



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****Dix-septième session**

Genève, 24 et 25 avril 2019

Point 4 de l'ordre du jour provisoire

Débat sur le rapport final du Groupe d'experts**Changements climatiques et variabilité du climat :
Tendances et projections*****Communication d'un consultant****I. Introduction**

1. Le présent document passe en revue les tendances récentes et les variations de différents facteurs climatiques qui peuvent peser sur les transports, ainsi que les récentes projections de l'évolution de ces facteurs au XXI^e siècle. À sa seizième session, le Groupe d'experts a demandé que cette étude de cas soit présentée officiellement à la dix-septième session.

**II. Changements climatiques et variabilité du climat¹ :
Tendances et projections récentes**

2. Les informations présentées ici portent sur des facteurs et des risques climatiques dont la variabilité et l'évolution peuvent avoir d'importantes incidences sur les transports dans la région de la CEE ; parmi eux figurent la température, les précipitations (pluie), la neige, l'étendue des glaces de mer, le niveau de la mer ainsi que les phénomènes extrêmes (document de référence à venir). Des informations sur ces facteurs climatiques figuraient jusqu'en 2013 dans un rapport de la CEE (CEE, 2013). Le présent rapport met l'accent sur les tendances et projections récentes concernant ces facteurs climatiques.

* Le présent document reproduit tel quel le texte qui a été transmis au secrétariat.

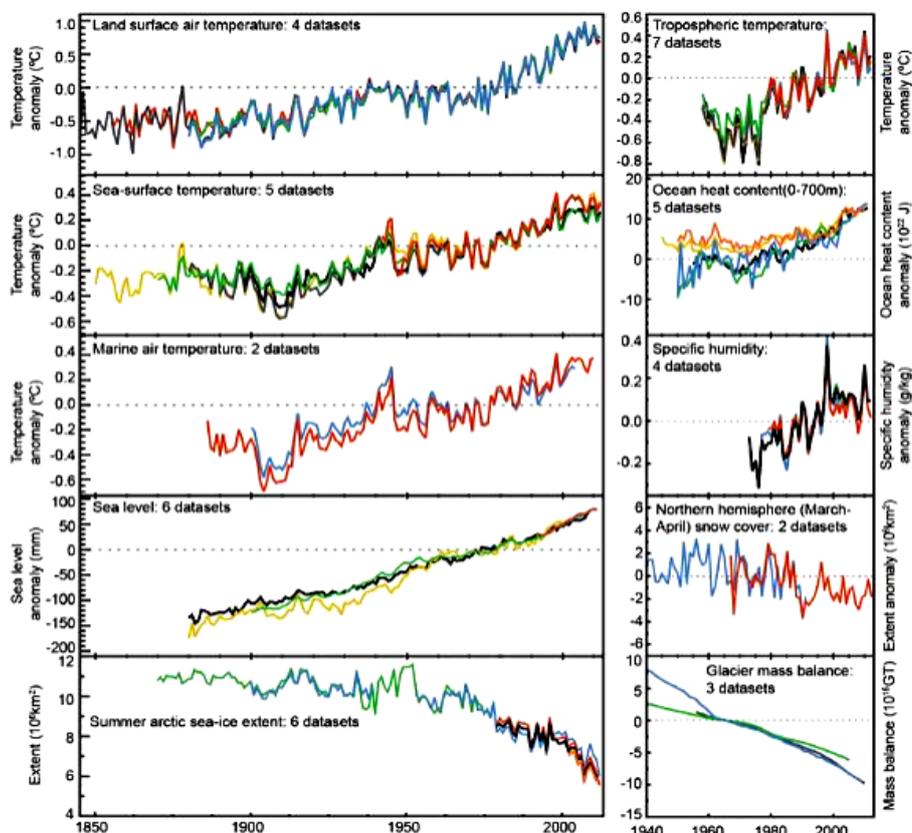
¹ Il est à noter que la variabilité du climat et les changements climatiques s'entendent de la variabilité et des changements continus des conditions climatiques par rapport à une période de référence, par exemple l'ère préindustrielle ou les périodes au cours desquelles les infrastructures utilisées aujourd'hui ont été construites (1961-1990, 1986-2005 ou 1981-2010, par exemple).



3. Les preuves d'un réchauffement de la planète depuis les années 1850 abondent dans beaucoup d'environnements (depuis la haute atmosphère jusqu'aux grands fonds marins). Cela étant, le débat sur la variabilité du climat et les changements climatiques est le plus souvent centré sur la hausse de la température à la surface des terres émergées, ce qui ne constitue que l'un des indicateurs des changements climatiques, les autres étant par exemple la température de l'atmosphère et des océans, le niveau de la mer, les précipitations et de l'étendue des glaciers, du manteau neigeux et des glaces de mer (fig. 1). Dans l'ensemble, la dynamique des facteurs climatiques, désormais mieux consignée et mieux comprise, laisse entrevoir une modification importante du climat et, dans certains cas, une accélération des changements climatiques. Il semble que les différents phénomènes climatiques affectant les infrastructures de transport et leur exploitation (CEE, 2013) s'amplifieront.

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)



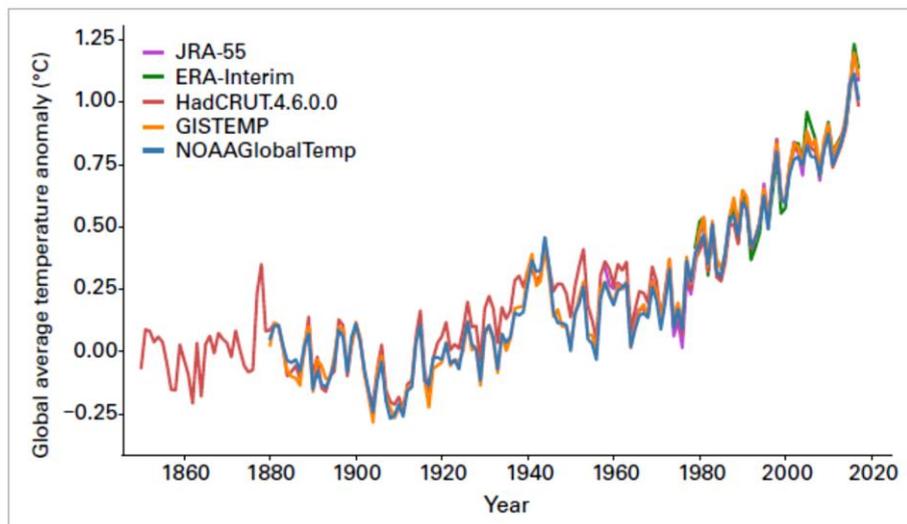
A. Température

1. Tendances

4. Il semble que la température augmente dans beaucoup des composantes du système terrestre (fig. 1). La température moyenne à proximité de la surface du globe est l'indicateur le plus fréquemment cité en matière de variabilité du climat et de changements climatiques, car il est directement lié, d'une part, aux causes des changements climatiques, soit l'augmentation des émissions cumulées de gaz à effet de serre (GES) (GIEC, 2013) et l'équilibre énergétique planétaire (Fourier 1827) et, d'autre part, à bon nombre d'effets et de risques climatiques (Arnell *et al.*, 2014). Même si chaque année (ou chaque décennie) n'a pas toujours été plus chaude que les précédentes, on observe indéniablement une tendance au réchauffement ces dernières décennies (fig. 2).

Figure 2

Anomalies de la température moyenne de la planète, par rapport à la période de référence 1850-1900, pour les cinq ensembles de données mondiales (Source : Centre Hadley du Service météorologique du Royaume-Uni). 2017 se classe au deuxième rang des années les plus chaudes dans les bases de données de réanalyse ERA-Interim et JRA-55 prises individuellement (OMM, 2018)



5. Le réchauffement du système climatique est sans équivoque. Toutes les observations dénotent des hausses des températures moyennes en surface, très probablement dues à l'augmentation de la concentration de GES dans l'atmosphère (GIEC, 2007 ; 2013). La température moyenne des cinq années de la période 2013-2017 (fig. 3), qui donne une perspective à plus long terme de l'évolution des températures, a été supérieure de 0,4 % à la moyenne de la période allant de 1981 à 2010 et de 1,0 % aux valeurs préindustrielles ; il s'agit de la moyenne la plus élevée jamais enregistrée. Les températures annuelles moyennes dépendent également de différentes modulations climatiques, notamment du phénomène d'oscillation australe El Niño (ENSO). Les années caractérisées par le phénomène El Niño sont plus chaudes que les années neutres ou les années La Niña.

6. Les années 2015 et 2016 ont été marquées par un puissant phénomène El Niño. Avec une température moyenne supérieure d'environ 1,1 °C à celle de l'ère préindustrielle, l'année 2016 a été la plus chaude jamais enregistrée (NOAA, 2017a). Des températures record ont été relevées un peu partout dans l'hémisphère Nord (NSIDC, 2017) et la température mondiale au début de l'année 2016 dépassait celle du début de la révolution industrielle d'environ 1,5 °C (Simmons *et al.*, 2017)². En février, une grande partie de l'Eurasie ainsi que l'Alaska ont connu un écart de plus de 5 °C par rapport à la moyenne des températures de février de la période 1981-2010. La température de la mer en surface a également été la plus chaude jamais enregistrée (NOAA, 2016). En raison de ses températures records, l'année 2015, dont seule la fin a été marquée par le phénomène El Niño, est la deuxième année la plus chaude jamais répertoriée. À titre de comparaison, les années 2014 et 2017, épargnées par le phénomène El Niño, ont respectivement enregistré des températures à proximité de la surface du globe supérieures de 0,88 °C ± 0,2 °C à la moyenne de 1961-1990 (OMM, 2014) et de 1,31 °C par rapport à la moyenne du XX^e siècle³. 2017 a été l'année sans épisode El Niño la plus chaude jamais relevée (et la troisième année la plus chaude dans l'ensemble), tandis que 2018, une année La Niña normalement plus froide, et 2014, une année neutre, ont respectivement été les quatrième et cinquième années les plus chaudes jamais enregistrées (NASA, 2016 ; NOAA, 2017b ;

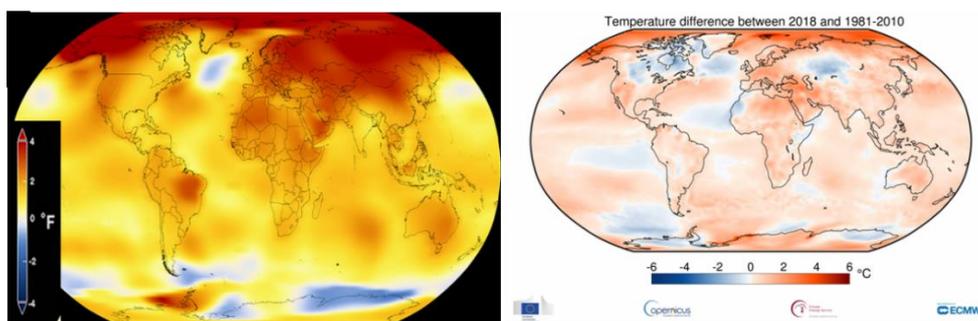
² Une évolution alarmante au regard de l'Accord de Paris de 2015 dont le but est de « contenir » l'élévation de la température moyenne de la planète nettement en dessous de 2 °C par rapport aux niveaux préindustriels (CCNUCC, 2015 ; GIEC, 2018).

