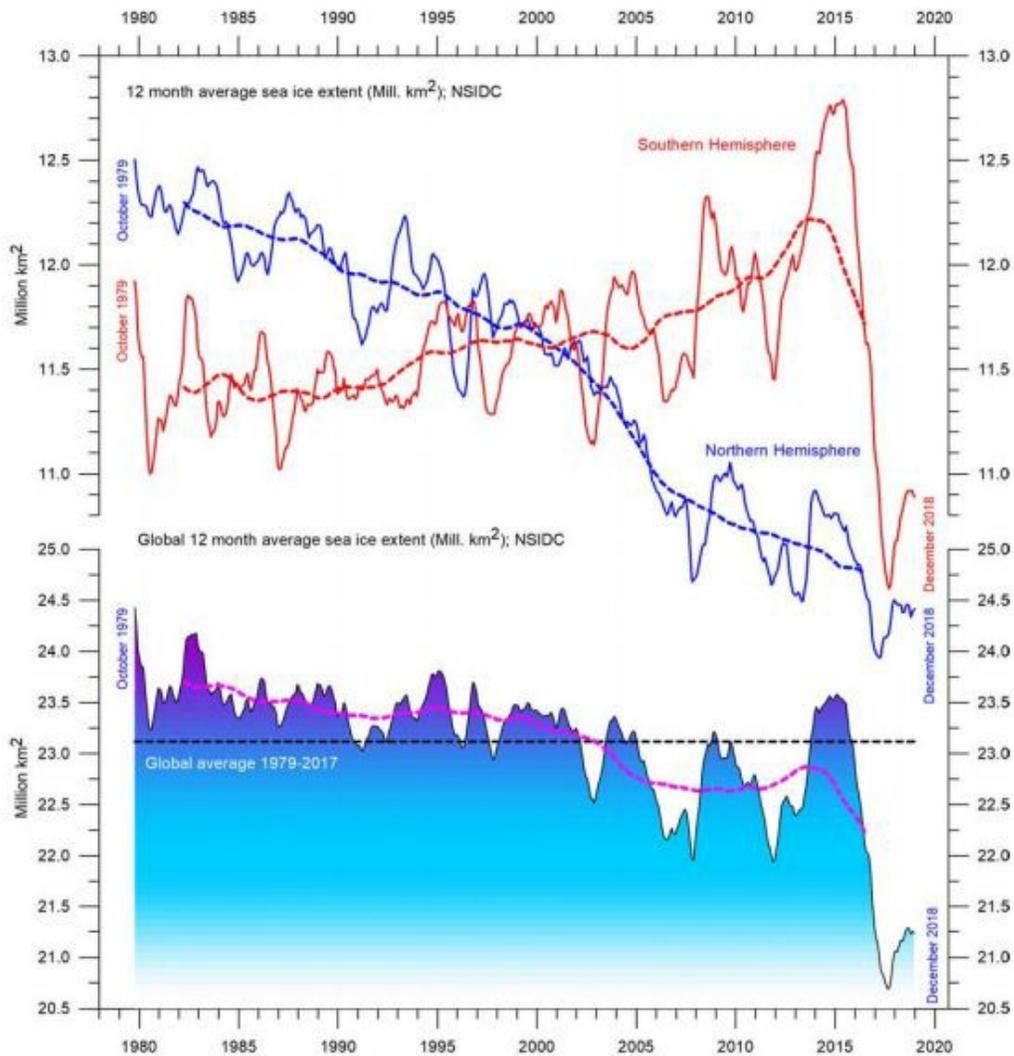


Figure 33: Étendue de la banquise mondiale et hémisphérique à l'ère des satellites. Moyenne mobile sur 12 mois. La valeur d'octobre 1979 représente la moyenne mensuelle de novembre 1978 à octobre 1979, la valeur de novembre 1979 représente la moyenne de décembre 1978 à novembre 1979, etc. Les lignes pointillées représentent une moyenne de 61 mois (environ 5 ans). Le mois dernier inclus dans les calculs sur 12 mois est montré à droite dans le diagramme. Source de données: Centre national de données sur la neige et la glace.

