



Commission économique pour l'Europe**Comité des transports intérieurs****Groupe de travail chargé d'examiner les tendances
et l'économie des transports****Groupe d'experts chargé d'étudier les effets des changements
climatiques et l'adaptation à ces changements dans
les réseaux et nœuds de transport internationaux****Treizième session**

Genève, 22 et 23 juin 2017

Point 4 de l'ordre du jour provisoire

Débat sur le rapport final du Groupe d'experts**Aperçu des tendances récentes et des projections en matière
de changements climatiques ayant une incidence sur
les transports dans la région de la CEE (première partie)****Note du secrétariat*****I. Mandat**

1. Le présent document a été établi sur la base des activités et des résultats prévus au titre du module 2 « Tendances et économie des transports (y compris les liaisons de transport Europe-Asie) » du programme de travail du sous-programme « Transports » pour la période 2016-2017 (ECE/TRANS/2016/28/Add.1, par. 2.2) et du Mandat du Groupe d'experts chargé d'étudier les effets des changements climatiques et l'adaptation à ces changements dans les réseaux et nœuds de transport internationaux de la Commission économique pour l'Europe (CEE) (ECE/TRANS/2015/6), tel qu'adopté par le Comité des transports intérieurs à la session qu'il a tenue du 24 au 26 février 2015 (ECE/TRANS/248, par. 34).

II. Changements climatiques : tendances récentes et projections

2. Les informations présentées ici portent sur des facteurs climatiques dont la variabilité et l'évolution peuvent avoir d'importantes incidences sur les transports. Certaines de ces informations (les tendances et projections des facteurs climatiques jusqu'en 2013) figuraient dans un rapport antérieur de la CEE (CEE, 2013) ; dans le présent

* Le présent document a été soumis avec retard en raison de la transmission tardive de renseignements provenant d'autres sources.



(projet de) rapport, l'accent est mis sur la période de six ans la plus récente (2011-2016) et sur les dernières projections en termes de variabilité et de changements climatiques¹.

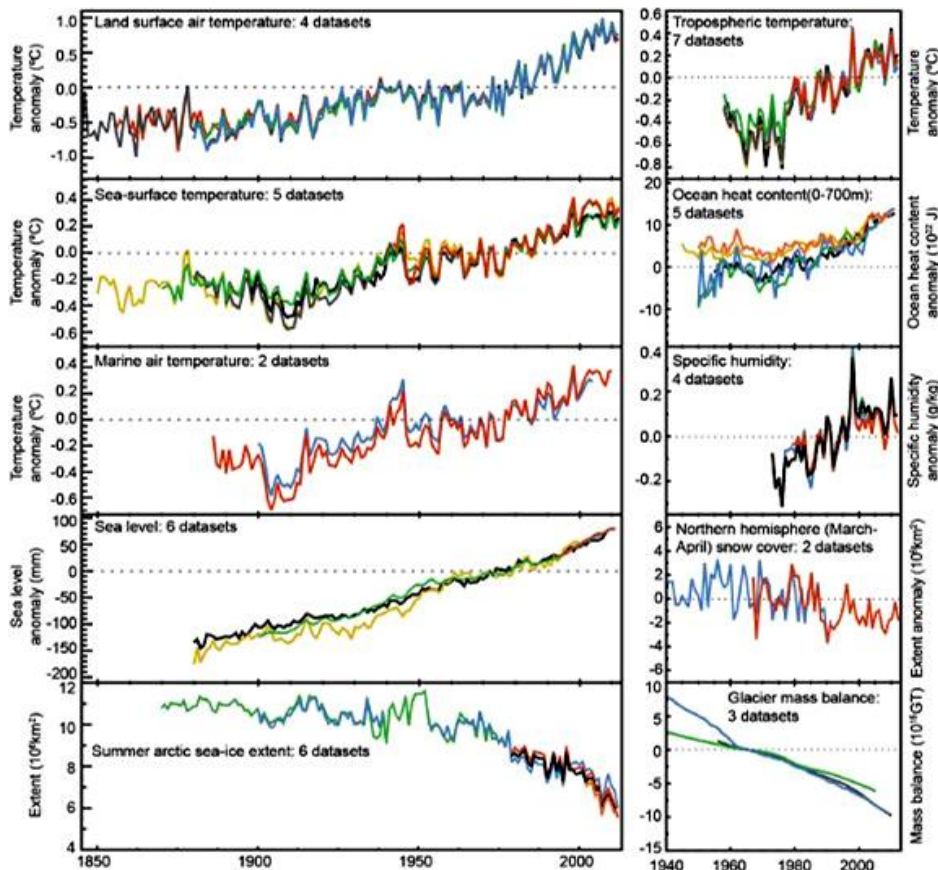
A. Tendances en matière de changements climatiques

3. Les preuves d'un réchauffement de la planète depuis le XIX^e siècle abondent, comme l'attestent des observations scientifiques indépendantes effectuées dans différents milieux (de la haute atmosphère aux grands fonds marins). Cela étant, le débat sur les changements climatiques est, le plus souvent, essentiellement centré sur la hausse des températures à la surface des terres émergées, qui ne constitue que l'un des indicateurs d'une évolution du climat, les autres étant par exemple la température de l'atmosphère et des océans, le niveau des mers, les précipitations et l'étendue des glaciers, du manteau neigeux et des glaces de mer (fig. 1).

Figure 1

Évolution des facteurs climatiques

(Chaque ligne correspond à une estimation calculée de façon indépendante. Dans chacun des graphiques ci-dessous, tous les ensembles de données ont été normalisés pour rendre compte d'une même période de relevés (GIEC, 2013))



4. Des hausses de la température ont été observées dans la troposphère au cours des dernières décennies. Les océans, qui ont sans doute absorbé plus de 80 % de l'énergie excédentaire liée à l'augmentation des émissions depuis les années 1970, présentent un accroissement sensible de leur contenu thermique (GIEC, 2013 ; Melillo *et al.*, 2014 ; Dieng *et al.*, 2017), d'où des augmentations de leur niveau dû à l'effet stérique, considéré comme le facteur principal de la montée du niveau des mers (Hanna *et al.*, 2013). En même

¹ Il est à noter que la variabilité du climat et les changements climatiques s'entendent de la variabilité et des changements continus des conditions climatiques par rapport à une période de référence, par exemple la première période ayant fait l'objet de relevés précis (des années 1850 aux années 1860) ou les périodes au cours desquelles les infrastructures utilisées aujourd'hui ont été construites (1961-1990 ou 1986-2005, par exemple).

temps, la surface des glaciers et celle de la glace de mer se sont amenuisées en quelques décennies. La banquise arctique a diminué de plus de 40 % depuis les premiers relevés satellitaires (1979), phénomène observé principalement vers la fin (en septembre) de la saison du dégel (Melillo *et al.*, 2014 ; NOAA, 2017a). Les glaciers ne cessent de reculer depuis une vingtaine d'années et le manteau neigeux diminue également au printemps dans l'hémisphère Nord depuis les années 1950 (GIEC, 2013 ; NSIDC, 2017).

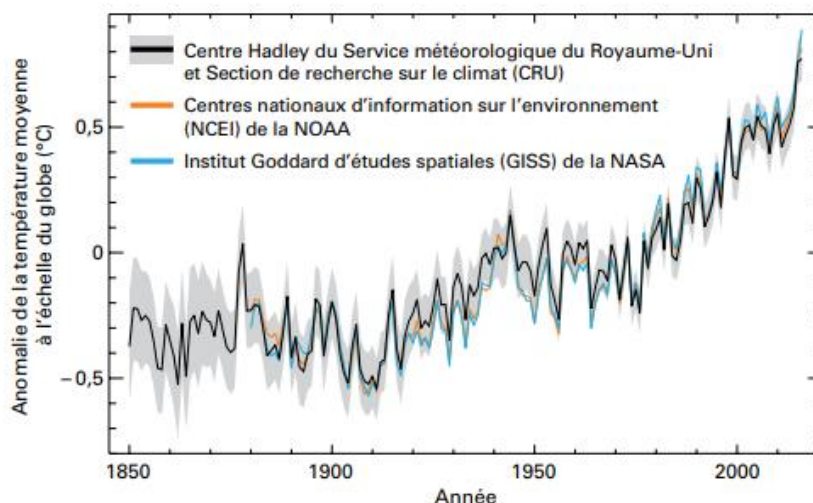
1.1.1 Température et précipitations

5. La température moyenne à proximité de la surface du globe est l'indicateur le plus fréquemment cité en matière de changements climatiques, car il est directement lié à i) l'équilibre énergétique planétaire (Fourier 1827) et l'augmentation des émissions cumulées de gaz à effet de serre (GES) (GIEC, 2013) ainsi qu'à ii) bon nombre d'effets et de risques climatiques (Arnell *et al.*, 2014). Même si chaque année (ou chaque décennie) n'est pas forcément plus chaude que les précédentes, on observe une tendance au réchauffement sur le long terme (fig. 2). L'essentiel du réchauffement s'est produit au cours des trente-cinq dernières années (NASA, 2016).

Figure 2

Anomalies de la température moyenne à l'échelle du globe pour la période 1850-2016 par rapport à la période de référence 1961-1990 pour trois importants ensembles de données²

(Les parties en grisé correspondent à l'incertitude associée à l'ensemble de données HadCRU (Centre Hadley du Service météorologique du Royaume-Uni) (OMM, 2017))



6. L'année 2016 est la plus chaude jamais été enregistrée par des instruments, les records précédents de 2015 et 2014 ayant été dépassés : ces données concordent avec une tendance au réchauffement de la planète constante depuis les années 1970, qui vient se superposer à une variabilité à court terme, aléatoire, stationnaire (Rahmstorf *et al.*, 2017). C'est la troisième année consécutive que la température moyenne à la surface du globe atteint un nouveau record et la cinquième fois que le record est dépassé depuis le début du XXI^e siècle (NOAA, 2017b).

7. Le réchauffement du système climatique est sans équivoque ; toutes les observations dénotent des hausses des températures moyennes de l'air et des océans à la surface du globe (GIEC, 2007 ; 2013). La température moyenne de la planète a augmenté de 1,1 °C depuis la fin du XIX^e siècle, un changement qui s'explique en grande partie par de plus fortes concentrations atmosphériques de gaz à effet de serre. La température moyenne à la surface

² L'analyse de l'OMM (2017) utilise les versions les plus récentes des trois ensembles de données GISTEMP, NOAA GlobalTemp et HadCRUT tenus à jour respectivement par la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) et la National Aeronautics and Space Administration (NASA) des États-Unis et le Centre Hadley du Service météorologique du Royaume-Uni. L'ensemble de données combinées remonte à 1880 (OMM, 2017. http://library.wmo.int/opac/doc_num.php?explnum_id=3414).

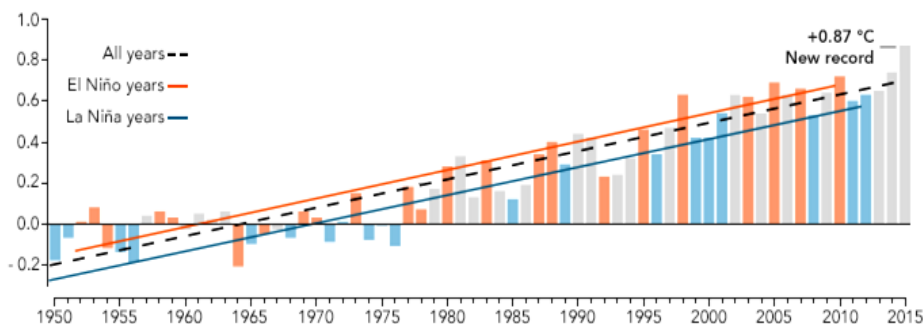
des terres et des océans en 2015 était d'environ $0,76 \pm 0,09$ °C au-dessus de la moyenne de 1961-1990 (94 % de certitude, NASA (2016)), tandis que la troisième année record au niveau mondial a été 2014 (MetOffice, 2014).

8. Depuis le début du XXI^e siècle, on observe une décélération de la montée des températures moyennes de surface à l'échelle du globe par comparaison avec les projections des modèles climatiques mondiaux. Au cours de la période 2003-2013, les températures de surface tant terrestres que maritimes à l'échelle mondiale ont augmenté à un rythme plus faible que les décennies précédentes (Dieng *et al.*, 2017). Ce ralentissement apparent (qualifié de « *hiatus climatique* ») a été attribué aux incertitudes des simulations des ensembles de données classiques liées au forçage climatique externe, qu'il s'agisse d'éruptions volcaniques, de variations stratosphériques de la quantité de vapeur d'eau et d'aérosols industriels, de l'activité solaire, de la redistribution de la chaleur dans les océans ou de la variabilité interannuelle et décennale des cycles océaniques (épisodes El Niño et La Niña, par exemple) (GIEC, 2013 ; MetOffice, 2014 ; Fyfe *et al.*, 2016 ; Yan *et al.*, 2016). Des recherches récentes (notamment Cowtan et Way, 2014 ; Karl *et al.*, 2015 ; Simmons *et al.*, 2017) ont mis en doute le fait qu'un *hiatus climatique* ait pu se produire dans la tendance à la hausse des températures, donnant à entendre qu'il y avait des biais dans les ensembles de données relatifs à la température de surface et qu'une nouvelle analyse des données corrigées/actualisées laissait entrevoir des tendances récentes des températures mondiales supérieures à celles signalées dans les études antérieures (par exemple GIEC, 2007 ; 2013).