³ Voir également www.ncdc.noaa.gov/sotc/global/201713.

OMM, 2018). 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 et stationnaire (Rahmstorf *et al.*, 2017). Depuis peu, une nette tendance au réchauffement se dégage de l'ensemble de la région de la CEE (fig. 3).

Figure 3

Température moyenne de la planète entre 2013 et 2017, comparée à la moyenne des années 1951 à 1980 (Institut Goddard d'études spatiales, NASA, climate.nasa.gov/news/2671/long-term-warming-trend-continued-in-2017-nasa-noaa/) (à gauche) ; et anomalies des températures terrestres et océaniques en 2018 en comparaison avec la moyenne de la période 1981-2010 (à droite)



7. Au cours de la période 2003-2013, on a observé une décélération de la montée des températures moyennes en surface à l'échelle du globe (fig. 2) en comparaison avec les projections des modèles climatiques (Dieng *et al.*, 2017a). Ce ralentissement (qualifié de « hiatus climatique ») a été attribué à la marge d'erreur et aux biais des processus propres aux ensembles de données 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 la redistribution de la chaleur dans les océans, de l'activité solaire ou de la variabilité des cycles océaniques (GIEC, 2013 ; MetOffice, 2014 ; Cowtan et Way, 2014 ; Karl *et al.*, 2015 ; Fyfe *et al.*, 2016 ; Yan *et al.*, 2016 ; Cheng *et al.*, 2019).

8. Le climat est régi par des flux entrant et sortant de chaleur et par un processus dynamique de stockage de celle-ci (GIEC, 2013). La chaleur s'accumule essentiellement dans les océans, qui absorbent la très grande majorité de la chaleur ajoutée au système climatique (Cheng *et al.*, 2019a). Ces dernières décennies, le réchauffement des océans a été largement mis en évidence, le taux étant estimé à 0,50-0,65 Wm⁻² sur la période 2003-2013 (Dieng *et al.*, 2017a). La température de la couche supérieure des océans n'a jamais été aussi élevée que celle de ces cinq dernières années (2014-2018) (Cheng *et al.*, 2019b).

2. Projections

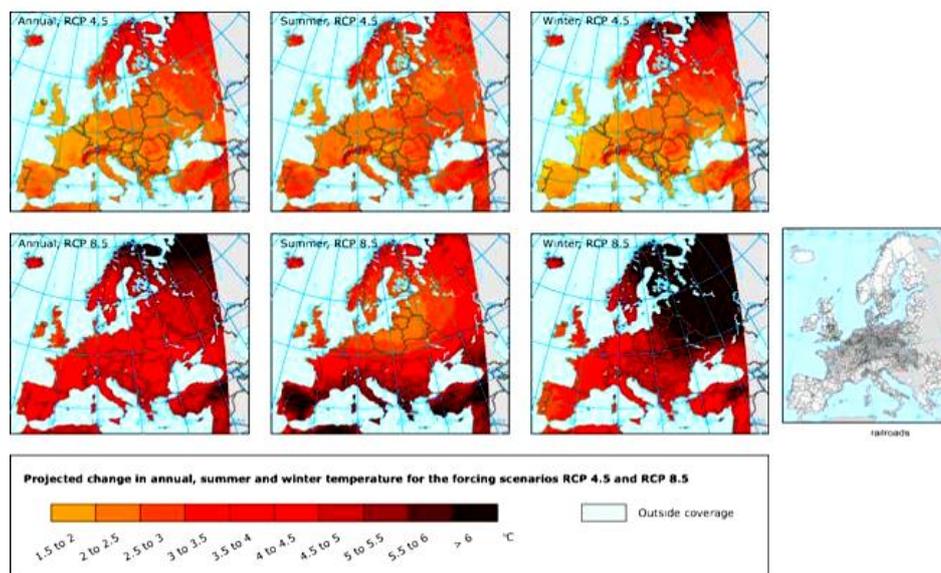
9. Selon les prévisions, la température atmosphérique devrait augmenter dans une fourchette de 1,0 °C à 3,7 °C (estimations moyennes) d'ici à la fin du XXI^e siècle, en fonction des différents scénarios d'évolution de la concentration de GES⁴. Les océans se réchaufferont également (GIEC, 2013). D'après les projections, le réchauffement le plus marqué concernera l'océan superficiel des régions tropicales et subtropicales, tandis que c'est l'océan Austral qui se réchaufferait le plus à plus grande profondeur. Les estimations du réchauffement des océans d'ici à 2100 sont de l'ordre de 0,6 °C (RCP2.6) à 2,0 °C (RCP8.5) sur les 100 premiers mètres, et de 0,3 °C (RCP2.6) à 0,6 °C (RCP8.5) à une profondeur d'environ 1 000 m. Pour le RCP4.5, la moitié de l'énergie absorbée par l'océan

⁴ Depuis le cinquième Rapport d'évaluation du GIEC (RE5) (2013), le dernier en date, les prévisions s'appuient sur des scénarios de profils représentatifs d'évolution de concentration (RCP) et non sur les scénarios SRES que le GIEC utilisait auparavant. Les concentrations d'équivalent dioxyde de carbone ont été fixées comme suit : pour le RCP8.5, 1 370 équivalents CO₂ en 2100 ; pour le RCP6.0, 850 équivalents CO₂ en 2100 ; pour le RCP4.5, 650 équivalents CO₂ en 2100 ; et pour le RCP2.6, un maximum de 490 équivalents CO₂ avant 2100 (Moss *et al.*, 2010).

le sera dans les 700 premiers mètres de profondeur et 85 % dans les 2 000 m sous la surface (voir Cheng *et al.*, 2019a ; 2019b).

Figure 4

Projections des variations de la température (en degrés) de l'air en surface annuelle (à gauche), estivale (au centre) et hivernale (à droite) en 2071-2100 par rapport à 1971-2000 selon les scénarios de forçage RCP4.5 (en haut) et RCP8.5 (en bas). Simulations des modèles RCM (Initiative EURO-CORDEX) (AEE, 2014a)



10. Les changements climatiques ne sont pas uniformes actuellement et ne le seront pas davantage à l'avenir. Les températures augmentent plus vite près des pôles qu'à l'Équateur (voir fig. 3). Selon les récentes prévisions du GIEC (GIEC, 2018) (indice de confiance élevé), le climat des différentes régions du globe devrait fortement changer entre la situation actuelle et celle d'un réchauffement planétaire de 1,5 °C à 2 °C par rapport aux niveaux préindustriels ; il devrait notamment y avoir une augmentation des températures extrêmement chaudes dans la plupart des régions habitées. D'après les modèles mondiaux et quel que soit le scénario, la région de la CEE, en particulier sa partie nord, connaîtra de fortes hausses des températures (GIEC, 2013). Les modèles régionaux prévoient également un réchauffement important de l'Europe (fig. 4), en particulier d'après le scénario RCP8.5. L'Europe du Nord-Est et le bassin de la Méditerranée seront les plus touchés, ce qui entraînera nombre de conséquences pour les réseaux de transports de la CEE.

11. Vogel *et al.* (2017) ont découvert (en utilisant les modèles CTL et SM20c) que la température maximale quotidienne (TXX) augmentera également jusqu'à la fin du siècle. Les changements prévus sont plus prononcés dans le modèle CTL que dans les simulations SM20c, les hausses régionales pouvant atteindre respectivement 10 °C et 6 °C.

B. Précipitations

1. Tendances

12. La pluviométrie affiche une tendance ascendante, surtout à des latitudes moyennes à hautes (avec un faible indice de confiance avant 1951 et un indice de confiance moyen par la suite) (EPA, 2015). Lorsque l'analyse ne porte que sur les latitudes moyennes de l'hémisphère Nord, l'indice de confiance des tendances des précipitations pour les années postérieures à 1951 est élevé. 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 (Meyer-Christoffer *et al.*, 2015). 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 d'environ 1 °C par rapport aux niveaux préindustriels pourrait s'accompagner d'une augmentation de 2 % à 3 % des précipitations mondiales.

13. Les précipitations sur la terre ferme ont été fortement influencées ces dernières années par le phénomène d'oscillation australe El Niño (ENSO). Les six dernières années ont fait suite à une année caractérisée par un fort épisode de La Niña (de 2011 à début 2012) donnant lieu à des conditions météorologiques très humides ; la NOAA a classé 2011 au deuxième rang des années les plus humides depuis qu'existent les relevés. Toutefois, 2013 et 2014 étaient proches de la moyenne à long terme. L'ouest des États-Unis, l'est de l'Australie et du Brésil 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. En 2014, des conditions de grande sécheresse ont également sévi dans la majeure partie du centre des États-Unis et dans le centre et l'ouest de la Fédération de Russie (OMM, 2014 ; Met Office 2014).