L'étendue de la banquise Antarctique (Figure 33) a diminué spectaculairement au printemps 2016, beaucoup plus rapidement qu'à toute autre saison de printemps depuis le début des mesures satellitaires (1979). Un recul important a été observé dans tous les secteurs de l'Antarctique, mais il a été plus marqué dans les mers de Weddell et de Ross. Dans ces secteurs, de forts vents de surface (chauds) du nord ont repoussé la glace de mer vers le continent antarctique. Divers auteurs (par exemple, Turner et al. 2017 et Phys.org 2019) ont examiné le contexte particulier du régime des vents de 2016 et il semble s'agir d'un phénomène lié à la variabilité naturelle du climat. Les mesures de la banquise par satellite sont encore récentes et ne représentent pas pleinement les variations naturelles qui se

manifestent depuis plus d'une décennie ou deux. Ce qui peut être identifié à partir des mesures est néanmoins intéressant. Les deux graphiques moyens sur 12 mois (Figure 33) se caractérisent par des variations récurrentes courtes se superposant aux tendances globales. Un cycle de 5,3 ans est observé pour la banquise arctique, et de 4,5 ans pour la banquise antarctique. Ces deux variations ont atteint leurs minima simultanément en 2016, ce qui explique au moins en partie le minimum mondial de l'étendue des banquises. Dans les années à venir, les variations naturelles décrites ci-dessus (5,3 ans dans l'Arctique et 4,5 ans dans l'Antarctique) pourraient à nouveau induire une augmentation de l'étendue de la banquise aux deux pôles, avec comme effet probable une augmentation de l'étendue globale moyenne sur 12 mois. En fait, cette tendance semble déjà amorcée (voir le diagramme ci-dessus). Cependant, les minima et maxima futurs pour ces variations ne se produiront pas de manière synchrone en raison de la longueur de leurs périodes, et les minima globaux (ou maxima) risquent donc d'être moins prononcés qu'en 2016. La figure 34 illustre l'évolution globale de la banquise arctique de la fin de 2017 à la fin de 2018. Le changement le plus frappant a été l'augmentation générale de l'épaisseur de la banquise sur certaines parties de la côte canadienne. La nouvelle glace relativement épaisse observée près des îles de Nouvelle-Sibérie (Novosibirskiye Ostrova) et du pôle Nord s'était déplacée vers la fin de 2018 vers le Canada et le Groenland. À la fin de 2018, une glace plus épaisse qu'en 2017 était présente dans la mer de Beaufort, la mer de Tchoukotka, la mer de Sibérie orientale au nord de l'Alaska et la Sibérie, ainsi que dans le secteur des îles Svalbard-Franz Josef de l'océan Arctique.

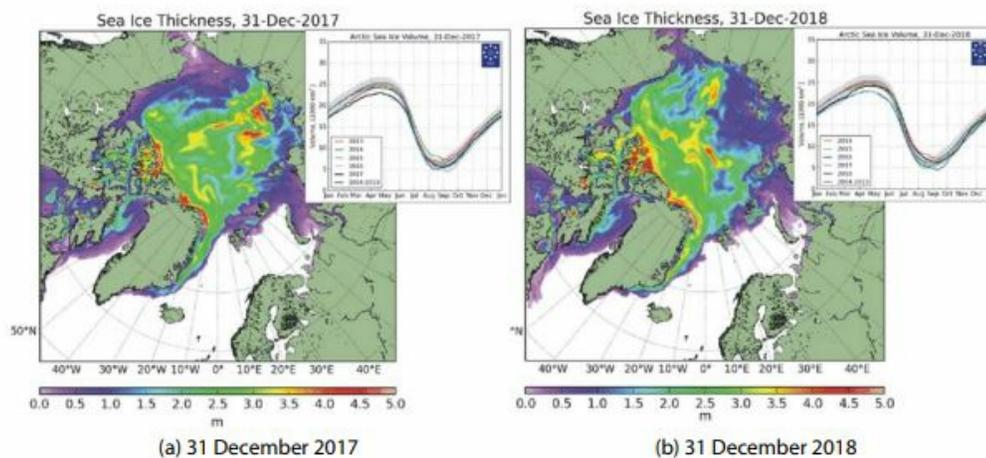


Figure 34: Banquise arctique. Changements récents de l'étendue et de l'épaisseur, et cycles saisonniers du volume total calculé de la banquise arctique. Le volume moyen de la glace de mer et l'écart type pour la période 2004-2013 sont indiqués en grisé dans les diagrammes insérés. Source: Institut météorologique danois.