Figure 3

Températures annuelles comparées à la moyenne de la période 1951-1980

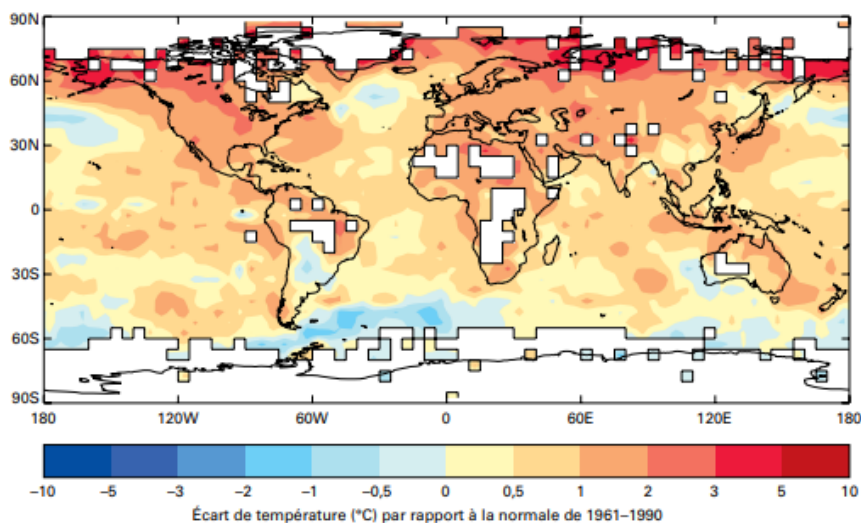
(Les années à Niño sont signalées en rouge et les années à Niña en bleu. Les lignes continues en bleu et en rouge représentent la tendance ; les années neutres sont signalées en gris ; la ligne en pointillés représente la tendance générale (NASA, 2016))



9. De façon générale, les années débutant pendant un épisode El Niño sont plus chaudes qu'en dehors d'un tel épisode (années neutres ou années La Niña) (fig. 3). Les températures record de 2015 et 2016 ont subi l'influence d'un épisode El Niño particulièrement marqué dans le Pacifique (NASA, 2016). Cependant, en 2014, les températures à la surface du globe ont été supérieures de $0,88 \pm 0,20$ °C à la moyenne de 1961-1990 selon les estimations de la NOAA (OMM, 2014), alors qu'il s'agissait d'une année neutre sans épisode El Niño. En 2016, des températures record ont été relevées un peu partout dans l'hémisphère Nord, en particulier dans les régions arctiques (fig. 4). Au début de 2016, la température mondiale était supérieure d'environ 1,5 °C à celle du début de la révolution industrielle et de 0,4 °C à celle de 1998 (également une année à fort épisode El Niño) (Simmons *et al.*, 2017)³. L'Alaska a connu un réchauffement général sans précédent (NSIDC, 2017). Les températures moyennes à la surface des océans ont également été les plus élevées jamais enregistrées, les anomalies étant là encore plus prononcées au début de 2016 (OMM, 2017).

³ Une évolution alarmante au regard de l'Accord de Paris de 2015 dont le but est de « contenir » l'élévation de la température moyenne de la planète nettement en dessous de 2 °C par rapport aux niveaux préindustriels (CCNUCC, 2015).

Figure 4
Anomalies de la température à l'échelle du globe en 2016 (période de référence : 1961-1990) (OMM, 2017)

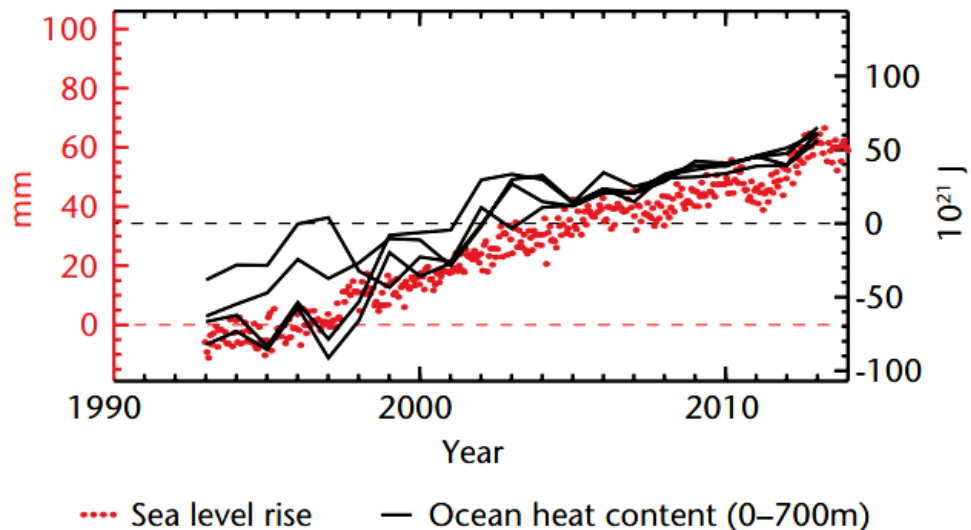


10. Le climat est régi par des flux entrant et sortant de chaleur et par un processus dynamique de stockage de celle-ci dans les différents éléments constitutifs du système terrestre, c'est-à-dire les océans, les terres émergées et l'atmosphère (GIEC, 2013). La chaleur s'accumule essentiellement dans les océans, ceux-ci absorbant près de 80 % de la chaleur qui s'ajoute au système climatique. Les variations de température de l'océan sont donc des indicateurs importants des changements climatiques. Ces dernières années, le réchauffement des océans a été largement mis en évidence, le taux étant estimé à $0,64 \text{ W/m}^2$ sur la période 1993-2008 (Lyman *et al.*, 2010) et à $0,5 - 0,65 \text{ Wm}^{-2}$ pour la période 2003-2013 (Dieng *et al.*, 2017). L'élévation de la température de l'eau a été observée jusqu'à des profondeurs de 3 000 m depuis 1961 (GIEC, 2013). Il y a une apparente corrélation entre l'augmentation de la chaleur contenue dans les océans et la hausse du niveau des mers (fig. 5), attribuée aux effets stérique et à l'expansion thermique (NASA, 2016).

Figure 5

Hausse du niveau mondial moyen des mers et variations du contenu thermique des océans pour 1993-2013

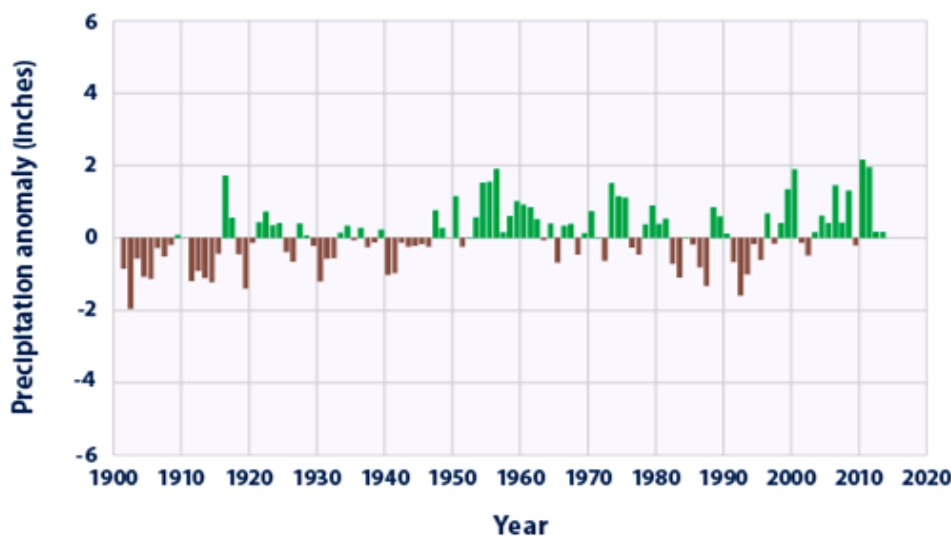
(Données sur le niveau des mers provenant de TOPEX (1993-2001), Jason-1 (2002-08) et Jason-2 (2008-13) (<http://sealevel.colorado.edu/>). Contenu thermique des océans (dans les 700 premiers mètres) par rapport à la moyenne de la période 1993-2012 ; les données proviennent de CSIRO/ACE CRC ; PMEL/JPL/JIMAR ; NODC ; et EN4.0.2 (MetOffice, 2014))



11. Ainsi qu’il ressort de l’analyse des données relatives aux précipitations sur les terres émergées de la planète, la pluviométrie affiche une tendance ascendante au XX^e siècle (fig. 6), surtout à des latitudes moyennes à hautes (avec un faible indice de confiance avant 1951 et un indice de confiance moyen par la suite). Cependant, lorsque l’analyse porte uniquement sur les latitudes moyennes de l’hémisphère Nord, l’indice de confiance des tendances des précipitations pour les années postérieures à 1951 est élevé. De manière générale, les données sur les précipitations à l’échelle mondiale font apparaître des tendances à long terme disparates (GIEC, 2013) et une forte variabilité régionale.

Figure 6

Précipitations annuelles totales sur les terres émergées de la planète pour la période 1901-2013 par rapport à 1901-2000 (EPA, 2015)

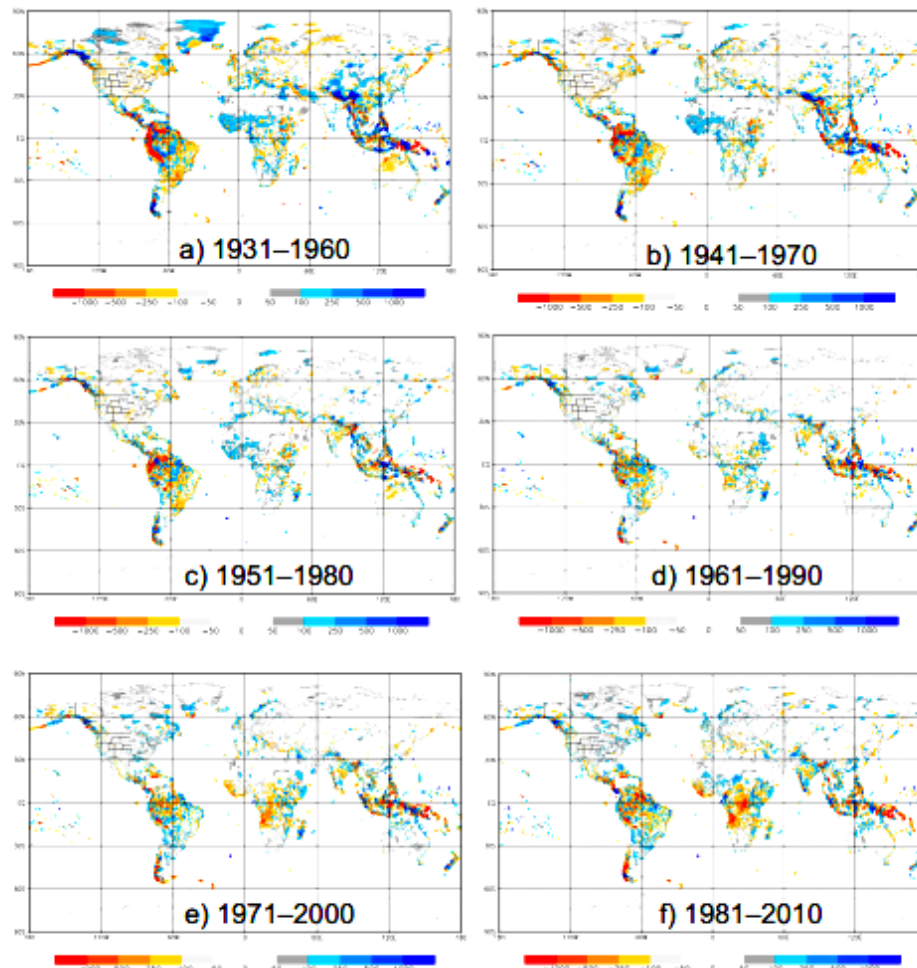


12. Les épisodes de fortes précipitations ont augmenté en intensité et/ou en fréquence dans de nombreuses régions d’Europe et d’Amérique du Nord, alors que la fréquence et l’intensité des épisodes de sécheresse se sont accrues en Méditerranée et dans certaines régions d’Afrique (GIEC, 2013). En appliquant des corrections moyennes tenant compte

des conditions météorologiques aux données relatives aux précipitations provenant de 75 100 stations météorologiques (Centre mondial de climatologie des précipitations – GPCC), Schneider *et al.* (2017) sont parvenus à une moyenne pluviométrique annuelle de 855 mm environ (non compris l’Antarctique) pour la période 1951-2000 ; ils ont également estimé qu’un réchauffement de 1 °C par rapport aux niveaux préindustriels pourrait s’accompagner d’une augmentation de 2 à 3 % des précipitations mondiales.