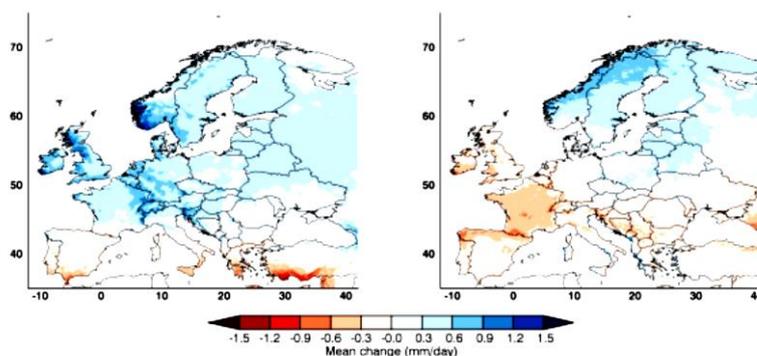
14. En 2016, les précipitations mondiales ont été fortement influencées par le passage des conditions El Niño au début de l'année à des conditions La Niña neutres ou faibles au second semestre. Il en est résulté d'importants contrastes saisonniers dans de nombreuses régions. Les précipitations ont dépassé le 90^e centile dans une vaste zone de la CEE s'étendant du Kazakhstan à l'ouest de la Fédération de Russie 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. Les précipitations annuelles ont été proches de la moyenne sur la majeure partie de l'Europe centrale et occidentale, avec toutefois un premier semestre très arrosé et un second semestre sec. La Belgique constitue un exemple caractéristique de cette grande variabilité : une pluviosité record (62 % de plus que la normale) a été enregistrée dans certaines de ses régions entre janvier et juin tandis que la période juillet-décembre figure au troisième rang des périodes les plus sèches (36 % de moins que la normale) (OMM, 2017). Autre région atypique, la Californie a enregistré un cumul saisonnier proche de la normale (après quatre années très sèches d'affilée), avec toutefois des précipitations qui se sont accrues vers la fin de 2016. En 2017, moins de régions ont été confrontées à de grandes anomalies pluviométriques que dans les années précédentes, car l'influence du fort épisode El Niño de 2015-2016 s'est dissipée (OMM, 2018).

2. Projections

15. Le régime des précipitations devrait changer de manière encore plus complexe que les températures. Selon les projections, certaines régions devraient être exposées à de fortes précipitations (indice de confiance moyen), tandis que d'autres devraient être confrontées à des précipitations déficitaires et à des sécheresses (indice de confiance moyen) (GIEC, 2013 ; 2018). D'après les prévisions, le régime des précipitations dans la partie européenne de la région de la CEE sera modifié : le nord sera plus humide dans l'ensemble tandis que le sud deviendra plus sec (fig. 5).

Figure 5

Projections des variations des niveaux de précipitations quotidiennes hivernales (à gauche) et estivales (à droite) à la fin du siècle (en 2071-2100) par rapport au climat actuel (1981-2010) selon le scénario RCP8.5



16. En parallèle, même si les étés pourraient devenir plus secs (dans l'ensemble), il pourrait pleuvoir de façon plus intense. Au Royaume-Uni, par exemple, les simulations indiquent que de violentes averses associées à des crues soudaines (plus de 30 mm en l'espace d'une heure) pourraient devenir cinq fois plus fréquentes d'ici à 2100 (MetOffice, 2014). Par ailleurs, la majeure partie de la région sud-ouest de l'Amérique du Nord subira des épisodes de sécheresse à grande échelle d'ici au milieu ou à la fin du XXI^e siècle ; en revanche, la durée et l'intensité des phases de sécheresse devraient diminuer en Europe centrale, dans le bassin méditerranéen et dans d'autres parties de l'Amérique du Nord (Milly *et al.*, 2008 ; GIEC, 2013 ; Dai, 2013 ; GIEC, 2018).

C. Neige, glaces de mer et pergélisol

1. Tendances

17. 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. Les éléments de la cryosphère qui ont fait l'objet d'une évaluation présentée dans ce rapport sont le manteau neigeux, les glaces de mer, les glaciers, les calottes glaciaires et le pergélisol. L'évaluation de leur état actuel et des projections concernant leur évolution future revêt une importance cruciale pour les transports dans les régions arctiques de la CEE (comme la Fédération de Russie, le Canada et les États-Unis).

18. L'étendue du manteau neigeux diminue au printemps dans l'hémisphère Nord depuis les années 1950 (GIEC, 2013 ; NSIDC, 2017). Le manteau neigeux dans l'hémisphère Nord (soit environ 98 % 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 (comme les Alpes et la Scandinavie) 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 (comme les Carpates, les Pyrénées et le Caucase) (AEE, 2012).

19. En dépit des températures généralement élevées de la période qui vient de s'écouler, l'hémisphère Nord a encore connu des épisodes de neige et de froid anormaux. Au début de l'année 2012, l'Europe centrale et occidentale a été touchée par une période prolongée de grand froid qui s'est révélée être la pire vague de froid depuis 1987. Les hivers 2013-2014 et 2014-2015 ont également été nettement plus froids que la normale dans le centre et l'est des États-Unis et dans la partie sud du Canada, où les températures sont longtemps restées sous la normale. Pendant tout le mois de février 2015, les températures sont restées 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). En moyenne annuelle, l'étendue du manteau

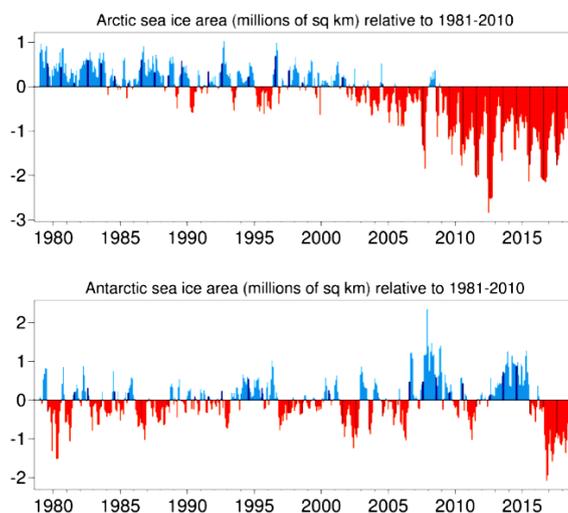
neigeux dans l'hémisphère Nord était de 24,6 millions de km² en 2016, soit un déficit de 0,5 million de km² par rapport à la moyenne de la période 1967-2015 en dépit des fortes tempêtes de neige qui ont frappé l'Amérique du Nord en janvier (voir NOAA, 2017a). En Eurasie, le manteau neigeux hivernal a été inférieur de 270 000 km² à la moyenne (OMM, 2017). En revanche, pendant une grande partie de 2017, la couverture neigeuse dans l'hémisphère Nord a été comparable ou supérieure à la moyenne de 1981-2010, notamment dans le nord-ouest de la Fédération de Russie et en Scandinavie (OMM, 2018).

20. La banquise arctique est en recul (fig. 1 et 6). Dans l'Arctique, la glace de mer se développe généralement durant la saison froide pour atteindre un maximum en mars-avril, puis se contracte pendant la saison chaude, passant à un minimum en septembre. Inversement, la banquise antarctique atteint son minimum en février-mars et s'étend pendant la saison froide de l'hémisphère Sud jusqu'à son 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 records ont été enregistrés au cours de la dernière décennie (NOAA, 2017a).

21. L'étendue de la banquise arctique a accusé des minima records une grande partie de l'année 2016 (OMM, 2017). Le maximum saisonnier de 14,52 millions de km² (atteint le 24 mars) a été le plus faible jamais observé par satellite. La mer du Labrador, la baie de Baffin et la baie d'Hudson ont fait figure d'exception. Les étendues maximale et minimale de la glace de mer ont été respectivement inférieures de 1,12 et de 2,08 millions de km² à la moyenne de 1981-2010. 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 un maximum saisonnier de 18,44 millions de km². Toutefois, à la suite du dégel printanier extrêmement rapide, l'étendue de la banquise ne représentait plus que 14,54 millions de km² en novembre (la plus faible superficie jamais constatée). Les causes de l'effondrement de la banquise à la fin 2016, qui a été qualifié de « cygne noir » (NSIDC, 2017), restent à déterminer. En 2017, l'étendue des mers de glace arctique et antarctique était bien inférieure à la moyenne de la période 1981-2010. L'étendue maximale de la banquise arctique (14,42 millions de km² en date du 7 mars) était le maximum hivernal le plus bas jamais enregistré ; cependant, grâce à une fonte printanière et estivale plus lente que les années précédentes, le minimum estival (4,64 millions de km² en date du 13 septembre) dépassait d'environ 1,25 million de km² celui de 2012 qui est l'étendue minimale la plus faible jamais enregistrée (OMM, 2018). Un réchauffement jusqu'à une profondeur de 20 m a été constaté dans les zones de pergélisol de l'Arctique (fig. 7). La température du pergélisol a gagné jusqu'à 2 °C dans la plupart des régions depuis 1980, provoquant sa fonte et d'importants dommages aux infrastructures. De manière générale, depuis 1930, l'épaisseur du pergélisol dans l'hémisphère Nord a perdu 0,32 m (GIEC, 2013).

Figure 6

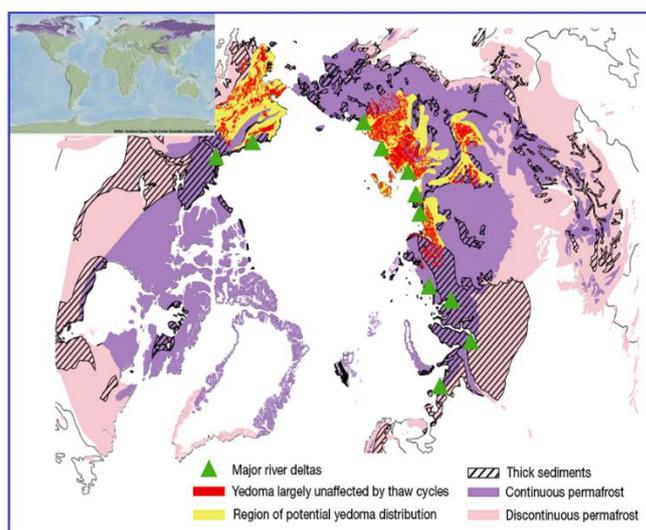
Étendue des banquises arctique et antarctique (P. Taalas, OMM, 2019)



22. Les bilans de masse de la glace des terres émergées de l'Antarctique et du Groenland sont cruciaux, car l'élévation du niveau moyen de la mer dépend en partie d'eux. Aucune tendance particulière ne se dégage du bilan de masse de surface du Groenland des années 1960, 1970 et 1980, mais il a commencé à présenter des valeurs moins positives au début des années 1990 (soit une perte de masse de l'ordre de 3 % par an en moyenne). Il en a résulté une contribution statistiquement significative à l'élévation du niveau moyen de la mer à l'échelle mondiale (Hansen *et al.*, 2016). La tendance à long terme du bilan de masse de la glace des terres émergées de l'Antarctique semble neutre. Pourtant, des signes inquiétants se sont récemment fait jour. Il semble que la masse totale de la banquise antarctique ait accusé une perte de 40 ± 9 Gt/an-1 sur la période 1979-1990 et de 50 ± 14 Gt/an-1 en 1989-2000, qui s'est accélérée avec une diminution de 166 ± 18 Gt/an-1 entre 1999 et 2009 et de 252 ± 26 Gt/an-1 entre 2009 et 2017. La contribution de la fonte des glaces arctiques à l'élévation du niveau de la mer est en moyenne de $3,6 \pm 0,5$ mm par décennie et représente une augmentation cumulée de $14,0 \pm 2,0$ mm depuis 1979 (Rignot *et al.*, 2019).