Couverture neigeuse dans l'hémisphère nord

Les variations de l'étendue mondiale de la couverture neigeuse sont principalement dues aux changements intervenus dans l'hémisphère Nord (Figure 35), où se trouvent toutes les grandes zones terrestres. L'étendue de la couverture neigeuse de l'hémisphère sud est essentiellement contrôlée par la calotte glaciaire antarctique et donc relativement stable.

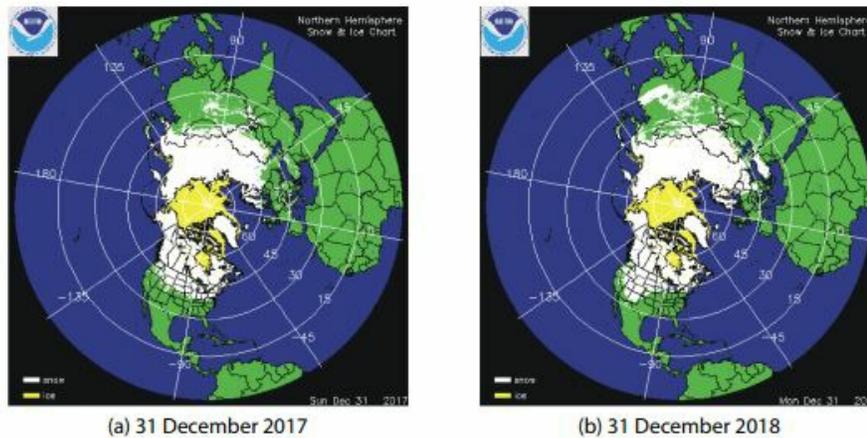


Figure 35: Evolution récente de la couverture neigeuse et de la banquise de l'hémisphère nord. Enneigement blanc, glace de mer, jaune. Source: Centre national de la glace (NIC).

L'étendue de la couverture neigeuse dans l'hémisphère nord est sujette à d'importantes variations locales et régionales d'une année à l'autre. Cependant, la tendance générale (depuis 1972) a été une stabilisation dans l'hémisphère nord, comme l'illustre la figure 36.

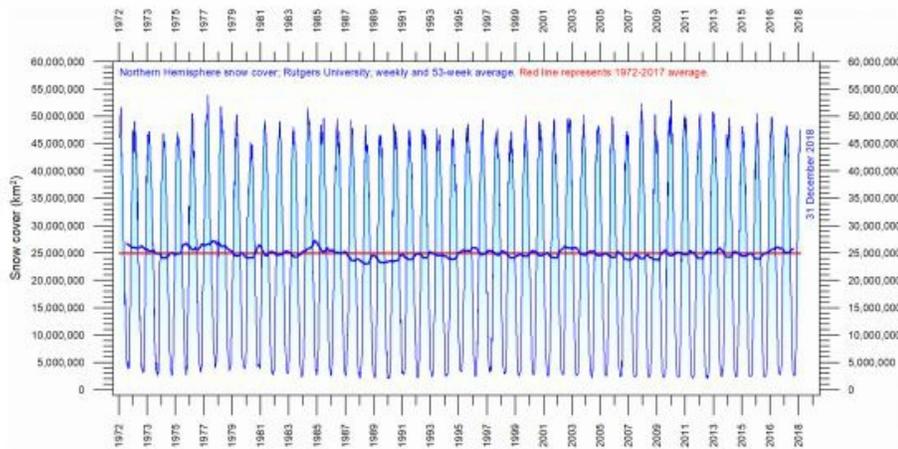


Figure 36: Étendue de la couverture neigeuse hebdomadaire dans l'hémisphère Nord depuis janvier 1972. La ligne bleue fine représente les données hebdomadaires et la ligne bleue épaisse correspond à la moyenne mobile sur 53 semaines (environ un an). La ligne rouge horizontale correspond à la moyenne 1972–2017. Source: Laboratoire mondial de la neige de l'université Rutgers.