Figure 7

Écarts entre les précipitations terrestres annuelles moyennes pour différentes périodes de trente ans : a) 1931-1960 ; b) 1941-1970 ; c) 1951-1980 ; d) 1961-1990 ; e) 1971-2000 ; et f) 1981-2010 par rapport à la climatologie des précipitations du GPCC 1951-2000 (Meyer-Christoffer *et al.*, 2015)



13. Au cours des périodes 1931-1960 et 1941-1970, les écarts ont été plus importants que durant la période 1951-2000 ; les quantités de pluie ont été plus abondantes en Afrique de l’Ouest et moindres en Asie du Sud-Est, notamment en Indonésie (fig. 7). En Europe et en Amérique du Nord, les précipitations ont diminué au sud et augmenté au nord. En Espagne, les régimes de précipitations semblent avoir considérablement changé au cours des vingt dernières années ; les périodes sèches se sont allongées, les précipitations annuelles ont accusé des baisses pouvant aller jusqu’à 15 % et le nombre d’épisodes de fortes précipitations a reculé (Valdez- Abellan *et al.*, 2017).

14. Les précipitations ont diminué au cours des périodes de trente ans les plus récentes en août, septembre et octobre, ce qui pourrait être lié à des phénomènes d’oscillation australe El Niño (ENSO) plus fréquents ces dernières décennies et à l’affaiblissement des moussons estivales en Inde et en Asie du Sud-Est (Schneider *et al.*, 2017). Les précipitations mondiales ont été fortement influencées en 2016 par le passage des conditions El Niño au début de l’année à des conditions La Niña neutres ou faibles au second semestre. Il en est résulté de forts contrastes saisonniers. Certaines régions ont

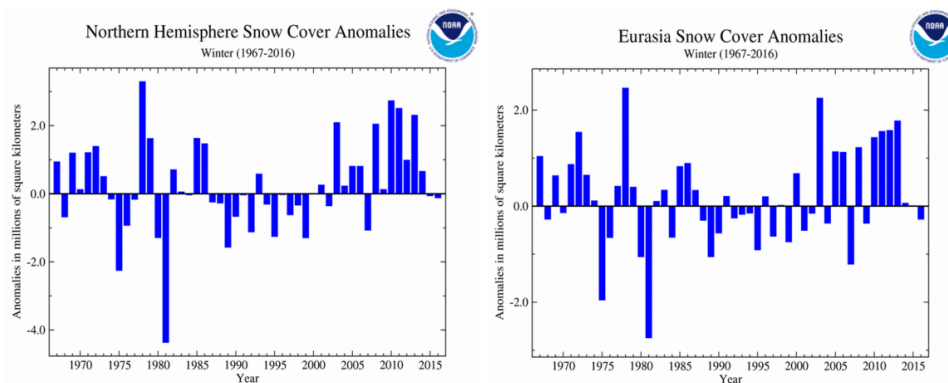
connu des pluies abondantes après El Niño, ce qui a donné des totaux annuels bien supérieurs à la moyenne. L'Indonésie et l'Australie, sous l'influence d'une phase négative du dipôle de l'océan Indien (IOD), ont connu dans de vastes régions des précipitations supérieures au 90^e centile (10 % les plus humides de toutes les années). L'année a également été humide dans de nombreuses zones des hautes latitudes de l'hémisphère Nord.

1.1.2 Neige et glaces de mer

15. La tendance au réchauffement touche également la cryosphère. Le manteau neigeux dans l'hémisphère Nord (soit 98 % environ de l'ensemble de la couverture neigeuse dans le monde) a reculé de 11,7 % par décennie en juin (AEE, 2015a) sur la période 1967-2012. Cette tendance n'est cependant pas uniforme. Certaines régions (Alpes et Scandinavie, par exemple) font apparaître une diminution de la hauteur de la couverture neigeuse à basse altitude, mais une augmentation à haute altitude, tandis que l'on ne constate aucune tendance cohérente dans d'autres régions (Carpathes, Pyrénées et Caucase, par exemple) (AEE, 2012). Depuis quelques décennies, des travaux de recherche montrent que l'étendue et la persistance du manteau neigeux tendent à décroître dans la région arctique.

Figure 8

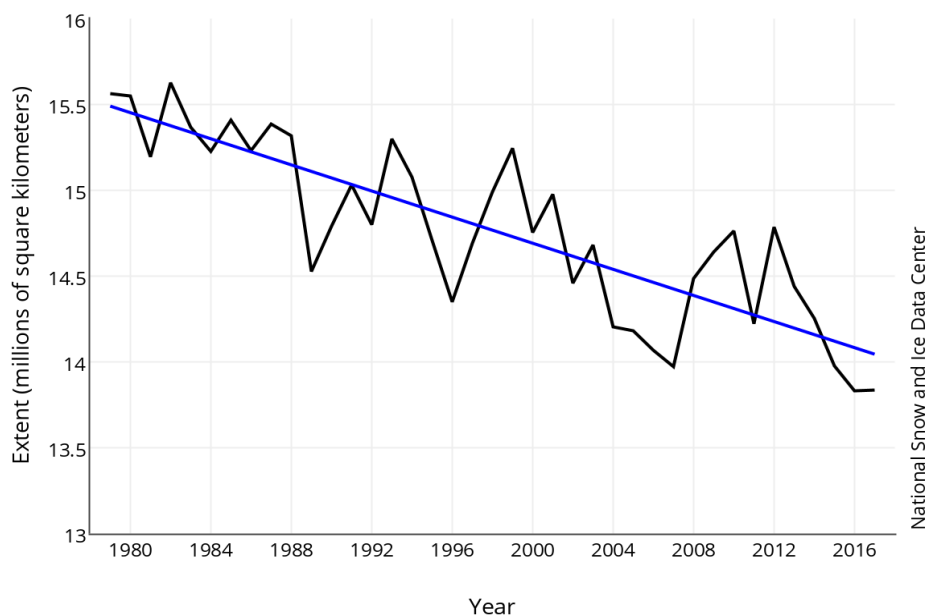
Étendue de la couverture neigeuse hivernale en Amérique du Nord (à gauche) et en Eurasie (à droite) (NOAA 2017a)



16. L'étendue de la couverture neigeuse hivernale de l'hémisphère Nord a légèrement évolué dans les relevés sur cinquante ans (NOAA, 2017a). En 2016, le manteau neigeux hivernal (décembre 2015-février 2016) était inférieur d'environ 120 000 km² à la moyenne de 1981-2010, bien que plusieurs tempêtes hivernales aient traversé l'Amérique du Nord en janvier 2016, ce qui a augmenté considérablement la couverture de neige mensuelle qui est passée à 810 000 km² environ au-dessus de la moyenne de 1981-2010 (fig. 8). En Eurasie, la couverture neigeuse hivernale pour 2015/16 a été inférieure de 270 000 km² à la moyenne, c'est-à-dire la moins étendue depuis 2006/07. Comme en Amérique du Nord, elle a été inférieure à la moyenne en décembre et février et supérieure à la moyenne en janvier.

17. La banquise arctique est en recul (fig. 9). Les glaces de mer se développent généralement durant la saison froide pour atteindre un maximum en mars-avril, puis se contractent pendant la saison chaude, passant à un minimum en septembre ; inversement, la banquise antarctique se contracte pendant la saison chaude de l'hémisphère Sud, l'étendue minimale étant observée en février-mars (fin de l'été austral), et s'étend à la saison froide jusqu'à un maximum en septembre. L'étendue minimale de la glace de mer dans l'Arctique a diminué d'environ 40 % depuis 1979 et la plupart des minima record de septembre ont été enregistrés au cours de la dernière décennie.

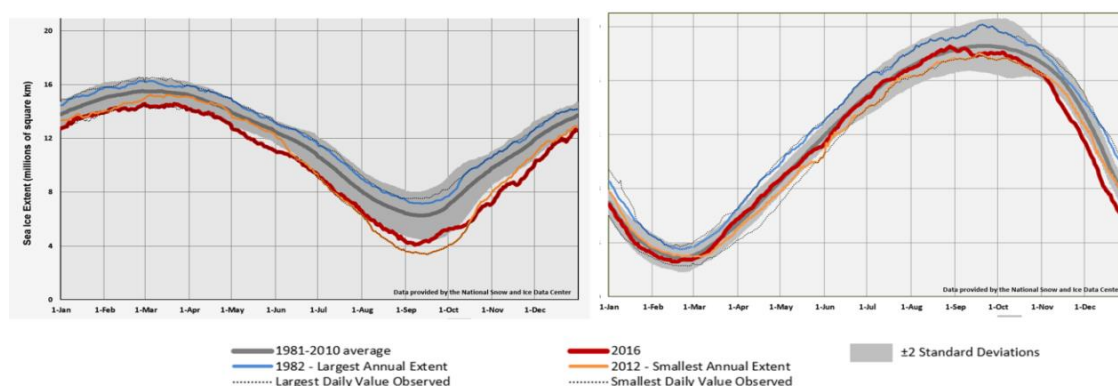
Figure 9
Évolution de l'étendue de la banquise arctique en avril pour la période 1979-2017
(NSIDC, 2017)



18. En novembre 2016, les étendues de glace de mer de l'Arctique et de l'Antarctique ont chuté à des niveaux historiquement bas ; les formations glaciaires étaient si inhabituelles qu'on les a qualifiées de « cygnes noirs » (NSIDC, 2017). Durant chaque mois de 2016, l'étendue de la banquise arctique a été inférieure à la moyenne. Pendant sept mois de la même année, la superficie des glaces de l'Arctique a atteint ses niveaux les plus bas (fig. 11). Calculée pour l'ensemble de l'année, elle a été inférieure de 12,6 % à la normale.

19. L'étendue annuelle maximale de la glace de mer dans l'Arctique en 2016 a été la plus faible jamais observée par satellite dans la plupart des régions arctiques, à l'exception notable de la mer du Labrador, de la baie de Baffin et de la baie d'Hudson. L'étendue maximale et minimale de la glace de mer a été inférieure de 1,12 et 2,08 millions de km² respectivement à la moyenne de 1981-2010. Sur de vastes superficies océaniques généralement recouvertes de glace à la mi-septembre, l'étendue des glaces était à son minimum (dans une grande partie des mers de Beaufort, des Tchouktches, des Laptev et de Sibérie orientale, par exemple). Les glaces de mer de l'Antarctique ont été proches de la normale au cours des huit premiers mois de 2016. Au début de septembre 2016, l'étendue de la banquise antarctique a commencé à se rétrécir rapidement et a avoisiné des niveaux historiquement bas pour le reste de l'année (fig. 10).

Figure 10
Étendue journalière des glaces de mer arctique (à gauche) et antarctique (à droite) en 2016 (NOAA, 2017, données du NSIDC)



20. Mesurée sur l'ensemble de l'année 2016, l'étendue de la banquise antarctique a été de 4,2 % inférieure à la moyenne, la plus faible – à une exception près – jamais enregistrée. Elle a atteint son extension maximale à 18,44 millions de km² en août 2016, date la plus précoce depuis 1979. L'étendue des glaces de mer de l'Arctique ne s'est pas amenuisée aussi rapidement en hiver qu'en été (OMM, 2016). La masse de la calotte glaciaire du Groenland a été mesurée par Velicogna *et al.* (2014), qui ont constaté une déperdition de $280 \pm 58 \text{ Gt an}^{-1}$, s'accroissant de $25,4 \pm 1,2 \text{ Gt an}^{-1}$. Dans la même étude, la masse des glaciers voisins et de la banquise du Canada a perdu $74 \pm 7 \text{ Gt an}^{-1}$ à partir des glaciers et des calottes glaciaires canadiens voisins, avec une accélération de $10 \pm 2 \text{ Gt an}^{-1}$ ⁴.