Figure 7

Carte du pergélisol arctique circumpolaire, représentant le yedoma (en rouge et jaune), le principal réservoir de carbone du pergélisol (Schuur *et al.*, 2015 doi:10.1038/nature14338)



23. Velicogna *et al.* (2014) ont mesuré la masse de la calotte glacière du Groenland et ont constaté une déperdition de 280 ± 58 Gt/an-1, s'accroissant de $25,4 \pm 1,2$ Gt/an-1. Ils ont également observé que la masse des glaciers et des calottes glaciaires canadiens voisins perdait 74 ± 7 Gt/an-1, avec une accélération de 10 ± 2 Gt/an-1. D'une manière générale, les glaciers ont continué de fondre. La grande majorité des glaciers de référence pour lesquels on dispose de données relatives à l'année 2015-2016 ont enregistré une perte de masse qui, quoique moins considérable qu'en 2014-2015, était supérieure à la moyenne de 2003-2015 (OMM, 2017). Ces dernières années, la masse des glaciers dans l'ouest de l'Amérique du Nord a diminué de 117 ± 42 Gt ; la perte de masse a quadruplé entre 2000-2009 ($2,9 \pm 3,1$ Gt/an-1) et 2009-2018 ($12,3 \pm 4,6$ Gt/an-1). Il se peut que cette perte soit due à la dynamique des vents zonaux dans les couches supérieures de l'atmosphère (Menounos *et al.*, 2018).

2. Projections

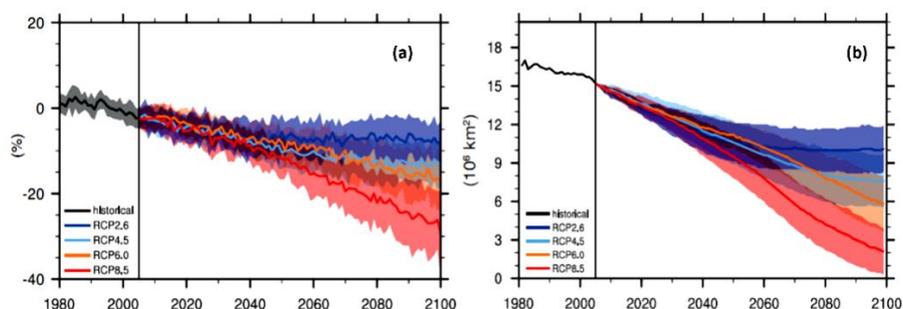
24. Selon les prévisions, les chutes de neige devraient être plus abondantes en Arctique. En maints endroits, l'épaisseur du manteau neigeux hivernal devrait donc s'accroître, cette évolution se faisant surtout sentir en Sibérie (de 15 % à 30 % en plus d'ici à 2050). Cependant, la neige se maintiendrait au sol entre 10 % à 20 % moins longtemps chaque année sur la majeure partie des régions arctiques en raison d'une fonte printanière plus précoce (AMAP, 2012) ; par conséquent, la couverture neigeuse au printemps en 2100

devrait avoir diminué de 25 % selon le scénario RCP8.5 (fig. 8 a). D'après les prévisions, la masse des glaciers devrait également diminuer de 10 % à 30 % d'ici à 2100 (AMAP, 2012). Selon une étude récente, les glaciers de l'Hindou Kouch et de l'Himalaya verraient leur masse diminuer de manière plus importante encore (Wester *et al.*, 2019).

25. Les modèles prévoient aussi un dégel accéléré du pergélisol dû à la hausse des températures à l'échelle mondiale et à l'évolution du manteau neigeux. La surface du pergélisol en Europe se réchauffe actuellement de 0,04 à 0,07 °C/an-1 (AEE, 2015a). Même s'il est difficile d'évaluer les changements touchant le pergélisol (notamment en ce qui concerne les processus pédologiques, les scénarios climatiques et la modélisation des aspects physiques), son étendue devrait diminuer, d'ici à la fin du XXI^e siècle, de 37 % à 81 % selon le scénario (indice de confiance moyen) (fig. 8 b). De tels changements pourraient poser d'importants problèmes pour la mise en place ou l'entretien d'infrastructures dans les régions arctiques (CEE, 2013), ce qui risque d'entraver le développement de réseaux de transport permettant de tirer parti des nouveaux itinéraires rendus possibles par la fonte prévue de la banquise arctique (fig. 9).

Figure 8

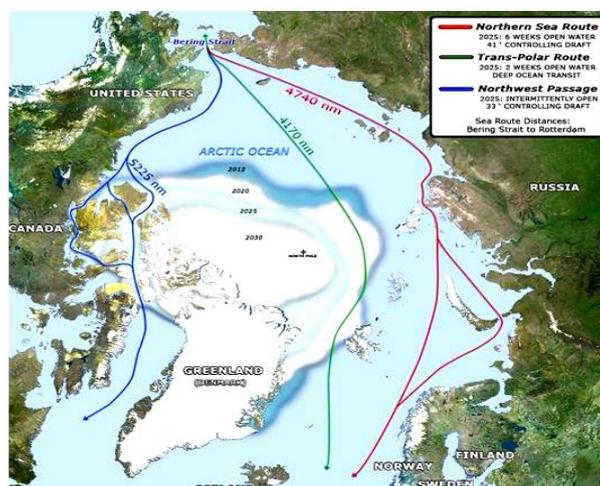
Projections a) de l'évolution de l'étendue du manteau neigeux et b) des modifications de la couche du pergélisol proche de la surface selon quatre profils représentatifs d'évolution de concentration (RCP) (tirés de l'ensemble de modèles CMIP5) (GIEC, 2013)



26. Au vu de l'ensemble de modèles CMIP5, la glace de mer devrait nettement reculer dans l'Arctique, encore qu'il faille s'attendre à une variabilité considérable d'une année à l'autre. Pour la période 2081-2100, en fonction du scénario RCP, les projections relatives à l'étendue de la glace de mer laissent entrevoir une réduction pouvant atteindre entre 8 % et 34 % en février et entre 43 % et 94 % en septembre en comparaison avec la moyenne de la période 1986-2005 (GIEC, 2013).

Figure 9

Nouvelles voies maritimes dans l'Arctique (U.S. Climate Resilience Toolkit, 2015)



27. Il est possible qu'apparaissent de nouvelles perspectives socioéconomiques pour les communautés vivant dans l'Arctique dans la mesure où le recul de la glace de mer facilitera le transport maritime international via l'Arctique et l'accès à de nombreuses ressources naturelles (comme les gisements d'hydrocarbures dans les mers de Beaufort et des Tchoukches). Trois axes maritimes principaux sont envisagés pour traverser l'océan Arctique en 2025 (fig. 9). La Fédération de Russie a déjà aménagé plusieurs ports maritimes pour le transport des marchandises. En 2017, le volume des chargements transportés via ces ports maritimes a augmenté de 1,5 % par rapport à 2016, ce qui représente 73 millions de tonnes ; d'ici à 2030, il devrait atteindre 140 millions de tonnes (Egorshv, 2018). Toutefois, l'exploitation des nouvelles voies maritimes dans l'Arctique n'est dénuée ni de risques écologiques ni de problèmes de développement. Les infrastructures existantes et à venir subiront les effets du dégel du pergélisol et de l'action accrue des vagues sur les côtes sous l'effet de la variabilité et des changements climatiques, ce qui exigera des mesures d'aménagement spécialisées et innovantes (Egorshv, 2018).

28. Le réchauffement de la planète aura des conséquences sur la calotte glaciaire du Groenland qui, selon de récentes analyses, présente une accélération de la diminution de son bilan de masse de surface (Velicogna *et al.*, 2014 ; Hansen *et al.*, 2016). Inversement, le bilan de masse de surface de la calotte glaciaire antarctique devrait augmenter dans la plupart des scénarios du GIEC en raison de l'augmentation des chutes de neige (voir cependant les récentes observations de Rignot *et al.* (2019)). Il est à noter qu'une possible perte de masse dans l'Antarctique risquerait de contribuer pour plus d'un mètre à l'élévation du niveau de la mer d'ici à 2100 (De Conto et Pollard, 2016).

D. Niveau de la mer et vagues

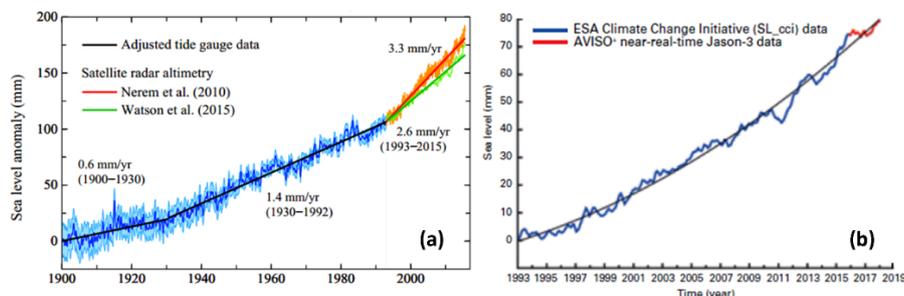
1. Tendances

29. 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 très sensible de leur contenu thermique (Dieng *et al.*, 2017 ; Cheng *et al.*, 2019a), d'où des augmentations de leur niveau dû à l'effet stérique, considéré comme l'un des principaux facteurs de la montée du niveau de la mer (Hanna *et al.*, 2013). Ces dernières décennies, le rythme d'élévation du niveau de la mer a fortement augmenté par rapport à la situation relativement stable qui prévalait au cours des deux derniers millénaires (Church *et al.*, 2013).

Figure 10

a) Évolution estimative du niveau de la mer (en mm) depuis 1900. Jusqu'en 1992, les données correspondaient aux relevés des marégraphes, 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)

b) Niveau de la mer à l'échelle mondiale (abstraction faite du cycle saisonnier) sur la période allant de janvier 1993 à janvier 2018, mesuré par altimétrie radar. Données AVISO (Source : Collecte Localisation Satellite (CLS) – Laboratoire d'études en géophysique et océanographie spatiales (LEGOS) (OMM, 2018)



30. 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). La tendance ascendante à long terme du niveau de la mer a fluctué au cours des décennies.