Au cours de l'été dans l'hémisphère nord, la couverture neigeuse diminue généralement à environ 2,4 millions de km² (essentiellement pilotée par la taille de la calotte glaciaire du Groenland). Pendant l'hiver de l'hémisphère Nord, la superficie enneigée s'élève à environ 50 millions de km², ce qui représente environ 33% de la superficie totale des terres de la planète Terre (Figure 36). Compte tenu des changements saisonniers (Figure 37), l'étendue de la couverture neigeuse de l'hémisphère Nord à l'automne augmente légèrement, l'étendue du milieu de l'hiver est essentiellement stable et l'étendue du printemps est en légère baisse. En 2018, l'étendue de la couverture neigeuse de l'hémisphère Nord était similaire à celle enregistrée en 2017.

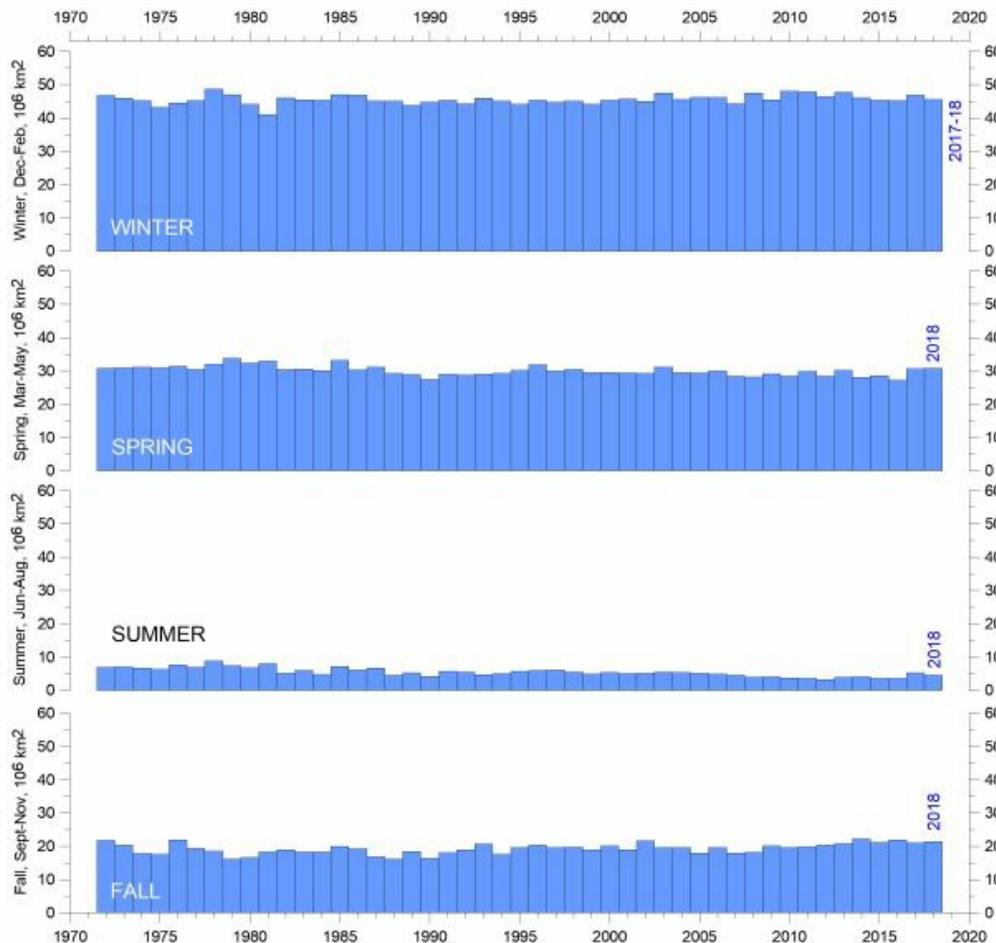


Figure 37: Couverture neigeuse saisonnière dans l'hémisphère nord depuis 1972. Source: Laboratoire de recherche de la neige mondiale de l'université de Rutgers

6. Tempêtes tropicales et énergie cyclonique accumulés (ACE)

L'énergie cyclonique accumulée (ACE) est une mesure utilisée par l'agence américaine NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*) pour quantifier l'activité individualisée des cyclones tropicaux et celle de saisons entières. L'ACE est calculé comme le carré de la vitesse du vent toutes les 6 heures, puis est multiplié par 10 000 pour des raisons

de lisibilité, en utilisant une unité de 104 nœuds. L'énergie cyclonique accumulée d'une saison est la somme de l'énergie cyclonique accumulée pour chaque tempête et représente donc l'activité cyclonique totale. Le potentiel de dommages d'un ouragan est proportionnel au carré ou au cube de la vitesse maximale du vent et l'ACE n'est donc pas seulement une mesure de l'activité des cyclones tropicaux, mais également une mesure du potentiel de dommages d'un cyclone ou d'une saison donnée. Les enregistrements existants (figures 38 et 39) suggèrent qu'il n'y a eu aucune activité cyclonique anormale au cours des dernières années.