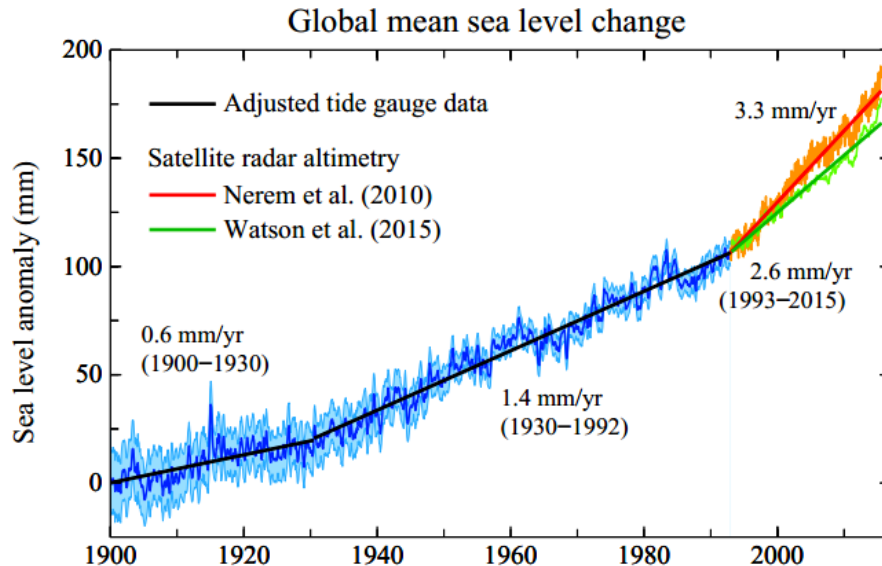
1.1.3 Niveau des mers

21. La hausse sensible du niveau moyen des mers observée ces dernières décennies s'explique par : a) la dilatation thermique des océans, c'est-à-dire les variations du volume des océans dues à des effets stériques ; b) l'isostasie glaciaire, c'est-à-dire l'augmentation de la masse océanique due à la fonte des glaces au Groenland et dans l'Antarctique, mais aussi des glaciers et des calottes glaciaires ; c) l'ajustement glacio-isostatique ; et d) les variations des réserves d'eau terrestre (voir notamment Hanna *et al.*, 2013). Le rythme d'élévation du niveau des mers a fortement augmenté par rapport à la situation relativement stable qui prévalait au cours des deux derniers millénaires (voir notamment Church et White, 2006 ; Engelhart *et al.*, 2009 ; Gehrels et Woodworth, 2012 ; GIEC, 2013 ; Horton *et al.*, 2014). Depuis 1860, le niveau de la mer a augmenté à l'échelle mondiale d'environ 0,20 m, soit en moyenne de 1,3 à 1,8 cm par décennie (Church *et al.*, 2013 ; Hay *et al.*, 2015). Cependant, la montée est de plus en plus rapide, en particulier depuis les années 1900 (fig. 11). Comme pour la température, la tendance ascendante à long terme du niveau des mers a fluctué suivant les décennies. Ainsi, l'augmentation a été moins sensible au début du siècle et pendant une bonne partie des années 1960 et 1970 ; le niveau des mers a augmenté plus rapidement durant les années 1930 et jusqu'aux années 1950. À l'heure actuelle, les observations satellitaires et par marégraphe laissent entrevoir une hausse globale du niveau des mers de $3,3 \pm 0,25 \text{ cm}$ par décennie depuis 1993 (Church *et al.*, 2013).

⁴ Ces processus ont eu des effets non négligeables sur l'élévation du niveau des mers. Des observations donnent à penser que la contribution de la perte de glace du Groenland est passée de 0,09 (-0,02 à 0,20) mm an⁻¹ en 1992-2001 à 0,59 (0,43 à 0,76) mm an⁻¹ en 2002-2011, tandis que la contribution de la fonte de l'inlandsis de l'Antarctique est passée de 0,08 (-0,10 à 0,27) mm an⁻¹ en 1992-2001 à 0,40 (0,20 à 0,61) mm an⁻¹ en 2002-2011. Globalement, la contribution de la fonte des calottes glaciaires à l'élévation du niveau des mers est estimée à 0,60 (0,42 à 0,78) mm an⁻¹ pour la période 1993-2010 (GIEC, 2013).

Figure 11

Évolution estimative du niveau des mers (mm) depuis 1900. Jusqu'en 1992, les données correspondent aux relevés des marégraphes de Church et White (2011), le taux de variation étant multiplié par 0,78, de façon à produire sur la période 1901-1990 une augmentation moyenne de 1,2 mm an⁻¹ (Hansen *et al.*, 2016)



22. L'évolution du niveau moyen de la mer et les variations du climat régional ont entraîné des modifications des tendances observées pour les niveaux extrêmes de pleine mer à la fin du XX^e siècle. L'élévation du niveau de la mer le long des côtes se caractérise par une importante variabilité régionale (spatiale) (Menendez et Woodworth, 2010). En Europe, le niveau marin augmente sur l'essentiel du littoral depuis une quarantaine d'années, sauf au nord de la Baltique (AEE, 2012). La hausse du niveau de la mer est plus marquée dans certaines régions que dans d'autres. C'est dans l'ouest du Pacifique tropical que l'on a observé certaines des plus fortes hausses sur la période 1993-2015, ce qui pourrait avoir contribué à aggraver la situation lors du passage, en novembre 2013, du typhon *Haiyan* qui a engendré une onde de tempête massive et dévasté plusieurs secteurs de l'archipel des Philippines.

1.1.4 Phénomènes climatiques extrêmes

23. Les changements climatiques sont souvent assimilés, dans le débat public, à l'augmentation de la température moyenne du globe. Cependant, pour la société, l'économie et l'environnement, les effets s'exerçant au niveau régional et les variations de phénomènes extrêmes comme les vagues de chaleur, les épisodes de sécheresse ou les inondations sont généralement plus pertinents (Vogel *et al.*, 2017). Il est essentiel de comprendre et de faire connaître les répercussions réelles de tels événements sur l'infrastructure et les activités pour un objectif de température planétaire donné (Seneviratne *et al.*, 2016). Des changements dans les conditions climatiques moyennes peuvent modifier la fréquence, l'intensité, l'étendue géographique, la durée et la date d'apparition des extrêmes météorologiques et climatiques, donnant potentiellement lieu à des épisodes sans précédent. Ces phénomènes extrêmes peuvent à leur tour modifier la répartition des conditions climatiques ultérieures ; à l'avenir, les valeurs moyennes de certaines variables climatiques devraient ainsi correspondre aux valeurs extrêmes des conditions observées actuellement (GIEC, 2013).

24. Les phénomènes extrêmes (tempêtes, inondations, sécheresse, vagues de chaleur, etc.) ainsi que les changements qui surviennent dans des régimes climatiques particuliers tels que les moussons (King *et al.*, 2015) peuvent avoir des répercussions plus profondes à une échelle spatio-temporelle réduite dans la mesure où ils produisent des effets soudains et des catastrophes naturelles plus graves que des changements dans les variables moyennes.

En outre, les sociétés sont rarement préparées à affronter efficacement des événements météorologiques extrêmes, car elles ont pris l'habitude de s'appuyer sur des régimes climatiques prévisibles à long terme (MetOffice, 2014). Aux États-Unis, les événements hydrométéorologiques extrêmes causent en moyenne 650 décès et 15 milliards de dollars de dommages par an et sont responsables de quelque 90 % des catastrophes déclarées comme telles par le Président. En outre, un bon tiers de l'activité économique (soit 3 000 milliards de dollars environ) semble être sensible aux conditions météorologiques et climatiques ; depuis 1980, les États-Unis ont subi 208 catastrophes hydrométéorologiques, dont le coût total dépasse 1 100 milliards de dollars (NOAA, 2017c).

25. Bon nombre d'indicateurs d'extrêmes climatiques ont fait apparaître des changements qui concordent avec le réchauffement, notamment une diminution généralisée du nombre de jours de gel dans les zones situées à des latitudes moyennes et des signes perceptibles que les températures les plus chaudes sont devenues plus élevées et que les températures les plus basses sont désormais moins froides dans de nombreuses régions (GIEC, 2013). Les éléments disponibles laissent entrevoir une modification générale de la fréquence des extrêmes en termes de précipitations et de températures à fort impact sur les terres, indépendamment du type d'ensemble de données et de la méthode de traitement appliquée (MetOffice, 2014). Une légère diminution de la moyenne mondiale du nombre annuel de journées clémentes (jours où la température maximale est comprise entre 18 et 30 °C et où les précipitations sont inférieures à 1 mm) est prévue dans un avenir rapproché (4 jours/an pour la période 2016-2035 et 10 jours/an pour la période 2081-2100) (Van der Wiel *et al.*, 2017).

26. Les événements extrêmes ont des conséquences qu'il est difficile de prévoir. Ils sont très variables, qu'il s'agisse de changements brusques et éphémères des températures, de reculs rapides de la glace de mer, d'épisodes de précipitations anormalement fortes, de violents orages, d'ondes de tempête, de sécheresses prolongées, de vagues de chaleur, d'incendies de végétation, de dégagements soudains d'eau produits par la fonte des glaciers ou de l'affaissement du pergélisol, autant de phénomènes qui peuvent avoir des effets considérables et fort onéreux sur l'infrastructure. De plus, certains faits donnent à penser que les phénomènes extrêmes, comme les orages dans les zones tropicales et tempérées, s'exacerbent sous l'effet du réchauffement climatique (Emanuel, 2005 ; Ruggiero *et al.*, 2010 ; OMM, 2014 ; MetOffice, 2014). Une augmentation même modeste (de 5 m/s) de la vitesse du vent de surface des cyclones tropicaux provoquée par une hausse de 1 °C de la température de l'océan pourrait par exemple accroître nettement l'incidence des cyclones les plus intenses et les plus destructeurs (de catégorie 5) (voir notamment Steffen, 2009). De tels phénomènes risquent d'avoir des conséquences graves, notamment pour les populations et les infrastructures côtières, car ils augmentent la probabilité de niveaux marins extrêmes dus aux ondes et aux vagues de tempête (voir notamment Stockdon *et al.*, 2012) qui sont à leur tour à l'origine d'inondations du littoral, surtout lorsqu'à ces phénomènes s'ajoute l'élévation prévue du niveau moyen de la mer (Hallegatte *et al.*, 2013).

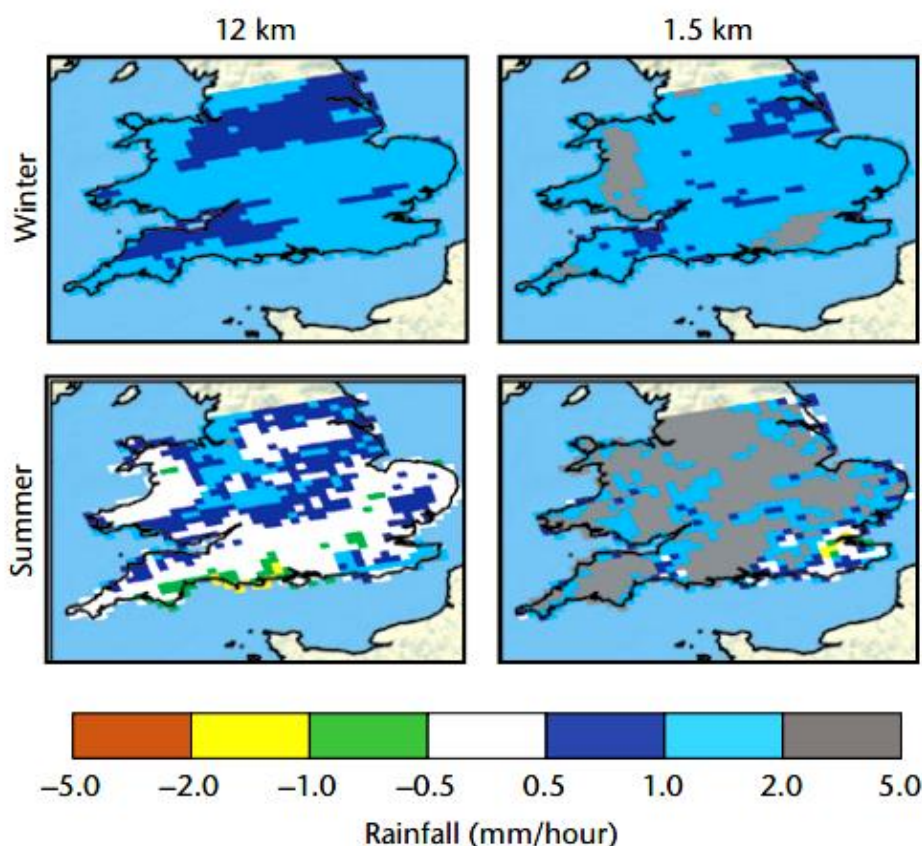
27. En outre, l'augmentation de l'amplitude et de la fréquence des vagues géantes ou une modification de leur configuration (voir par exemple Ruggiero, 2013 ; Bertin *et al.*, 2013 ; Mentaschi *et al.*, 2017) entraîne aussi, ne serait-ce que temporairement, une érosion ou une submersion du littoral, surtout lorsque ces phénomènes se produisent dans un contexte d'élévation du niveau moyen de la mer (voir notamment Losada *et al.*, 2013 ; Vousdoukas *et al.*, 2017). Les ondes de tempête menacent tout particulièrement les zones côtières très développées, en particulier les parties basses de deltas comme ceux du Rhin, du Danube ou du Mississippi, qui sont considérées comme des points chauds de l'érosion et de la vulnérabilité côtières en raison de l'élévation fréquemment importante des niveaux marins moyens (CEE, 2013). En Europe du Sud, l'analyse des niveaux extrêmes de la mer le long des côtes et des ondes de tempête enregistrés à l'aide de marégraphes a montré que les variations des niveaux extrêmes des eaux sont le plus souvent influencées par l'élévation moyenne du niveau de la mer (Marcos *et al.*, 2011, par exemple). On peut affirmer avec certitude que le littoral actuellement exposé à l'érosion ou aux inondations continuera de l'être à l'avenir, en raison de l'élévation du niveau de la mer, toutes choses étant égales par ailleurs (Hallegatte *et al.*, 2013 ; Vousdoukas *et al.*, 2017). L'élévation prévue des niveaux marins extrêmes représente une menace sérieuse pour les sociétés côtières à l'échelle mondiale. Leur sécurité et leur résilience dépendent de l'efficacité de la

protection tant naturelle qu'artificielle contre les inondations du littoral, c'est-à-dire de la capacité de la côte à servir de tampon et à absorber l'énergie des océans par les processus de réfraction et de déferlement de la houle (Vousdoukas *et al.*, 2012, par exemple).