L'augmentation a été moins sensible au début du XX^e siècle et pendant une bonne partie des années 1960 et 1970, alors que le niveau de la mer a augmenté plus rapidement durant les années 1930 et jusqu'aux années 1950 (fig. 10). Depuis 1993, les observations satellitaires et par marégraphe laissent entrevoir une hausse globale du niveau de la mer de $3,3 \pm 0,25$ cm par décennie (Church *et al.*, 2013), dont l'accélération s'explique plutôt par l'évolution des bilans de masse des glaciers que par l'effet stérique (Dieng *et al.*, 2017b ; Rignot *et al.*, 2019).

31. 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, comme l'ouest du Pacifique tropical. La montée 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 (OMM, 2016).

2. Projections

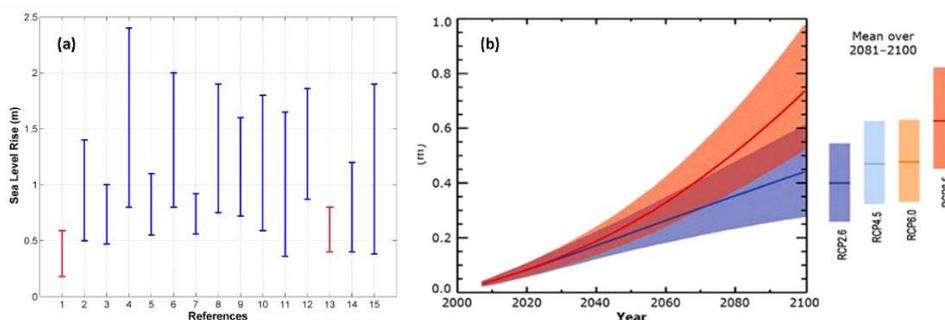
32. Pour ce qui est de l'élévation du niveau de la mer, les prévisions fondées sur des processus pâtissent des incertitudes liées aux mesures prises pour lutter contre le réchauffement de la planète et à la variation des bilans de masse des calottes glaciaires du Groenland et de l'Antarctique (Hansen *et al.*, 2016 ; Rignot *et al.*, 2019), de la hauteur stérique (Cheng *et al.*, 2019a ; 2019b), de la contribution des glaciers de montagne (Menounos *et al.*, 2018), du pompage d'eaux souterraines aux fins d'irrigation et de stockage dans des réservoirs (Wada *et al.*, 2012).

Figure 11

a) Projections de l'élévation du niveau de la mer à l'horizon 2100. Légende : 1, GIEC (2007a), 0,18-0,59 m ; 2, Rahmstorf *et al.* (2007) ; 3, Horton *et al.* (2008) ; 4, Rohling *et al.* (2008) ; 5, Vellinga *et al.* (2008) ; 6, Pfeffer *et al.* (2008) ; 7, Kopp *et al.* (2009) ; 8, Vermeer et Rahmstorf (2009) ; 9, Grinsted *et al.* (2010) ; 10, Jevrejeva *et al.* (2010) ; 11, Jevrejeva *et al.* (2012) ; 12, Mori *et al.* (2013) ; 13, GIEC (2013) ; 14, Horton *et al.* (2014) ; et 15, Dutton *et al.* (2015).

La variabilité reflète les différents axes de recherche et hypothèses

b) Élévation du niveau moyen de la mer à l'échelle du globe dans le courant du XXI^e siècle par rapport à 1986-2005 (GIEC, 2013)



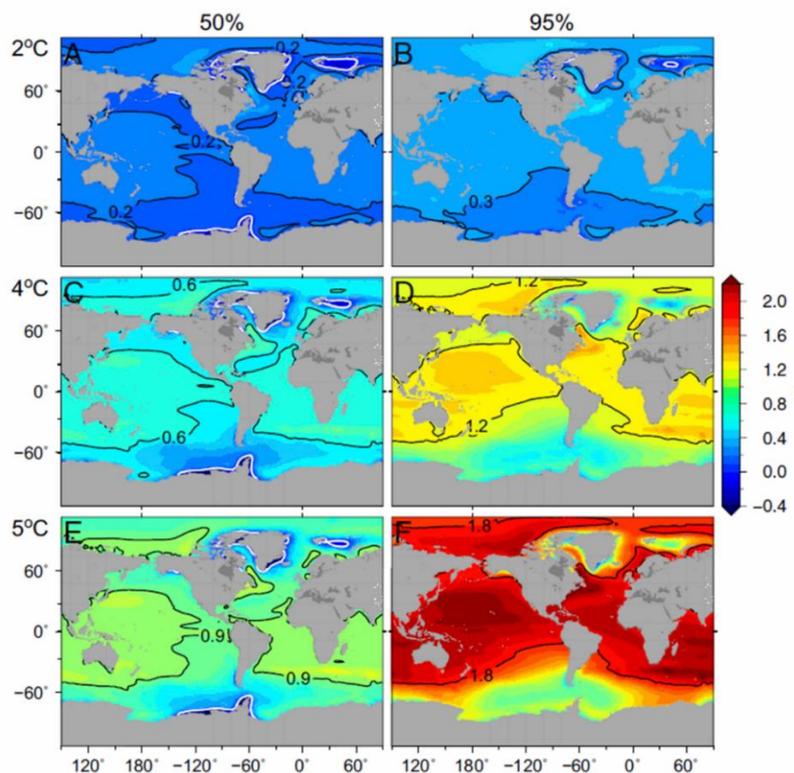
33. Selon les prévisions du GIEC (2013), en comparaison avec la période 1986-2005 (GIEC, 2013), l'élévation du niveau de la mer pour 2081-2100 devrait être de l'ordre de 0,26-0,54 m (selon le scénario RCP2.6) et de 0,45-0,82 m (selon le scénario RCP8.5). Il convient de noter que le GIEC fournit systématiquement des estimations relativement prudentes (fig. 11). En raison de l'importante variabilité spatiale constatée (et projetée) de l'élévation du niveau de la mer, les tendances régionales devraient être prises en considération si l'on souhaite en évaluer les conséquences le long de telle ou telle côte. Outre les processus à l'œuvre à l'échelle planétaire, des facteurs régionaux peuvent contribuer aux variations du niveau des eaux côtières, notamment des modifications de la circulation océanique, un rythme différent de fonte des glaces à l'échelle régionale, l'ajustement glacio-isostatique et le tassement des sédiments côtiers (King *et al.*, 2015 ; Carson *et al.*, 2016 ; Jevrejeva *et al.*, 2016).

34. Le niveau de la mer continuera à monter au-delà de 2100 (Jevrejeva *et al.*, 2012), car le réchauffement des océans (Cheng *et al.*, 2019a) entraînera une expansion thermique (induite par l'effet stérique) pendant plusieurs siècles (au moins), tandis que la perte dynamique de glace dans l'Antarctique et au Groenland se poursuivra elle aussi jusque dans un avenir assez lointain. La hausse incontrôlée de la température moyenne pourrait provoquer une montée phénoménale du niveau de la mer. Il a largement été rappelé qu'un réchauffement général de 2 °C par rapport aux niveaux de l'époque préindustrielle⁵ pourrait constituer le seuil au-delà duquel les risques liés aux changements climatiques deviendraient beaucoup trop élevés (voir sur ce point GIEC (2018)). En l'absence de mesures d'atténuation, il est fort probable que ce seuil soit atteint aux alentours de 2050 selon le scénario RCP8.5.

35. D'après les projections concernant l'élévation du niveau de la mer en cas de réchauffement égal ou supérieur à 2 °C, plus de 90 % du littoral à l'échelle mondiale connaîtra des hausses de niveau supérieures à l'estimation générale de 0,2 m ; l'élévation du niveau marin sur la côte atlantique de l'Amérique du Nord pourrait même atteindre 0,4 m (fig. 12). À titre de comparaison, en cas d'augmentation de la température de 5 °C (soit presque la température la plus élevée projetée pour 2100, GIEC, 2013), l'élévation médiane du niveau de la mer atteindra 0,9 m et 80 % du littoral dépassera cette médiane, le 95^e centile correspondant à la limite supérieure de 1,8 m (Jevrejeva *et al.*, 2016). L'étude du paléoclimat, les mesures instrumentales et des travaux de modélisation ont montré que des facteurs mondiaux et régionaux pouvaient provoquer une hausse relativement rapide du niveau de la mer le long de certaines côtes (voir Cronin, 2012).

Figure 12

Projections régionales du niveau de la mer en cas de réchauffement conforme au scénario RCP8.5, soit une augmentation de 2 °C (A et B), de 4 °C (C et D) et de 5 °C (E et F) par rapport à 1986-2005. A, C et E illustrent les projections médianes (50 %) tandis que B, D et F représentent les projections fondées sur les limites supérieures (95 %). Les contours noirs symbolisent les côtes touchées par l'élévation du niveau de la mer (en m) tandis que les contours blancs illustrent les côtes où le niveau demeurerait le même (Jevrejeva *et al.*, 2016)

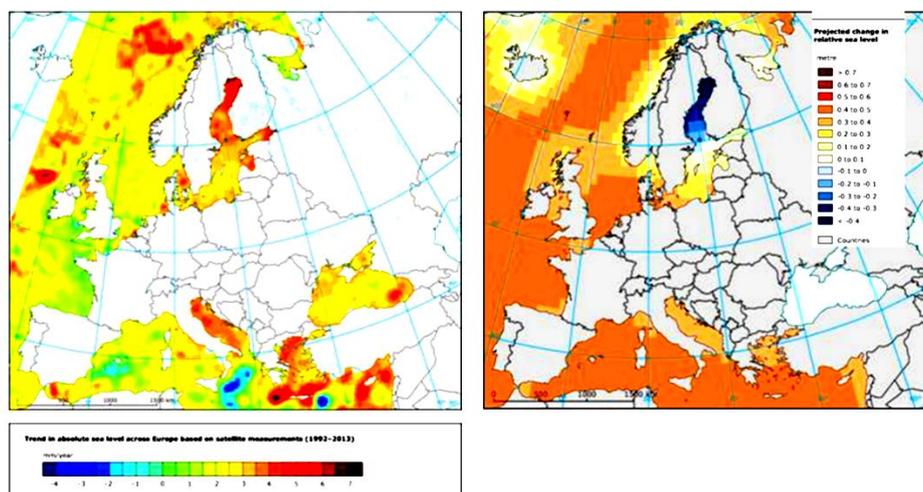


⁵ L'objectif de l'Accord de Paris de 2015 (unfccc.int/process/0a0659cbd-3b30-4c05-a4f9-268f16e5dd6b).