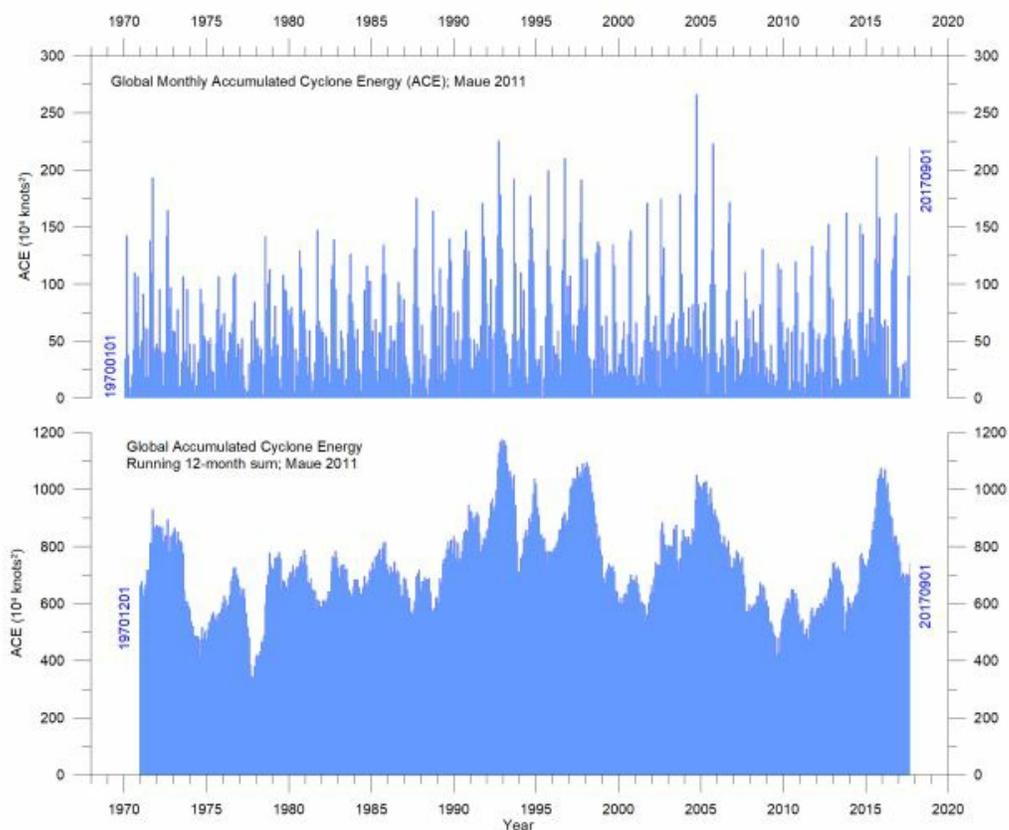


Figure 38: Energie cyclonique accumulée par les tempêtes tropicales et les ouragans. Source de données: données Maue ACE. Veuillez noter que ces données ne sont pas encore mises à jour après septembre 2017.

Les données globales ACE affichent une variabilité dans le temps (Figure 38), mais sans tendance claire. Les diagrammes des hémisphères nord et sud (figure 39) sont similaires à cet égard. La période 1992-1998 a été caractérisée par des valeurs élevées ; d'autres pics ont été observés en 2004-2005 et en 2016, tandis que les périodes 1973-1990 et 2002-2015 ont été caractérisées par des valeurs faibles. Les sommets de 1998 et 2016 coïncident avec les forts événements *El Niño* dans l'océan Pacifique. Les données ACE et la dynamique des cyclones en cours sont détaillées dans Maue (2011). Les valeurs de l'ACE de l'hémisphère Nord (Figure 39a) dominent le signal global (Figure 38) et montrent donc des pics et des minima similaires à ceux des données globales, sans tendance claire pour la période d'observation entière. La principale saison des cyclones dans l'hémisphère nord s'étend de