Figure 12

Variations futures des fortes précipitations dans les modèles à résolution de 12 km (à gauche) et de 1,5 km (à droite), en hiver (partie du haut) et en été (partie du bas)

(Les modèles présentent l'un et l'autre une intensité pluviométrique horaire plus marquée en hiver, mais le modèle à résolution de 1,5 km fait apparaître également une augmentation sensible de l'intensité des précipitations de courte durée en été. Ces changements s'entendent à l'horizon 2100, selon le scénario de fortes émissions RCP8.5 (Met Office, 2014))



28. L'une des tendances les plus marquées semble être la fréquence et l'intensité croissantes des violentes averses, qui sont à l'origine de la hausse générale des précipitations des cinquante dernières années. Les projections des modèles climatiques donnent à penser que cette tendance se poursuivra au cours de ce siècle (Karl *et al.*, 2009). Selon un modèle à haute résolution (MetOffice, 2014), les étés au Royaume-Uni devraient devenir de plus en plus secs jusqu'en 2100, mais les précipitations estivales seront plus fortes (fig. 12). Il est probable que la fréquence de ces phénomènes s'intensifiera dans de nombreuses régions au XXI^e siècle, principalement dans les hautes latitudes et en zone tropicale, et dans les latitudes moyennes septentrionales en hiver. Il a été établi avec un degré de certitude moyen que les épisodes de fortes précipitations augmenteront également dans les régions où les pluies devraient globalement diminuer (CEE, 2013).

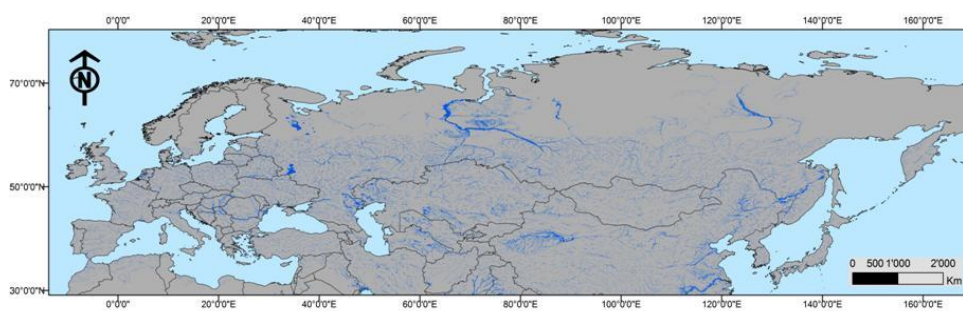
29. Les crues constituent l'aléa météorologique le plus grave et le plus répandu (King *et al.*, 2015). Entre 1980 et 2014, elles ont été responsables de 41 % des dommages de tous types, de 27 % des décès et de 32 % des pertes matérielles (Munich Re, 2015). Les inondations dues aux crues font intervenir des facteurs physiques et socioéconomiques. Les premiers dépendent du cycle hydrologique, influencé par des variations des températures, des précipitations et la fonte des glaciers et de la neige, tandis que les seconds tiennent aux changements d'affectation des terres, aux dispositifs de gestion des cours d'eau et aux constructions en zone inondable (AEE, 2010). Dans la région de la CEE, les crues représentent une menace constante.

30. Dans les pays d'Europe et d'Asie, le risque de crues (de type centennial) est élevé, en particulier en Europe centrale et orientale, en Asie centrale et dans les grands bassins versants sud-nord de Sibérie (fig. 13). Cependant, les changements intervenant dans des phénomènes hydrologiques extrêmes et leurs effets sont mieux étudiés au niveau régional ou local, la plupart des études existantes étant consacrées à l'apparition et aux conséquences des crues dues notamment à une hausse des pluies torrentielles. En Europe, on a constaté une augmentation générale des débits annuels d'eau dans le nord et une baisse dans le sud du continent (AEE, 2012), tendance qui devrait se maintenir à l'avenir étant donné qu'elle est associée aux variations prévues des régimes des précipitations (AEE, 2015c). D'ici à 2050, il y a un risque d'au moins 50 % que les changements climatiques à eux seuls entraînent une augmentation de 50 % du nombre de personnes victimes d'inondations dans l'ensemble de l'Afrique subsaharienne, et de 30 à 70 % en Asie ; d'ici à 2100, les risques devraient être plus élevés (King *et al.*, 2015).

Figure 13

Risque actuel (probabilité : 95 %) de crues centennales dans la région eurasiennne de la CEE, calculé à partir d'un modèle SIG reposant sur des séries chronologiques des débits fluviaux

(Résolution à 90 m d'un modèle altimétrique numérique (MAN). Les zones situées au-delà de 60° de latitude nord ne sont pas intégralement couvertes (GRID du PNUE et SIPC, 2008). (CEE, 2013))



31. Il est à prévoir que les effondrements et glissements de terrain se multiplieront dans les régions montagneuses, car ils sont eux aussi liés à de fortes précipitations (voir notamment Karl *et al.*, 2009). Par conséquent, les dégâts dus aux crues, notamment en Europe, devraient considérablement s'accroître d'ici à la fin du siècle, en étant généralement plus importants dans le nord que dans le sud (Alfieri *et al.*, 2015). Certains éléments donnent à penser que la fréquence et l'intensité des vagues de chaleur augmenteront également (voir notamment Beniston et Diaz, 2004 ; GIEC, 2013) ; de manière générale, on constate une multiplication par trois des pics de chaleur mensuels observés depuis les années 1920 par rapport à ce que l'on pourrait attendre dans un contexte de stabilité climatique (Coumou et Rahmstorf, 2012). À l'échelle mondiale, il ressort des modèles que, compte tenu de la hausse continue des températures moyennes, une augmentation de la fréquence et de l'ampleur des journées et des nuits chaudes et une diminution des journées et des nuits froides sont quasiment certaines (GIEC, 2013). Depuis les années 1950, le nombre de journées et de nuits exceptionnellement froides a très probablement diminué, tandis que le nombre de journées et de nuits particulièrement chaudes a augmenté à l'échelle de la planète (sur les terres émergées pour lesquelles on détient suffisamment de données). La majeure partie de l'Amérique du Nord semble par exemple avoir connu davantage de journées et de nuits torrides, moins de journées et de nuits de grand froid et moins de journées de gel (CEE, 2013). Les vagues de chaleur sont souvent liées à de graves sécheresses (comme celle de l'été 2003 en Europe, par exemple). En règle générale, les épisodes de sécheresse s'aggravent dans certaines régions, tendance qui devrait perdurer (voire se renforcer) au XXI^e siècle (GIEC, 2013).

1.1.5 La période 2011-2016

Températures et précipitations

32. Les six dernières années (2011-2016) ont été la période la plus chaude jamais enregistrée. Les températures ont été supérieures de 1 °C à la moyenne de 1961-1990 (dans la majeure partie de l'Europe, dans le nord de l'Asie et dans le sud-ouest des États-Unis) et supérieures de 3 °C à la moyenne dans certaines parties de l'Arctique russe. L'année 2016 a battu tous les records (1,1 °C de plus que la moyenne de 1901-2000 qui était de 14,0 °C), annulant les records précédents de 2015 et 2014, avec une température moyenne des terres émergées atteignant un niveau sans précédent (fig. 14).

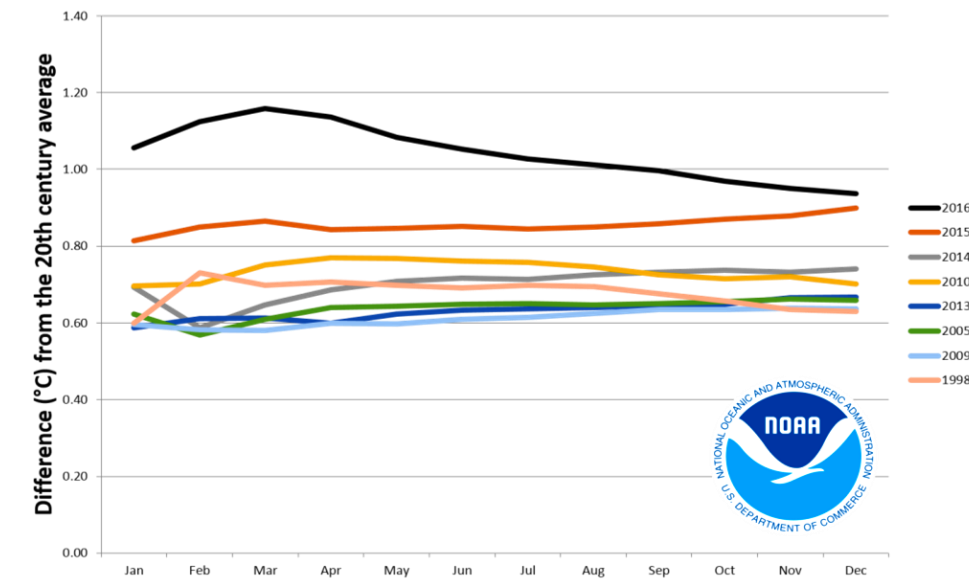
33. En 2016, la température moyenne mondiale a été de $0,83 \pm 0,10$ °C plus chaude que la moyenne de la période de référence 1961-1990 et d'environ 1,1 °C au-dessus de la période préindustrielle. Il s'agit de l'année la plus chaude jamais enregistrée, tant pour les terres et les océans que pour les deux hémisphères. Les températures moyennes sur cinq ans ont également atteint leurs valeurs les plus élevées jamais enregistrées, la période 2012-2016 étant de 0,65 °C supérieure à la moyenne de 1961-1990. Les températures mondiales sont restées compatibles avec une tendance au réchauffement de 0,1 °C à 0,2 °C par décennie (OMM, 2017). La quasi-totalité de l'Eurasie a largement dépassé les valeurs moyennes de température. Les anomalies saisonnières sont également à signaler : les printemps les plus chauds jamais relevés ont été observés en Amérique du Nord (2012) et en Europe (2014), tandis que l'été le plus chaud en Amérique du Nord a été celui de 2012. Pour la première fois, l'année 2015 a dépassé de 1 °C, voire plus, la moyenne globale des températures de la période 1880-1899, tendance qui s'est poursuivie en 2016 (NOAA, 2017b). À l'échelle mondiale, bon nombre des années les plus chaudes se sont produites depuis 1998 (fig. 14).

34. Des phénomènes du type d'El Niño (ou La Niña) qui ont le pouvoir de réchauffer ou de refroidir la partie tropicale de l'océan Pacifique peuvent être la cause d'une variabilité à court terme des températures mondiales. Un épisode El Niño s'est produit en 2015 et dans la première partie de 2016. Des travaux de recherche laissent entrevoir des effets directs de cet épisode ; le réchauffement du Pacifique tropical (fig. 15) a accentué l'anomalie annuelle de la température mondiale pour 2016 de près de 0,1 °C (NOAA, 2017b).

35. Pour la période considérée, les températures à la surface de la mer ont été supérieures à la moyenne dans la plupart des océans, à l'exception de certains secteurs de l'océan Austral et de la partie orientale du Pacifique sud. Des températures plus chaudes ont également été observées sous la surface de l'eau, le contenu thermique intégré des océans enregistré dans la couche 0-700 m étant supérieur en 2013 et 2014 à celui de toute autre période selon cinq ensembles de données différents (NOAA, 2016). Deux anomalies notables des températures océaniques ont été observées à la fin de 2013 : i) une masse importante d'eau très chaude (>2 °C au-dessus de la moyenne) dans la partie orientale du Pacifique Nord ; et ii) la persistance de températures de surface inférieures à la normale dans la partie orientale de l'Atlantique Nord.