36. En Europe, tant les tendances actuelles que les projections suggèrent une forte variabilité régionale de l'élévation du niveau de la mer (fig. 13). Pour le littoral néerlandais, Katsman *et al.* (2011) ont estimé que l'élévation du niveau de la mer serait de l'ordre de 0,40-1,05 m dans la partie supérieure de la fourchette des prévisions d'émissions, qui est un scénario plausible, alors que, selon les projections, l'élévation du niveau de la mer devrait atteindre 0,8 m en 2100 dans le bassin méditerranéen (Hinkel *et al.*, 2014 ; Jevrejeva *et al.*, 2016). Outre la montée du niveau de la mer, d'autres risques tels que la hauteur moyenne des vagues, les vagues extrêmes et les ondes de tempête pèsent sur les infrastructures de transport côtières et leur exploitation. Camus *et al.* (2017) ont fourni plusieurs modèles de projections des vagues (dont un sur la hauteur significative des vagues⁶) dans le contexte des changements climatiques (fig. 14) pour aider à évaluer les conséquences de la variabilité du climat et des changements climatiques sur les infrastructures de transport côtières (Asariotis *et al.*, 2017).

Figure 13

Gauche : Évolution du niveau absolu de la mer en Europe, à partir de mesures effectuées par satellite (1992-2013) (AEE, 2014b). Droite : Projections du niveau relatif de la mer en 2081-2100 en comparaison avec la période 1986-2005 selon le scénario d'émissions moyennes RCP4.5 (à partir d'un ensemble CMIP5). Aucune projection n'est disponible pour la mer Noire (AEE, 2014c)



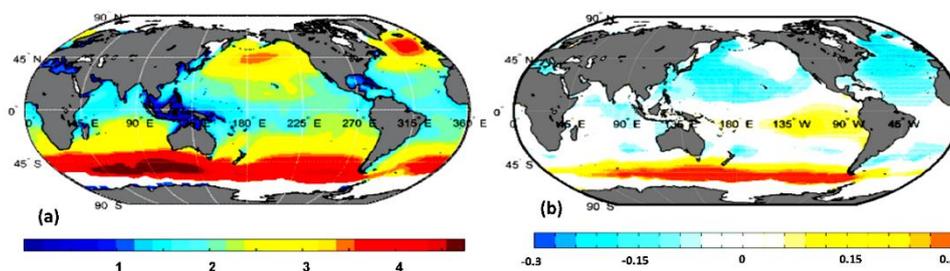
37. Selon les prévisions, la hauteur significative annuelle moyenne des vagues devrait augmenter dans l'océan Austral et la partie orientale du Pacifique et diminuer dans le nord de l'Atlantique, le nord-ouest du Pacifique et l'océan Indien ; l'amplitude des augmentations devrait être quatre fois plus élevée que celle des diminutions. Si ces projections, de même que celles qui concernent l'élévation du niveau de la mer, se réalisent, l'exploitation des ports maritimes ayant des brise-lames bas pourrait, du fait du risque accru de franchissement, être remise en question dans certaines régions (Camus *et al.*, 2017).

⁶ La hauteur significative annuelle des vagues est la valeur moyenne du tiers supérieur des hauteurs des vagues enregistrées sur un site chaque année.

Figure 14

a) Hauteur significative annuelle moyenne des vagues (en m) selon plusieurs modèles pour la période 1979-2005

b) Projection selon plusieurs modèles de l'évolution de la hauteur significative annuelle moyenne des vagues pour 2070-2100 en comparaison avec 1979-2005 dans le cas du scénario RCP8.5. Les parties mouchetées représentent les zones où l'amplitude de la moyenne d'ensemble est supérieure à l'écart type entre les différents modèles (Camus *et al.*, 2017)



E. Phénomènes climatiques extrêmes

38. Dans le débat public, les changements climatiques sont souvent assimilés à l'augmentation de la température moyenne du globe. Toutefois, pour les transports comme pour la société, l'économie et l'environnement, les caractéristiques et variations régionales des phénomènes climatiques extrêmes peuvent être les plus pertinentes (Vogel *et al.*, 2017). 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 moyennes ultérieures (rapport spécial du GIEC, 2012). Les événements extrêmes sont très variés, 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 violentes tempêtes, 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. Qu'ils se produisent seuls ou se cumulent, tous ces phénomènes peuvent avoir des conséquences non négligeables et coûteuses pour les infrastructures et le fonctionnement des transports.

39. Les phénomènes extrêmes, ainsi que les changements qui surviennent dans des régimes climatiques particuliers tels que les moussons (King *et al.*, 2015), peuvent avoir les répercussions climatiques les plus profondes à une échelle spatio-temporelle réduite, dans la mesure où ils peuvent produire des effets soudains et des catastrophes naturelles plus graves que des changements dans les conditions climatiques moyennes. Les sociétés sont rarement préparées à affronter efficacement les phénomènes météorologiques extrêmes, car elles ont pris l'habitude de s'appuyer sur des régimes climatiques prévisibles à long terme (MetOffice, 2014). La plupart des catastrophes naturelles sont dues à des phénomènes hydrométéorologiques extrêmes tels que les inondations et les tempêtes, qui sont respectivement à l'origine d'environ 44 % et 28 % de toutes les catastrophes naturelles enregistrées entre 1998 et 2017 (Taalas, 2019). Aux États-Unis d'Amérique, elles sont responsables de 90 % de l'ensemble des catastrophes officiellement déclarées comme telles par le Président, étant donné qu'une part importante de l'économie (environ 3 000 milliards de dollars É.-U.) est exposée aux conditions météorologiques et climatiques (NOAA, 2017c).

40. Ces dernières années, de nombreux phénomènes extrêmes ont touché la région de la CEE et porté atteinte aux infrastructures et au fonctionnement des transports, certains ayant causé des pertes et des dégâts très graves, notamment 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), les inondations en Europe centrale (mai et juin 2013) et la saison des ouragans en 2017 (sect. II.E.3). Le bilan humain n'a heureusement pas suivi la même tendance nettement ascendante que celle observée pour les préjudices économiques

(NOAA, 2017c). Toutefois, le typhon Haiyan (Yolanda) aux Philippines et les inondations éclair qui ont frappé le nord de l'Inde ont causé 13 600 décès en 2013 tandis que plus de 3 700 personnes ont perdu la vie pendant les vagues de chaleur qu'ont connues l'Inde et le Pakistan en mai et en juin 2015⁷. En termes de pertes économiques, la moyenne pour la période 1980-2016 était de 5,5 catastrophes par an pour un coût supérieur à un milliard de dollars (ajustés en fonction de l'indice des prix à la consommation), tandis qu'elle a atteint 10,6 catastrophes pour la période 2012-2016 (NOAA, 2017c).

41. De nombreux extrêmes climatiques se caractérisent par des changements qui concordent avec le réchauffement de la planète, 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 (rapport spécial du GIEC, 2012). On enregistre également une modification générale de la fréquence des extrêmes (précipitations et températures) qui ont un impact important sur les terres, indépendamment du type d'ensemble de données et de la méthode de traitement utilisés (MetOffice, 2014). Une légère diminution 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) à l'échelle mondiale est prévue dans un avenir proche (de quatre jours/an pour la période 2016-2035 et de dix jours/an pour la période 2081-2100) (Van der Wiel *et al.*, 2017).

42. Il convient de mentionner que, dans de nombreux cas, un aléa associé aux extrêmes d'un facteur climatique particulier peut être aggravé par la présence simultanée d'un autre ou de plusieurs autres aléas, par exemple une crue couplée à une submersion marine (Forzieri *et al.*, 2016). Le cumul chaleur extrême et humidité relative élevée (indice de chaleur) constitue un aléa combiné qui peut avoir des répercussions non négligeables sur la santé et la sécurité du personnel et des passagers de la plupart des modes de transport (Monioudi *et al.*, 2018). Selon des recherches menées récemment (Mora *et al.*, 2017), il existe un « seuil mortel » pour le couple température de l'air en surface/humidité relative au-dessus duquel la capacité thermorégulatrice du corps humain est dépassée (fig. 15). Actuellement, environ 30 % de la population mondiale est exposée au moins vingt jours par an à des conditions climatiques qui dépassent ce seuil mortel et les prévisions donnent à penser que la situation va sérieusement se détériorer en l'espace d'un siècle (sect. II.E.1).

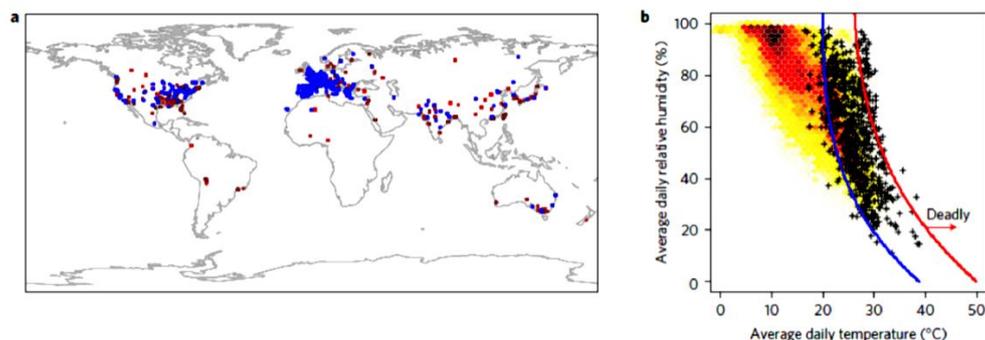
Figure 15

Canicules mortelles (1980-2014)

a) Lieux pour lesquels le lien entre chaleur et mortalité est avéré (carrés rouges) et dans lesquels des épisodes caniculaires particuliers ont été étudiés (carrés bleus).

b) Moyennes quotidiennes de la température de l'air en surface et de l'humidité relative pendant des canicules mortelles (croix noires) et pendant des périodes de même durée pour les mêmes lieux mais à des dates choisies au hasard (des phénomènes non mortels, points rouges à jaunes). La ligne bleue représente le seuil qui sépare le mieux les événements mortels de ceux qui ne le sont pas.

La ligne rouge représente le seuil au-dessus duquel la probabilité de mortalité est de 95 % (Mora *et al.*, 2017)



⁷ Le phénomène climatique extrême le plus meurtrier de ces dernières années reste la sécheresse qui a frappé la Somalie en 2010-2011 et causé la famine de 2010-2012. On estime que cette sécheresse est à l'origine de plus de 258 000 décès (OMM, 2016).