juin à novembre. Les valeurs de l'ACE de l'hémisphère sud (Figure 39b) sont inférieures à celles de l'hémisphère nord et la principale saison des cyclones est de décembre à avril. La série de données ACE de la NOAA remonte à 1850. Une transformée de Fourier pour le bassin atlantique (Figure 40) montre que la série ACE est fortement influencée par une variation périodique d'environ 60 ans. Depuis 2002, les données ACE de l'Atlantique montrent une tendance générale à la baisse, mais avec d'importantes variations interannuelles. La saison des ouragans de l'Atlantique Nord présente souvent une activité supérieure à la moyenne lorsque les conditions de 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).

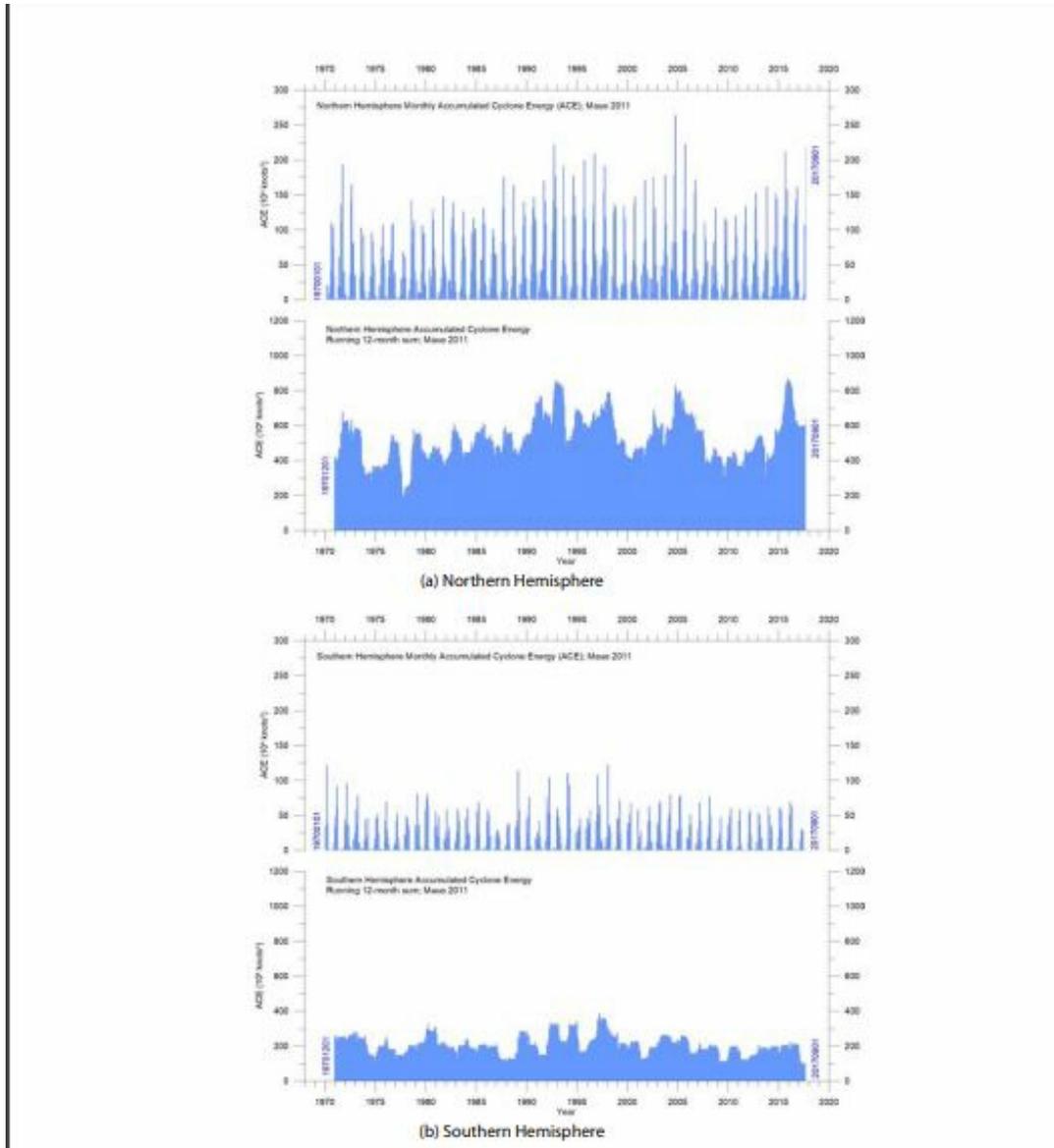


Figure 39: Série de données ACE Maue par hémisphère. Détails selon la figure 38.