Figure 14

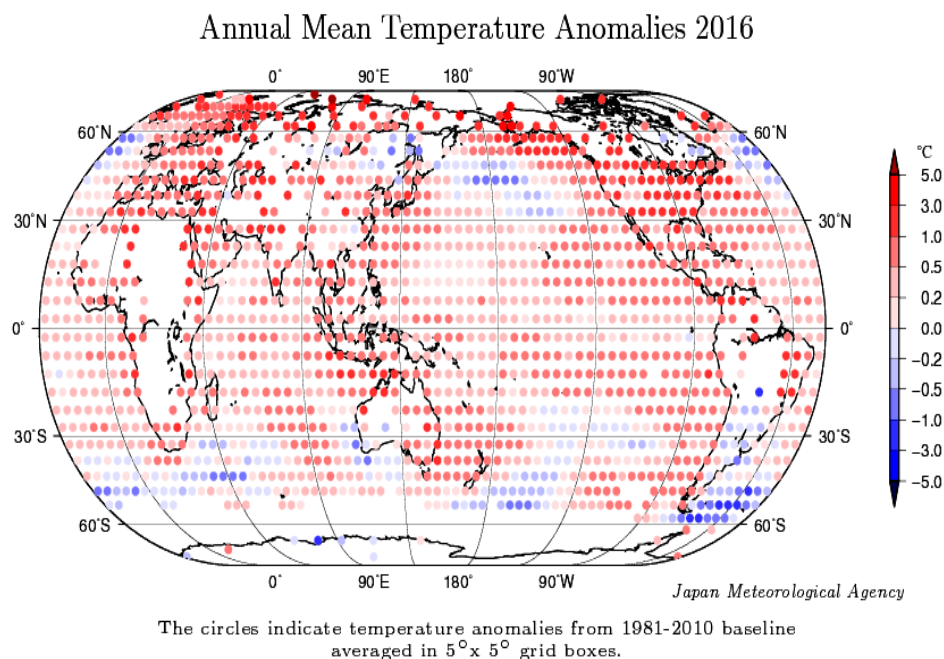
La période 2011-2016 a été la plus chaude jamais enregistrée, avec des températures supérieures de 0,57 °C à la moyenne de 1961-1990 et de 0,51 °C à la moyenne de 2006-2010. Les températures terrestres ont été supérieures de 1 °C à la moyenne de 1961-1990 pour la majeure partie de l'Europe, le sud-ouest des États-Unis et la partie asiatique de la Fédération de Russie, ainsi que la plupart des régions situées au nord du 60° parallèle nord (NOAA, 2017b)



36. Les précipitations sur la terre ferme ont été fortement influencées au début et vers la fin de la période 2011-2016 par le phénomène d'oscillation australe El Niño (ENSO), compte tenu des conditions La Niña qui ont prévalu pendant la majeure partie de 2011 et au début de 2012, et d'un fort épisode El Niño en 2015 et au début de 2016. La NOAA a désigné 2011 comme la deuxième année la plus humide pour l'ensemble du globe terrestre depuis qu'existent les relevés, 2012, 2013 et 2014 étant proches de la moyenne à long terme. L'une des principales caractéristiques de cette période de six ans est la présence d'anomalies pluviométriques pluriannuelles persistantes sur plusieurs régions, qui ont pour la plupart commencé après la fin de l'épisode La Niña de 2012. En 2016, les précipitations mondiales ont été fortement influencées par le passage des conditions El Niño au début de l'année à des conditions La Niña neutres ou faibles au second semestre. Il en est résulté d'importants contrastes saisonniers (mais des totaux annuels proches des conditions moyennes) dans de nombreuses régions. Cependant, dans d'autres régions, de fortes précipitations ont été enregistrées dans la période post-El Niño, ce qui a donné des totaux annuels nettement supérieurs à la moyenne (OMM, 2017).

37. Trois régions (la moitié est du Brésil, l'ouest des États-Unis et certaines zones de l'est de l'Australie) ont enregistré pour la période octobre 2012-septembre 2015 une pluviométrie inférieure au 10^e centile sur de vastes étendues, alors que les précipitations ont dépassé le 90^e centile dans d'autres régions (comme l'est de la Russie). En Europe, les conditions ont été très contrastées entre le nord et le sud, avec des épisodes particulièrement humides sur la Scandinavie et des conditions très sèches sur une grande partie de l'Europe centrale et de l'Europe du Sud-Est. Les grandes anomalies pluviométriques annuelles ont été moins courantes dans les années 2012-2014, les plus marquées étant observées dans le nord-est de l'Europe, dans certaines parties de la Chine et de l'Argentine (2012) et dans le sud-est de l'Europe (2014) ; dans la région de la CEE, des conditions de grande sécheresse ont sévi dans la majeure partie du centre des États-Unis et dans le centre (2012) et l'ouest de la Russie (2014).

Figure 15
Anomalies de température relevées en 2016 (Japan Meteorological Agency, 2017)



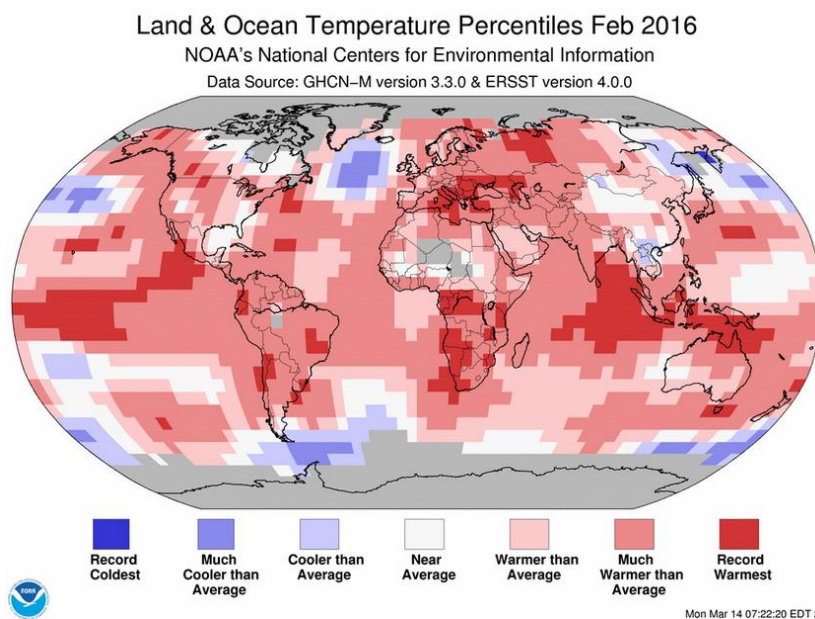
38. L'année 2016 a été humide dans de nombreuses régions des hautes latitudes de l'hémisphère Nord. Les précipitations ont dépassé le 90^e centile dans une vaste zone s'étendant du Kazakhstan à la Russie occidentale et jusqu'en Norvège en passant par la Finlande et le nord de la Suède. En revanche, elles ont été le plus souvent déficitaires dans le centre-nord de la Fédération de Russie, passant en dessous du 10^e centile dans une grande partie de la région située entre l'Oural et le lac Baïkal et au nord de 55 °N. La côte ouest de l'Amérique du Sud, soumise d'ordinaire à une abondante pluviosité dans sa partie tropicale lors des années caractérisées par un épisode El Niño de forte intensité, n'a reçu que des précipitations éparses durant les premiers mois de l'année (avec un cumul saisonnier généralement proche de la normale). Autre région atypique, la Californie a enregistré un cumul saisonnier 2015-2016 proche de la normale (après quatre années très sèches d'affilée), avec toutefois des précipitations qui se sont accrues vers la fin de 2016.

39. Les précipitations ont été proches de la moyenne sur la majeure partie de l'Europe centrale et occidentale, avec un premier semestre très arrosé et un second semestre sec. Elles ont été abondantes sur la bordure occidentale de l'Europe pendant l'hiver 2015/16, au deuxième rang des plus humides pour le Royaume-Uni. Mai et juin ont été eux aussi très pluvieux en maints endroits de l'ouest et du centre de l'Europe, où des inondations de grande ampleur se sont produites en France et en Allemagne. Cependant, la période de juillet à septembre a été sèche, les mois de juillet et d'août étant les plus secs qu'ait connus la France. Le mois de décembre a également été extrêmement sec, de nombreuses régions ayant reçu moins de 20 % de la quantité normale de précipitations. Il s'inscrit au premier rang des moins arrosés et au troisième rang des mois les plus secs qu'ait connus le plateau suisse. Un exemple particulier de la grande variabilité des précipitations en 2016 est celui de la Belgique : Uccle a enregistré une pluviosité record (62 % de plus que la normale) entre janvier et juin, tandis que la période juillet-décembre se place au troisième rang des plus sèches (36 % de moins que la normale) (OMM, 2017).

Étude de cas : février 2016, mois de février le plus chaud jamais enregistré

Février 2016, avec une température moyenne mesurée sur les terres émergées et à la surface des océans supérieure de 1,21 °C à la moyenne du XX^e siècle, qui était de 12,1 °C, a battu tous les records pour un mois de février depuis que les relevés existent, dépassant de 0,33 °C le précédent record de 2015 (NOAA, 2016d). Dans l'ensemble, les six écarts mensuels de température les plus marqués par rapport aux valeurs précédemment enregistrées se sont tous produits durant la période septembre 2015-février 2016.

Dans l'hémisphère Nord, une vaste région couvrant le centre de la Russie et l'est de l'Europe (et aussi l'Alaska) a connu un écart de plus de 5 °C par rapport à la moyenne des températures de février de la période 1981-2010. En Asie, quelques poches ont été plus fraîches que la moyenne, y compris une partie du grand est de la Russie.



Anomalies des températures terrestres/océaniques pour février 2016 par comparaison avec la moyenne mondiale (NOAA, 2016d)

Glace et manteau neigeux

40. Composante du système terrestre, la cryosphère englobe les précipitations solides, le manteau neigeux, les glaces de mer, de lac et de rivière, les glaciers et les calottes glaciaires, les inlandsis et les sols gelés de façon permanente ou saisonnière. Bien qu'elle constitue l'un des principaux indicateurs des changements climatiques, c'est sans doute la moins explorée de toutes les composantes du système terrestre. Dans l'idéal, il faudrait mesurer une trentaine au moins des propriétés de la cryosphère. Beaucoup d'entre elles se mesurent en surface, mais le réseau d'observation est généralement peu dense. Cependant, certaines propriétés sont mesurées par satellite depuis de nombreuses années. Les principaux éléments de la cryosphère qui ont fait l'objet d'une évaluation en 2016 sont le manteau neigeux, les glaces de mer, les glaciers et les inlandsis.

41. En dépit des températures généralement élevées de la période de six ans qui vient de s'écouler, l'hémisphère Nord a encore connu des épisodes de neige et de froid anormaux. Une période prolongée de grand froid a touché l'Europe en février 2012. Il s'agissait du pire épisode de froid depuis 1985 ou 1987 dans de nombreuses régions d'Europe centrale et occidentale, avec des températures restant constamment négatives pendant deux semaines ou plus dans la majeure partie de l'Europe centrale, même si aucun record de basse température n'a été établi. Cet épisode a également été accompagné d'averses de neige extrêmement abondantes en certains endroits, notamment dans des régions de l'est de l'Italie. Mars 2013 a été particulièrement froid dans une grande partie de l'Europe, balayée à certains endroits par un fort blizzard. Les hivers 2013/14 et 2014/15 ont l'un et l'autre été

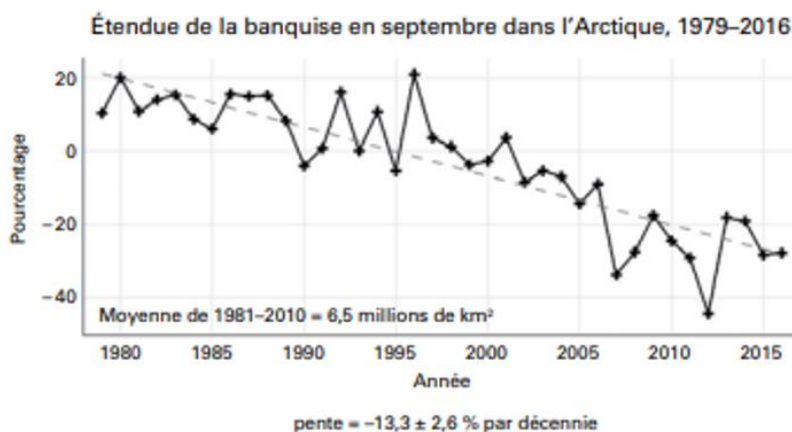
nettement plus froids que la normale dans bon nombre de régions du centre et de l'est des États-Unis et dans la partie sud du Canada, où les températures sont longtemps restées sous la normale (sans établir de record). Le froid a surtout persisté en février 2015, les températures restant négatives à Montréal, Toronto et Syracuse. Les régions côtières ont essuyé de fréquentes averses de neige qui ont valu à Boston la chute de neige la plus abondante jamais enregistrée à cette saison (OMM, 2016).

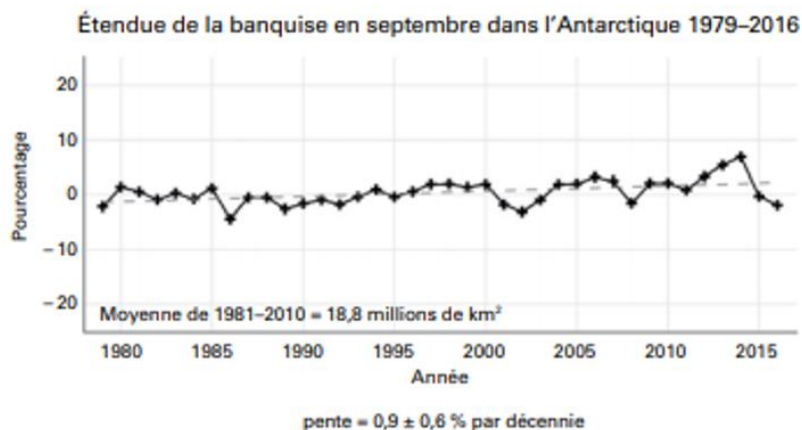
42. En moyenne annuelle, l'étendue du manteau neigeux dans l'hémisphère Nord était de 24,6 millions de km² en 2016, soit un déficit de 0,5 million de km² par rapport à la moyenne de la période 1967-2015 ; elle a été très proche des valeurs de 2015 (voir également la figure 8). Après avoir été supérieure à la normale en janvier, l'étendue du manteau neigeux a accusé un net déficit de février à juin, l'écart par rapport à la normale oscillant entre 2,4 et 3,3 millions de km². Atteignant un minimum record en avril, son étendue mensuelle moyenne se classait au deuxième rang des plus faibles en mars, au troisième rang en février et juin, et au quatrième rang en mai. Cependant, comme les trois années précédentes, la couverture neigeuse en automne a été supérieure à la normale, avec des anomalies positives en septembre et chaque mois d'octobre à décembre. Il n'existe pas de relevés comparables pour l'hémisphère Sud où, à l'exception de l'Antarctique, la neige est généralement cantonnée aux régions de haute montagne. En Australie, la hauteur de neige maximale enregistrée à Spencers Creek dans les Snowy Mountains était légèrement inférieure à la moyenne, mais des précipitations abondantes combinées à des températures anormalement basses en septembre et octobre ont prolongé la saison froide (OMM, 2017).