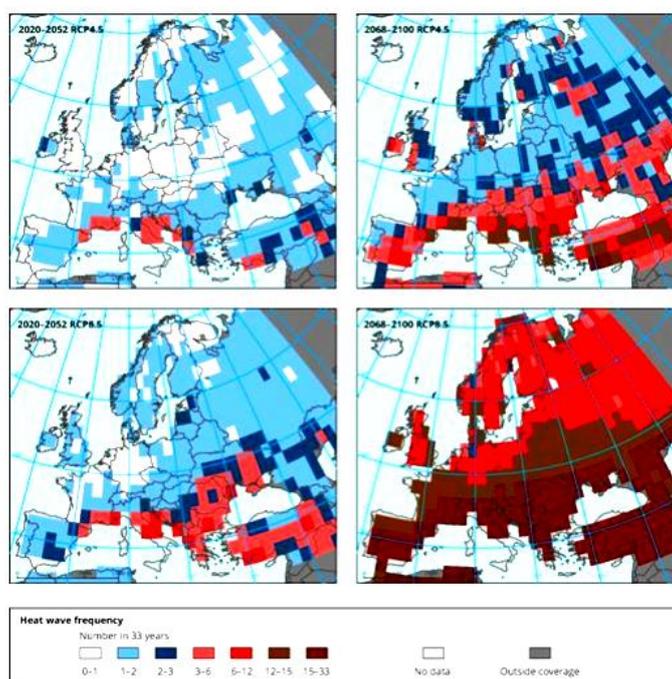
1. Températures extrêmes – vagues de chaleur : Tendances et projections

43. Certains éléments donnent à penser que la fréquence et l'intensité des vagues de chaleur vont augmenter (voir notamment Beniston et Diaz, 2004 ; GIEC, 2013). 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). Ces dernières décennies, la majeure partie de l'Amérique du Nord semble avoir connu davantage de journées et de nuits exceptionnellement chaudes, moins de journées et de nuits exceptionnellement froides et moins de journées de gel (CEE, 2013). 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). Les vagues de chaleur sont souvent associées à de graves sécheresses (comme celle de l'été 2003 en Europe, par exemple). En outre, les épisodes de sécheresse se sont aggravés dans certaines régions, tendance qui devrait perdurer (voire se renforcer) au XXI^e siècle (GIEC, 2013).

44. Des vagues de chaleur ont été enregistrées en Europe en 2012, 2013 et 2014. En Autriche, la température a pour la première fois atteint, voire dépassé, les 40 °C. Une vague de chaleur prolongée a touché de nombreuses régions d'Asie de l'Est en juillet et en août 2013 (OMM, 2014). De fortes canicules (températures atteignant ou dépassant les 45 °C) ont été enregistrées en mai et en juin 2015 en Inde et au Pakistan et ont fait de nombreuses victimes humaines (OMM, 2016). Au début du mois de juillet 2015, l'Europe occidentale et centrale a connu sa plus forte vague de chaleur depuis 2003, et l'Espagne, la France et la Suisse ont battu leurs records de température. Quelques semaines plus tard, 40,3 °C ont été relevés en Allemagne. En 2017, de nombreuses vagues de chaleur ont touché la Turquie et Chypre (fin du mois de juin et début du mois de juillet), l'Espagne et le Maroc (mi-juillet) et l'Italie et les Balkans (début du mois d'août). Des records de température ont été battus à Antalaya en Turquie (45,4 °C le 1^{er} juillet), à Cordoue (46,9 °C le 13 juillet) et à Grenade (45,7 °C le 12 juillet) en Espagne, et à Pescara (41,0 °C le 4 août), à Campobasso (38,4 °C le 5 août) et à Trieste (38,0 °C le 5 août) en Italie. Dans la Vallée de la mort (États-Unis), la température moyenne du mois de juillet (41,9 °C) a été la plus élevée jamais enregistrée dans le pays. Des températures record ont également été relevées en Californie en septembre (41,1 °C à San Francisco) (OMM, 2018).

Figure 16

Projection (valeur médiane) du nombre de vagues de chaleur (à partir d'un ensemble de modèles) dans un avenir proche (2020-2052) et à plus long terme (2068-2100) selon les scénarios RCP4.5 et RCP8.5 (AEE, 2015b)



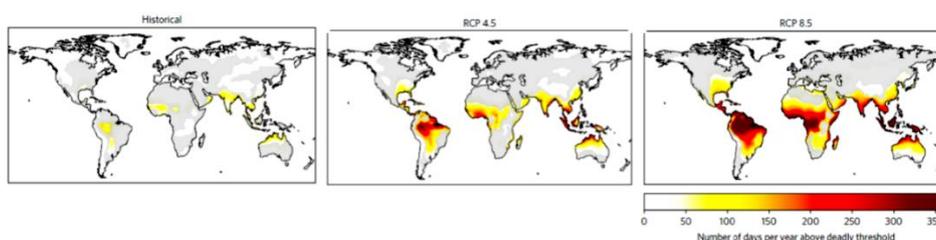
45. Il faut s'attendre, d'ici à la fin du XXI^e siècle, à une augmentation des températures extrêmement chaudes et à de moindres extrêmes de froid hivernal, sachant que la fréquence, la durée et l'ampleur de tels épisodes subiront l'influence du forçage anthropique (GIEC, 2013). Des changements plus marqués concernant les pics de température saisonniers sont attendus dans les régions subtropicales et de latitude moyenne, tandis que la fréquence des journées froides diminuera dans toutes les régions. De manière générale, les étés très chauds devraient être beaucoup plus fréquents à l'avenir, quel que soit le scénario de changements climatiques choisi (Coumou et Robinson, 2013).

46. Il est également probable que la fréquence et la durée des vagues de chaleur (périodes prolongées de chaleur excessive) augmenteront, en Europe par exemple, et ce, principalement sous l'effet de la hausse des températures estivales moyennes. Dans la plupart des régions émergées, il faut s'attendre à ce que la fréquence des épisodes de canicule se produisant tous les vingt ans soit doublée (de nombreuses régions pourraient même y être exposées tous les ans ou tous les deux ans), tandis que les épisodes de grand froid revenant actuellement tous les vingt ans devraient nettement se raréfier selon le scénario RCP8.5 (GIEC, 2013). Une forte augmentation des vagues de chaleur est prévue dans une grande partie de la région de la CEE, en particulier selon le scénario RCP8.5 (fig. 16).

47. Une vague de chaleur aussi forte que celle de 2003 devrait se produire approximativement une fois par siècle dans les conditions climatiques actuelles ; au début des années 2000, on estimait qu'un tel épisode pourrait se produire une fois en l'espace de plusieurs millénaires. Selon une étude d'attribution, l'action anthropique a eu pour effet de multiplier au moins par deux le risque d'apparition d'un tel événement (MetOffice, 2014). D'autres études donnent à penser que la probabilité de voir revenir une vague de chaleur extrême comme celle qui a touché la Fédération de Russie en 2010 pourrait être 5 à 10 fois supérieure d'ici à 2050 (Dole *et al.*, 2011).

Figure 17

Conditions climatiques susceptibles d'entraîner la mort en 2100, selon différents scénarios d'émissions, à savoir le nombre de jours par an dépassant le seuil de température et d'humidité au-dessus duquel les conditions climatiques deviennent mortelles (voir fig. 10) ; moyenne entre 1995 et 2005 (données rétrospectives) et entre 2090 et 2100, selon les scénarios RCP4.5 et RCP8.5. Les résultats sont fondés sur des médianes multimodèles. Les zones grises sont les lieux pour lesquels l'incertitude est élevée (écart type multimodèle plus élevé que la prévision moyenne) (Mora *et al.*, 2017).



48. Comme on l'a vu plus haut, le cumul chaleur extrême et humidité relative élevée (indice de chaleur) peut avoir des répercussions non négligeables sur la santé et la sécurité du personnel et des passagers de la plupart des modes de transport. Les projections (Mora *et al.*, 2017) font ressortir un dépassement sensible du seuil mortel (fig. 15) d'ici à la fin du siècle, qui sera particulièrement important dans le cas du scénario « statu quo » (RCP8.5) et qui aura des conséquences directes pour le sud-ouest des États-Unis et la région méditerranéenne de la CEE (fig. 17).

2. Fortes précipitations et sécheresses : Tendances et projections

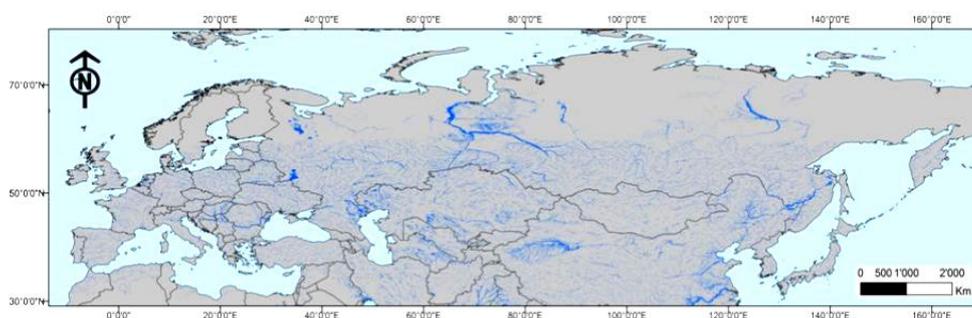
49. L'une des tendances marquées semble être la fréquence et l'intensité croissantes des épisodes de fortes précipitations. Cette tendance est à l'origine de la hausse générale des précipitations enregistrées ces cinquante dernières années et les projections des modèles climatiques donnent à penser qu'elle se poursuivra au cours de ce siècle. Les effondrements

et glissements de terrain se sont multipliés dans les zones montagneuses, car ils sont liés aux fortes précipitations (Karl *et al.*, 2009).

50. Les crues dues aux fortes précipitations sont un aléa très grave et très 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 économiques (Munich Re, 2015). Récemment, les inondations causées par les pluies diluviennes qui ont accompagné les ouragans Harvey (2017) et Florence (2018) ont été particulièrement destructrices dans le sud et l'est des États-Unis. Les crues font intervenir des facteurs physiques et socioéconomiques. Les premiers dépendent du cycle hydrologique, influencé par les variations des températures, les 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).

Figure 18

Risque actuel (probabilité : 95 %) de crues centennales dans la région eurasienne 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. Les zones situées au-delà de 60° de latitude nord ne sont pas intégralement couvertes (GRID du PNUE et SIPC, 2008). (CEE, 2013).



51. Dans la région de la CEE, les inondations sont un aléa constant. Dans les pays d'Europe et d'Asie, le risque de crues (de type centennial) est actuellement élevé, en particulier en Europe centrale et orientale, en Asie centrale et dans les grands bassins versants sud-nord de Sibérie (fig. 18). En Europe, on a constaté une augmentation générale des débits annuels d'eau dans le nord et une baisse dans le sud du continent (voir, par exemple, AEE, 2012), tendance qui devrait se maintenir à l'avenir (Alfieri *et al.*, 2018) étant donné qu'elle est assujettie aux variations prévues du régime de précipitations (AEE, 2015c).