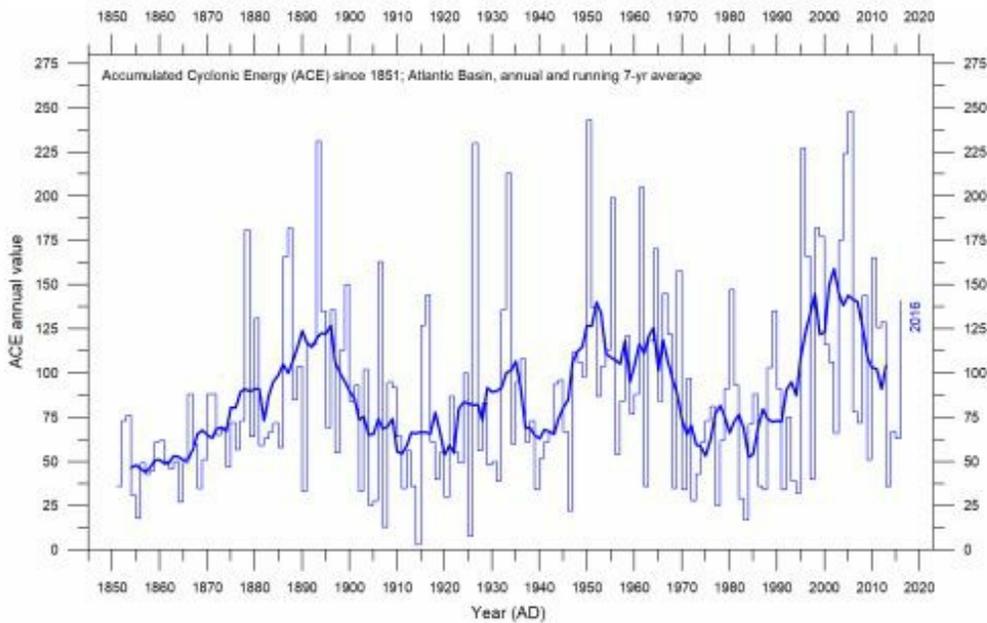


Figure 40: Energie cyclonique accumulée dans le bassin atlantique depuis 1850. Les lignes minces indiquent les valeurs annuelles de l'ACE et les lignes épaisses, la moyenne des 7 dernières années. Source des données: Laboratoire océanographique et météorologique de l'Atlantique (AOML), Division de la recherche sur les ouragans. Veuillez noter que ces données annuelles ne sont pas encore mises à jour au-delà de 2016.