43. L'étendue de la banquise arctique a été bien inférieure à la normale tout au long de 2016, affichant même des minima record sur une grande partie de l'année. Le maximum saisonnier de 14,52 millions de km² (atteint le 24 mars), le plus faible qui ait été observé par satellite depuis 1979 (fig. 16), est juste inférieur à celui de 2015. Des minima record ont été enregistrés en mai et juin, mais en raison d'une fonte estivale relativement lente, le minimum saisonnier (4,14 millions de km²) était en fait supérieur au minimum record de 2012. Les glaces ont tardé à se former à l'automne 2016. L'étendue moyenne de la banquise en novembre – 9,08 millions de km² – était inférieure de 0,8 millions de km² au précédent minimum record pour ce mois. L'étendue de la banquise antarctique a été proche de la moyenne de la période 1979-2015 durant les huit premiers mois de 2016, atteignant son maximum de 18,44 millions de km² à la fin août, date la plus précoce qui ait été constatée pour un maximum saisonnier. Le dégel printanier a été extrêmement rapide, l'étendue moyenne de la banquise en novembre – 14,54 millions de km² – étant de loin la plus faible jamais constatée pour ce mois (1 million de km² de moins que le minimum record précédent). On ne connaît pas bien encore les causes de l'effondrement de la banquise à la fin 2016, même s'il semble probable que les vents soufflant dans cette région aient joué un rôle (OMM, 2017).

Figure 16

Étendue de la banquise en septembre a) dans l'Arctique et b) dans l'Antarctique : pourcentage de la normale de la période de référence 1981-2010 (Source : OMM à partir de données du Centre national de données sur la neige et la glace (NSIDC) des États-Unis) (OMM, 2017)





44. La banquise ayant accusé des minima record dans l'une et l'autre des deux régions polaires, son étendue en novembre était bien inférieure à la normale également à l'échelle du globe. Après être restée inférieure d'au moins 1 million de km² à la moyenne de la période 1979-2015 pendant la majeure partie de l'année, l'étendue de la banquise a accusé en novembre un écart encore plus important par rapport à la normale, avec un déficit sans précédent de plus de 4 millions de km². En décembre, l'anomalie s'est légèrement atténuée.

45. Au cours de ces dernières années (2011-2016), la régression de la banquise arctique s'est poursuivie, dépassant la valeur moyenne de la période 1981-2010, notamment quant à l'étendue hivernale maximale. Par comparaison, l'étendue des glaces dans l'océan Austral a atteint 20,16 millions de km² en septembre 2014, soit 1,45 million de km² de plus que la moyenne de 1981-2010, marquant du même coup une valeur record dans les relevés par satellite. Du fait de la glaciation hivernale exceptionnellement lente de 2015, l'étendue de la banquise est revenue à des niveaux proches de la normale au printemps, avec un maximum début octobre de 18,83 millions de km², soit 0,7 % au-dessus de la moyenne de 1981-2010 (OMM, 2017).

46. Les glaciers de montagne ont eux aussi continué de reculer ces dernières années, tandis qu'on observait parallèlement un réchauffement jusqu'à une profondeur de 20 m dans les zones de pergélisol de l'Arctique. La température du pergélisol a gagné jusqu'à 2 °C dans la plupart des régions depuis 1980, causant d'importants dommages à l'infrastructure. Depuis 1930, l'épaisseur du pergélisol dans l'hémisphère Nord a perdu 0,32 m (GIEC, 2013). L'étendue du manteau neigeux a également été nettement inférieure à la moyenne au cours de la période 2011-2016. Dans l'hémisphère Nord, les anomalies constatées quant à l'étendue de cette couverture neigeuse ont fait apparaître une forte variabilité saisonnière, mais l'étendue moyenne générale sur cette période de cinq ans a été proche de la moyenne de 1981-2010. L'anomalie saisonnière la plus marquée est survenue à l'hiver 2013, lorsque l'étendue de la couverture neigeuse est apparue très supérieure à la normale (OMM, 2014).

47. Des données du Service mondial de surveillance des glaciers montrent que le recul des glaciers de montagne s'est poursuivi en 2016. Les glaciers de référence pour lesquels on dispose de données pour 2015/16 ont un bilan de masse moyen de -858 mm, un seul des 26 glaciers considérés ayant un bilan de masse positif. Le déficit est moins marqué que celui de 2014/15, tout en étant supérieur à la moyenne de la période 2003-2015. La fonte de l'inlandsis groenlandais entre septembre 2015 et août 2016 s'est poursuivie à un rythme proche des moyennes récentes. Le bilan de masse en surface pour cette période était proche de la moyenne des années 1990 à 2013, l'accumulation de neige pendant la saison froide étant contrebalancée par une déperdition plus marquée que la normale en été. La diminution de la surface glaciaire est la plus importante qui ait été constatée depuis 2012 (OMM, 2017).

Hausse du niveau des mers

48. Durant la période 2011-2016, le niveau moyen des mers a continué d'augmenter. Au début de cette période, il était environ 10 mm au-dessous de la tendance à long terme (en raison probablement de la vigueur du phénomène La Niña). Cependant, dès la mi-2012, le

niveau moyen des mers s'est mis à remonter. Une hausse marquée s'est produite au début de 2015 (quand El Niño de 2015/16 a commencé à produire ses effets), et le niveau de la mer a dépassé d'environ 10 mm la tendance à long terme.

49. Par comparaison avec les relevés satellitaires complets (1993-2015, tendance : 3 mm an⁻¹) cela représente une hausse nettement supérieure à la moyenne de 1900-2010 (1,7 mm an⁻¹). Des éléments donnent à penser que la contribution de la fonte des calottes glaciaires continentales, particulièrement celles du Groenland et de l'Antarctique ouest, à l'élévation du niveau des mers s'accroît. Durant la période 2011-2013 (englobant l'année 2012 où a été enregistré un phénomène extrême de fonte des glaces), la fonte de l'inlandsis groenlandais a contribué pour 1 mm/an environ à la hausse du niveau des mers à l'échelle mondiale, soit bien plus que ce qui avait été estimé (0,6 mm an⁻¹) pour la période 2002-2011 (GIEC, 2013).

50. S'agissant de l'océan Pacifique, les importantes différences régionales apparues au cours de la période 1993-2014 ont été attribuées aux épisodes El Niño et La Niña. La partie ouest du Pacifique a enregistré les hausses les plus rapides du niveau de la mer durant cette période (>10 mm an⁻¹ par endroits) par comparaison avec la partie est. L'élévation du niveau de la mer a été plus homogène dans l'océan Atlantique et l'océan Indien, avec des valeurs comparables à la moyenne mondiale sur la majeure partie de ces deux océans. À l'échelle mondiale, le niveau de la mer a nettement augmenté lors de l'épisode El Niño 2015/16, d'environ 15 mm entre novembre 2014 et février 2016, soit une valeur bien supérieure au rythme annuel de 3 mm constaté après 1993.

Phénomènes extrêmes de la période 2011-2016

51. De nombreux phénomènes météorologiques et climatiques extrêmes (vagues de chaleur et de froid, cyclones tropicaux, inondations, sécheresse, violentes tempêtes, etc.) se sont produits au cours de la période 2011-2016. Plusieurs de ces phénomènes ont occasionné des pertes et des dommages considérables, comme les inondations de 2011 en Asie du Sud-Est, l'ouragan Sandy dans les Caraïbes et aux États-Unis (2012), les épisodes de sécheresse dans le sud et le centre des États-Unis (2012 et 2013) et les inondations de mai-juin 2013 en Europe centrale (fig. 17).

Figure 17

Dégâts causés par les inondations sur les routes européennes en juin 2013 :

- a) autoroute 8 à Grabenstaett, au sud de l'Allemagne (Matthias Schrader, AP) ;**
b) Tyrol autrichien (Kerstin Joensson, AP)

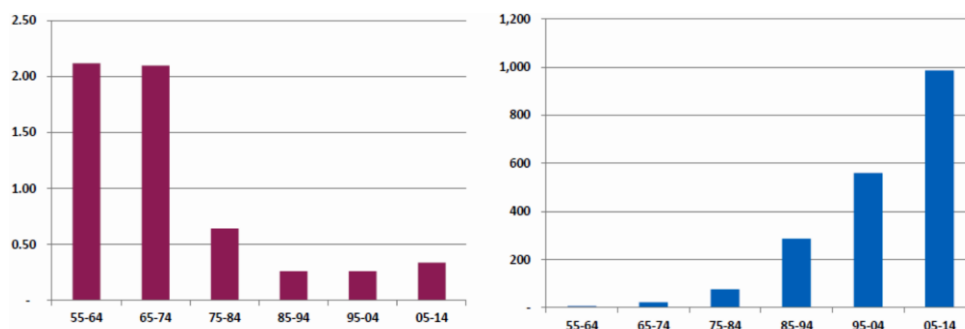


52. Le bilan humain ne suit heureusement pas la tendance ascendante observée en ce qui concerne les préjudices économiques (fig. 18). En termes de victimes, les inondations éclair qui ont frappé le sud du Brésil et l'Asie du Sud-Est ont causé 1 700 décès (2011), tandis que le typhon *Haiyan* (Yolanda) aux Philippines et les inondations du nord de l'Inde en ont causé 13 600 (2013). En Inde et au Pakistan, les vagues de chaleur de mai-juin 2015 ont tué plus de 3 700 personnes. Le phénomène extrême ayant causé le plus grand nombre de morts a été la sécheresse qui a frappé la Corne de l'Afrique en 2010-2011, probablement responsable de la famine qu'a connue la Somalie à la fin de 2010 jusqu'au début de 2012, à l'origine de 258 000 morts supplémentaires (OMM, 2016).

Figure 18

Pertes en vies humaines (à gauche) et pertes économiques (à droite) par décennie

(Pertes économiques en milliards de dollars des États-Unis, ajustés en 2013 (NOAA, 2017c))



53. Dans l'ensemble, la moyenne des pertes dues à des phénomènes catastrophiques en 1980-2016 s'est établie à 5,5 milliards de dollars (ajustés en fonction de l'indice des prix à la consommation) par an, le coût annuel atteignant 10,6 milliards de dollars pour les cinq années les plus récentes (2012-2016) (NOAA, 2017c).

54. D'importantes vagues de chaleur ont été enregistrées en Europe durant les étés 2012, 2013 et 2014. En Autriche, la température a pour la première fois atteint, voire dépassé les 40 °C. La canicule a longuement touché de nombreuses régions de l'Asie de l'Est en juillet-août 2013. Les vagues de chaleur les plus intenses ont été enregistrées en mai et en juin 2015 en Inde et au Pakistan, où la température a atteint, voire dépassé les 45 °C dans la période précédant la mousson. L'Europe occidentale et centrale a subi sa plus forte vague de chaleur depuis 2003 au cours de la première quinzaine de juillet 2015, période pendant laquelle l'Espagne, la France et la Suisse ont battu tous leurs records de température. Quelques semaines plus tard, des températures de 40,3 °C ont également été relevées en Allemagne.

55. De graves épisodes de sécheresse se sont produits en 2011-2015. L'Amérique du Nord (États-Unis et nord du Mexique) ont connu de tels épisodes en 2011, 2012 et 2013. En juillet 2012, pas moins de 64,5 % du territoire des États-Unis ont été déclarés en état de sécheresse, soit la plus vaste superficie jamais concernée par un tel épisode depuis les années 1930. En 2011-2016, les précipitations ont en outre été inférieures de 30 % à la normale, ce qui a entraîné des pertes économiques totales de l'ordre de 60 milliards de dollars. Des épisodes prolongés de sécheresse se sont également produits en Australie et en Afrique australe, tandis que la quantité des pluies de mousson en Inde (juin-septembre) a été inférieure de 10 % à la normale à la fois en 2014 et en 2015. Ce pays a subi une forte vague de chaleur en avril et mai 2016. Le thermomètre est monté au niveau record de 51 °C dans la ville de Phalodi. Cette vague de chaleur a provoqué la mort de 160 personnes et a touché 330 millions d'Indiens.