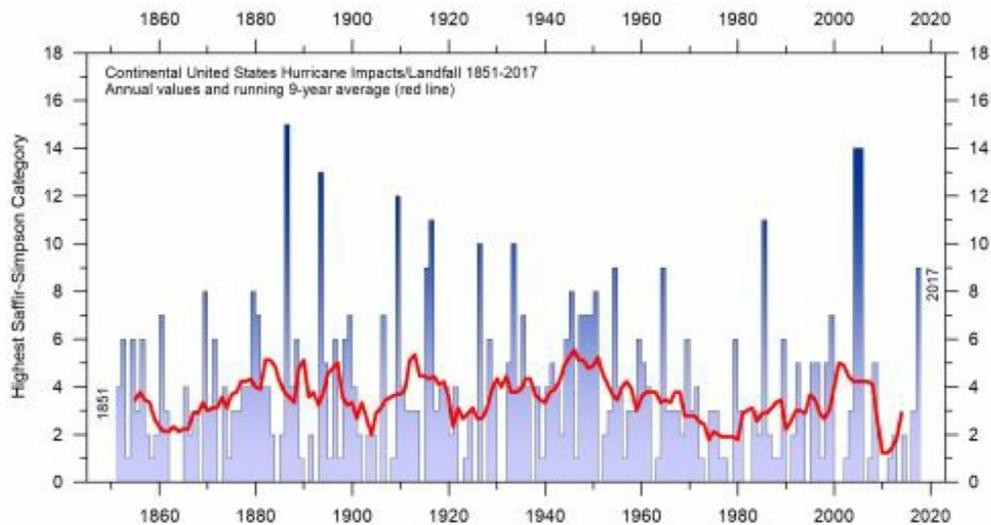


Figure 41: Nombre d'impacts et d'atterrissage de cyclones sur le continent américain, 1851-2017. L'impact de l'échelle de l'ouragan Saffir-Simpson aux États-Unis est basé sur les vents de surface maximum soutenus estimés sur la côte. Source de données: Division de la recherche sur les ouragans, NOAA. Veuillez noter que cette série de données n'est pas encore mise à jour au-delà de 2017.

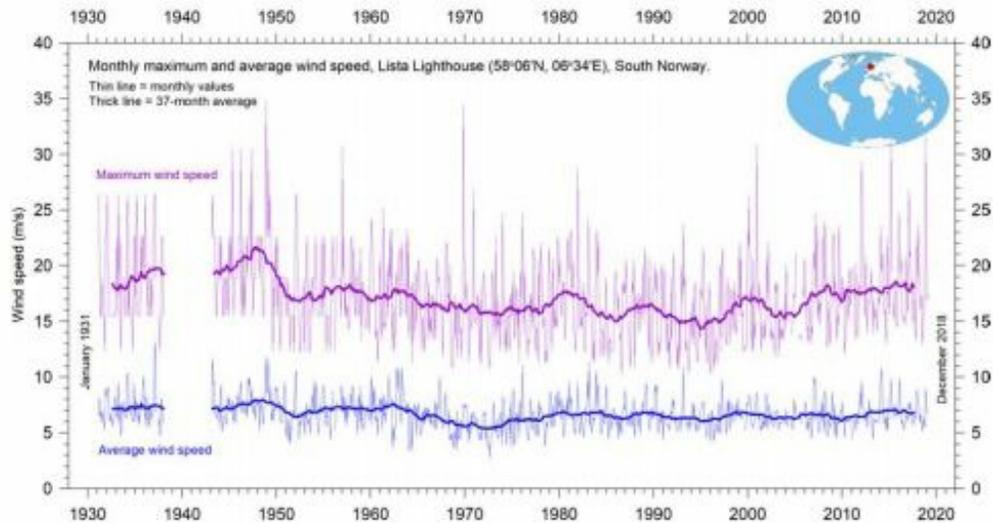


Figure 42: Vitesse du vent au phare de Lista, Norvège. Vitesse mensuelle maximale et moyenne du vent depuis janvier 1931. Le phare de Lista est situé sur un cap exposé à l'extrémité sud-ouest de la Norvège continentale, dans le but de pouvoir enregistrer les régimes de vent dans la mer du Nord et le secteur européen de l'Atlantique Nord. Source de données: eKlima.

Autres observations de tempêtes et de vents

Le graphique 41 indique le nombre de zones touchées par les ouragans dans la partie continentale des États-Unis. Sur la période d'observation, cette série de données montre des variations considérables d'une année à l'autre, mais il est impossible de détecter une tendance à long terme. Une transformée de Fourier (non montrée ici) met en évidence deux périodicités statistiquement significatives, respectivement de 3,2 et 4,9 ans. L'analyse des observations effectuées dans les stations météorologiques côtières situées dans des endroits exposés au vent peut également éclairer sur l'évolution du régime des vents. Le phare de Lista situé sur un cap exposé à l'extrémité sud-ouest du continent norvégien est un bon exemple pour le nord-ouest de l'Europe; Il est donc bien adapté pour enregistrer les vents dans la mer du Nord et le secteur européen de l'Atlantique Nord. Comme le montre la figure 42, le record de vent mensuel de vent de Lista remonte à janvier 1931. Les forces maximales du vent ont été enregistrées peu de temps après la Seconde Guerre mondiale. Depuis, les forces ont légèrement diminué, reflétant dans une certaine mesure l'évolution du nombre d'ouragans qui ont touché terre dans la partie continentale des États-Unis (Figure 41), à l'opposé de l'Atlantique Nord.

Partager

-
-
-
-

-
-