56. Des vents violents et des tornades ont été à l'origine de destructions majeures. Le nombre de cyclones caractérisés par des vents de forte intensité s'est accru au cours de ces six années. La partie nord-ouest du Pacifique a été particulièrement active en 2013 et 2015, et la partie nord de l'Atlantique en 2011. Les États-Unis ont connu en 2011 une des saisons de tornades les plus actives, leur nombre total prenant la troisième place dans les relevés. Cependant, les tornades ont diminué en fréquence en 2012-2015, l'activité étant inférieure à la moyenne de 1991-2010. S'agissant des ouragans, *Sandy* a frappé les Caraïbes et la côte est des États-Unis en octobre 2012, occasionnant des dommages majeurs sous la forme de graves inondations côtières, de niveaux des eaux record et de débordements d'une ampleur exceptionnelle (GIEC, 2013). En tout, 233 décès ont été recensés aux États-Unis et dans les Caraïbes, tandis que les pertes économiques totales ont été estimées à 67 milliards de dollars. Les cyclones tropicaux ont également eu des conséquences majeures en Asie (comme les typhons *Haiyan* (Yolanda) et *Washi* (Sendong)) et le cyclone *Patricia* a été très intense avec des vents soufflant jusqu'à 322 km/h au Mexique.

57. Durant cette période, plusieurs tempêtes liées à des cyclones extratropicaux se sont produites en Europe. En 2013, le Danemark a enregistré la vitesse de vent la plus élevée de son histoire (53,5 m/s), ce qui a provoqué des dommages de grande ampleur (de même qu'au Royaume-Uni, en France, en Allemagne, aux Pays-Bas et en Suède). Les niveaux les

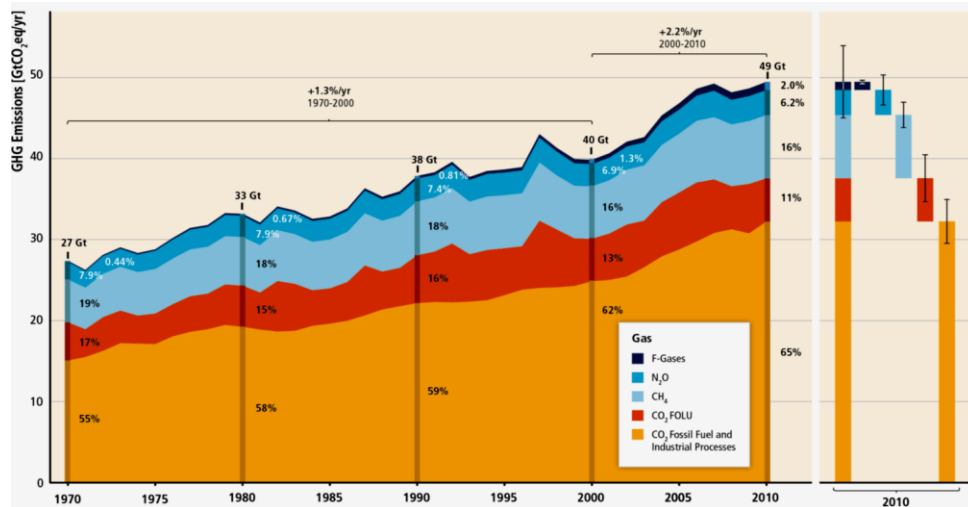
plus élevés d'onde de tempête depuis 1953 ont été observés aux Pays-Bas et au Royaume-Uni au cours de la même période. À l'hiver 2013/14, une succession de tempêtes a valu au Royaume-Uni son hiver le plus humide jamais enregistré, provoquant de surcroît d'importants dégâts dus au vent et une érosion des côtes (OMM, 2016).

58. En 2016, de violents orages et des tornades ont fait beaucoup de dégâts dans de nombreuses régions du monde. Le phénomène le plus dévastateur est survenu à Yancheng, dans la province chinoise du Jiangsu, où une tornade a causé la mort de 99 personnes. Cette tornade, l'une des plus destructrices qu'ait connues la Chine, est survenue alors que la région était frappée par de graves inondations. La saison des tornades aux États-Unis a été moins active que la normale pour la cinquième année consécutive, totalisant 985 phénomènes de ce type selon un décompte préliminaire, soit environ 10 % de moins que la moyenne calculée depuis 1990. Les forts orages ont toutefois été nombreux. Au Texas, deux violents orages de grêle ont causé des dommages d'un montant global supérieur à 5 milliards de dollars. Par ailleurs, l'orage survenu dans la province néerlandaise du Brabant a engendré des dégâts estimés à 500 millions d'euros. Des crues éclair se sont produites dans de nombreuses régions du monde, notamment à Houston (Texas) et en Tunisie. Des chutes de neige abondantes et exceptionnellement précoces se sont abattues sur la Scandinavie au début de novembre. La neige est aussi tombée en abondance et relativement tôt dans la saison au Japon : à Tokyo, c'est la première fois depuis le début des relevés, en 1875, qu'une hauteur de neige mesurable était observée en novembre (OMM, 2017 ; NSIDC, 2017).

1.1.6 Mécanisme de forçage

59. Les concentrations toujours plus importantes de gaz à effet de serre (GES) dans l'atmosphère sont considérées comme l'une des causes principales de l'augmentation observée de la chaleur à la surface de la planète. Ces gaz accentuent l'« effet de serre », un processus physique bien documenté du système terrestre que l'on connaît depuis le XIX^e siècle (voir notamment Canadell *et al.*, 2007). Tout changement dans la concentration de GES dans l'atmosphère influe sur l'ampleur de l'effet de serre. Présente en abondance, la vapeur d'eau est le gaz qui contribue le plus à l'effet de serre « naturel ». Il n'a pas encore été démontré que les activités humaines exerçaient un effet majeur direct sur les flux nets de vapeur d'eau en provenance ou à destination de l'atmosphère au niveau mondial (voir notamment Richardson *et al.*, 2009), bien que, localement, elles aient pu avoir une influence, par exemple à cause du déboisement et de grands ouvrages d'irrigation. Cela étant, vu que la capacité de l'atmosphère à retenir la vapeur d'eau est largement fonction de la température, la quantité de vapeur d'eau présente dans l'atmosphère est régulée par la température terrestre et augmente à mesure que la planète se réchauffe. La vapeur d'eau suit mais aussi amplifie les variations de la température mondiale dues à d'autres facteurs, tels que les concentrations croissantes d'autres gaz à effet de serre (voir notamment Richardson *et al.*, 2009).

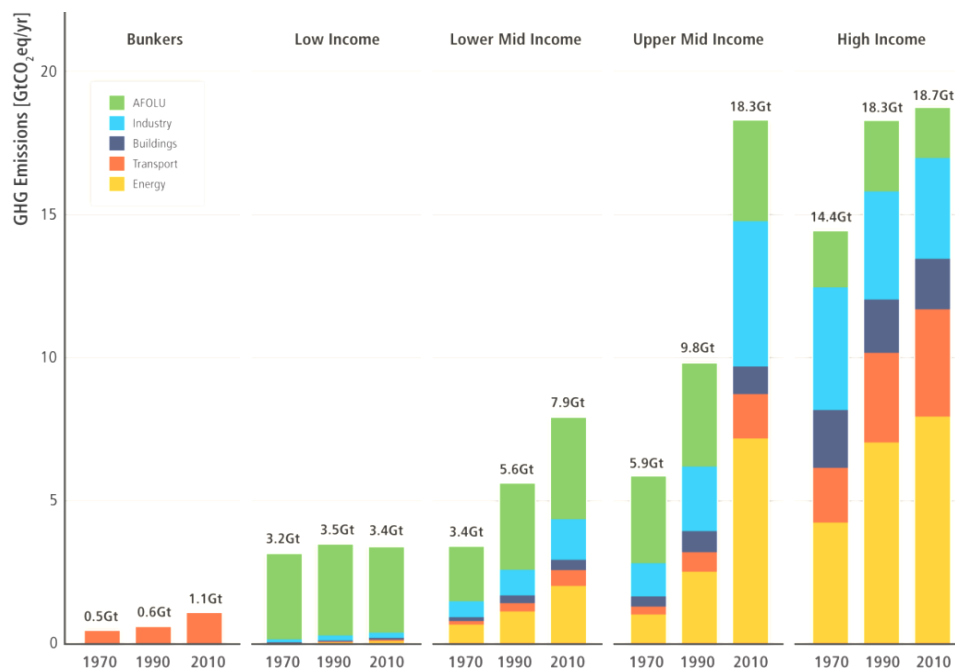
Figure 19
Production anthropique annuelle totale de gaz à effet de serre sur la période 1970-2010
 (GIEC, 2014)



60. Les gaz à effet de serre présents dans l'atmosphère absorbent la chaleur renvoyée par la surface de la Terre et contribuent du même coup à stocker plus de chaleur dans les océans, les terres émergées et l'atmosphère. Sans effet de serre, les températures moyennes sur la Terre seraient de l'ordre de -19°C (soit environ 34°C de moins que leur niveau actuel). Toutes les planètes qui contiennent dans leur atmosphère des gaz absorbant la chaleur sont soumises à l'effet de serre. La température extrême (environ 440°C) à la surface de Vénus, par exemple, s'explique par la teneur très élevée de son atmosphère en GES. L'augmentation observée de la chaleur de la Terre s'explique probablement (du moins en partie) par les concentrations atmosphériques croissantes de gaz à effet de serre qui absorbent la chaleur renvoyée par la surface de la Terre (GIEC, 2013). Il semble que les concentrations de dioxyde de carbone (CO_2), de méthane (CH_4) et d'autres GES dans l'atmosphère aient beaucoup augmenté ces dernières décennies, probablement en raison des activités humaines (voir notamment Caldeira, 2009). De plus en plus d'éléments donnent à penser qu'il existe un lien entre la concentration de ces gaz et le climat. La covariation de la teneur en CO_2 et de la température dans les relevés effectués à partir de carottes de glace de l'Antarctique, par exemple, laisse entrevoir un lien étroit entre CO_2 et climat durant les années glaciaires du pléistocène, dont la nature exacte n'est cependant pas claire (voir notamment Shakun *et al.*, 2012).

Figure 20

Production anthropique totale de gaz à effet de serre en 1970, 1990 et 2010 par secteur économique et par groupe de pays selon le niveau de revenu (GIEC, 2014)



61. Les mesures du CO₂ dans l'atmosphère et dans l'air piégé par la glace montrent que les gaz à effet de serre ont augmenté d'environ 40 % depuis 1800, l'essentiel de cette augmentation se produisant depuis les années 1970, avec l'accélération de la consommation d'énergie dans le monde (AEE, 2015a). De plus, les mesures pratiquées sur les carottes de glace donnent à penser que les concentrations actuelles de CO₂ n'ont jamais été aussi importantes depuis 800 000 ans, le jalon de 400 parties par million (ppm) ayant été franchi le 9 mai 2013 (NOAA, 2015). En dépit des nombreuses initiatives prises pour atténuer les effets des changements climatiques, les émissions anthropiques totales de gaz à effet de serre à l'échelle de la planète n'ont pas cessé d'augmenter sur la période 1970-2010, atteignant un record dans l'histoire de l'humanité en 2000-2010 (fig. 19) ; cette tendance s'est poursuivie en 2011-2015 (OMM, 2016).

62. Les taux d'accroissement des concentrations de CO₂ et de protoxyde d'azote (N₂O) en 2011-2014 ont été légèrement supérieurs à la moyenne de 1995-2014. La teneur en CH₄ a également affiché une hausse, après une période de relative stabilité en 1999-2006 (OMM, 2016). En 2014 et 2015, les concentrations moyennes annuelles de GES ont augmenté : en 2014, les concentrations de CO₂, CH₄ et N₂O ont été de 397 ppm, 1 833 parties par milliard (ppb) et 327,1 ppb, respectivement (NOAA, 2015). L'atmosphère a sans doute absorbé 44 % environ du CO₂ émis par l'activité humaine de 2004 à 2013, le reste (56 %) étant stocké par les océans et la biosphère terrestre (OMM, 2014, 2016).

63. Une ventilation des émissions anthropiques totales de gaz à effet de serre en 2010 a révélé que le CO₂ comptait pour 76 % dans ces émissions (65 % étant imputables à l'industrie et à la combustion d'énergies fossiles, et 11 % à l'exploitation des terres), le CH₄ pour 16 %, le N₂O pour 6 % et les gaz fluorés pour 2 % (GIEC, 2014). Ainsi qu'il ressort d'une analyse des émissions totales de CO₂ provenant des activités de combustion pour la période 1971-2010, la tendance à la hausse des émissions s'explique principalement par la croissance démographique et les modes de consommation/production (GIEC, 2014). Une évaluation des émissions de CO₂ rapportées au revenu des pays montre que celles-ci ont doublé dans les pays à revenu moyen supérieur (Chine et Afrique du Sud, par exemple) pour la période 1990-2010, atteignant pratiquement le niveau des pays à revenu élevé (comme les États-Unis et la plupart des pays de l'Union européenne) (fig. 20). On observe aussi une augmentation notable des émissions de CO₂ dans les pays à revenu moyen inférieur (GIEC, 2014).