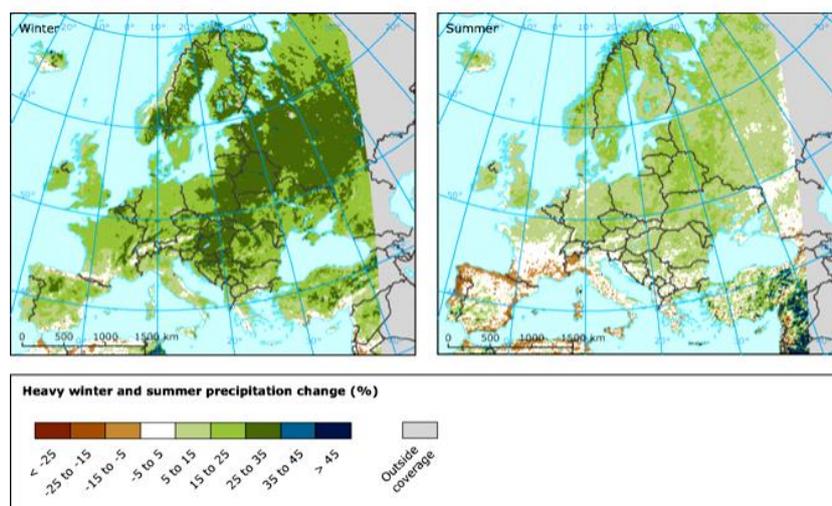
52. L'Amérique du Nord a connu de graves sécheresses en 2012 et en 2013. En juillet 2012, 64,5 % du territoire des États-Unis a été déclaré en état de sécheresse, soit la plus grande superficie jamais touchée par un tel phénomène depuis les années 1930. Entre 2011 et 2016, le volume total de précipitations a été de 30 % inférieur à la normale, ce qui a entraîné des pertes économiques totales de l'ordre de 60 milliards de dollars. L'Australie et l'Afrique australe ont-elles aussi connu des périodes de sécheresse prolongées tandis qu'en Inde, la pluviométrie de la mousson (de juin à septembre) était de 10 % inférieure à la normale en 2014 et en 2015 (OMM, 2016). En 2017, de graves épisodes de sécheresse se sont produits dans de nombreuses régions méditerranéennes et dans certaines régions d'Europe centrale. La période allant de janvier à août a été la plus sèche jamais enregistrée par l'Italie (précipitations de 26 % inférieures à la moyenne pour 1961-1990), tandis que l'Espagne a connu son automne le plus sec et le Portugal sa troisième année la plus sèche. Les régions orientales de la Méditerranée ont aussi été durement touchées, tout comme l'Amérique du Nord. La Californie a enregistré des précipitations importantes au cours de l'hiver 2016-2017, mais la sécheresse a repris ses droits au second semestre 2017 (OMM, 2017 et 2018). Les incendies de végétation ont été nombreux en 2017, en particulier au Portugal, dans le nord-ouest de l'Espagne, en Croatie, en France, en Italie et dans l'ouest de l'Amérique du Nord. Les pertes économiques dues aux incendies de 2017 en Californie ont été évaluées à 18 milliards de dollars, et la superficie totale brûlée dans la partie

continentale des États-Unis était supérieure de 53 % à la moyenne de la période 2007-2016, soit juste en-dessous du record établi en 2015 (OMM, 2018). Les incendies de forêt ont également été plus intenses en 2018, par exemple en Californie et en Grèce.

53. Les phénomènes extrêmes liés au cycle de l'eau (fortes précipitations, inondations et sécheresses) causent déjà des dégâts considérables. À mesure que les températures augmenteront, les précipitations moyennes afficheront d'importantes variations spatiales. D'après le scénario RCP8.5, on peut s'attendre d'ici à la fin du siècle à une augmentation de la pluviométrie aux latitudes moyennes et hautes et à une diminution dans les régions subtropicales arides et semi-arides. Les épisodes de précipitations extrêmes seront plus intenses sur la majeure partie des régions de moyenne latitude et des régions tropicales humides (GIEC, 2013). Pour le centre et le nord-est de l'Europe, les projections laissent présager un net accroissement (25 %) des pluies diluviennes d'ici à la fin du XXI^e siècle (fig. 19). Les modèles climatiques à haute résolution montrent que les fortes pluies saisonnières pourraient s'intensifier sous l'effet des changements climatiques ; au Royaume-Uni, par exemple, les épisodes de violentes averses estivales (plus de 30 mm en l'espace d'une heure) pourraient devenir pratiquement cinq fois plus fréquents même si, dans l'ensemble, il faut s'attendre à des étés plus secs (MetOffice, 2014).

Figure 19

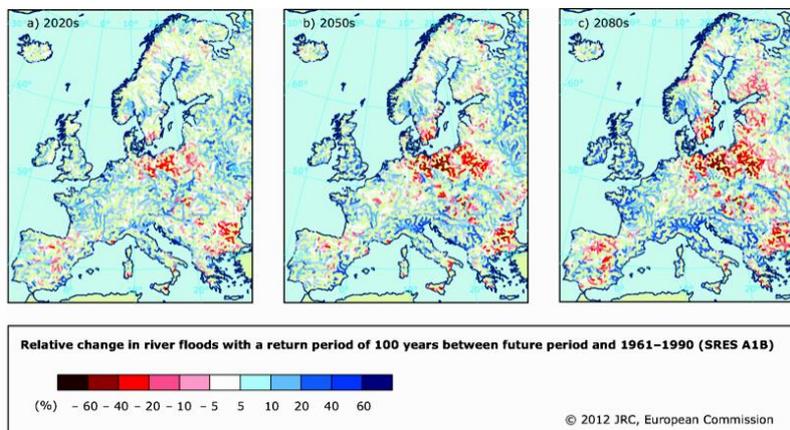
Variations prévues (en pourcentage) des fortes précipitations en hiver et en été entre 1971-2000 et 2071-2100 selon le scénario RCP8.5, à partir d'une moyenne d'ensemble des modèles climatiques régionaux intégrés dans les modèles de circulation générale (AEE, 2015c)



54. Les crues sont une menace très importante pour les infrastructures de transport (CEE, 2013) et pour la population mondiale. L'augmentation des épisodes de ruissellement extrêmes est bien documentée (Feyen *et al.*, 2010), mais la hausse des dégâts et des pertes pourrait également être imputable à l'exposition accrue des populations et des infrastructures dans les plaines d'inondations (GIEC, 2013). On prévoit d'ici à la fin du siècle une possible augmentation substantielle des crues dans la plupart des régions européennes (fig. 20). Des recherches menées récemment (Alfieri *et al.*, 2015) tendent à montrer que le réchauffement de la planète sera lui aussi associé à une hausse importante du risque de crues dans la majeure partie de l'Europe centrale et occidentale (pas de convergence des modèles pour l'Europe orientale). Les dégâts que causeraient les inondations dans le contexte d'un réchauffement de 1,5 °C par rapport à la période préindustrielle (GIEC, 2018) ont été évalués par un super ensemble de modèles à 15 milliards d'euros par an, soit plus du double du coût moyen pour la période 1976-2005. Les dégâts dus aux crues devraient être généralement plus importants dans le nord que dans le sud (Alfieri *et al.*, 2015 et 2018).

Figure 20

Variation relative des crues centennales à compter de a) 2020, b) 2050 et c) 2080, par rapport à la période 1961-1990 dans le cadre du scénario SRES A1B (à peu près équivalent au scénario RCP6.0) (AEE, 2012)



55. La variabilité du climat et les changements climatiques devraient faire augmenter de plus de 50 % le nombre de personnes touchées par les actuelles crues trentennales. D'ici aux années 2050, il existe un risque d'au moins 50 % qu'à eux seuls les changements climatiques accroissent de moitié la menace d'inondation pour les populations de l'Afrique subsaharienne, et un risque de 30 % à 70 % dans le cas de l'Asie. D'ici à 2100, le risque sera plus élevé encore. L'évolution démographique à elle seule condamne un plus grand nombre de personnes à être inondées. À l'échelle mondiale, le total des personnes menacées s'accroît considérablement (cinq à six fois) en l'espace d'un siècle pour le scénario RCP8.5. Concernant la région de la CEE, l'incidence des crues en 2050 (voir ci-dessus) devrait être généralement moindre que dans d'autres régions ; toutefois, la situation dans certains pays de la CEE (les États-Unis par exemple) devrait se dégrader d'ici à 2100 (King *et al.*, 2015).

3. Tempêtes et vents violents : Tendances et projections

56. Certains faits indiquent que les tempêtes et la houle pourraient s'exacerber sous l'effet du réchauffement climatique (voir notamment Emanuel, 2005 ; Ruggiero *et al.*, 2010 ; OMM, 2014). Même si le nombre annuel de tempêtes tropicales n'a pas évolué avec le temps (OMM, 2018), il semble que leur intensité et leurs conséquences se sont amplifiées, probablement en raison de l'augmentation du contenu thermique des océans et des températures à la surface (Trenberth *et al.*, 2018). Les répercussions pourraient être graves, par exemple pour les populations et infrastructures de transport des zones côtières, en raison, notamment, de l'élévation des niveaux marins extrêmes et de l'augmentation des vagues de submersion (Vousdoukas *et al.*, 2018 ; Monioudi *et al.*, 2018). Il convient de noter que les tempêtes peuvent produire des aléas combinés (par exemple crues et inondations côtières et dégâts liés aux vents violents).

57. L'année 2017 est celle où les pertes économiques avérées associées à des phénomènes hydrométéorologiques extrêmes (OMM, 2018) ont été les plus importantes, en particulier en raison d'une saison des ouragans très active en Amérique du Nord, des grandes inondations dues à la mousson dans le sous-continent indien et de graves épisodes de sécheresse en Afrique orientale. L'année 2018 a connu plusieurs tempêtes tropicales majeures, dont certaines se sont formées très rapidement. Parmi ces tempêtes, on peut citer les ouragans Florence et Michael dans l'Atlantique et les typhons dévastateurs Jebi, Manghut (la tempête la plus forte de 2018 avec des vents à 287 km/h) et Trami dans le Pacifique. Certaines de ces tempêtes ont causé des inondations importantes, en particulier Florence (Caroline du Nord et Caroline du Sud, sud-est des États-Unis), Olivia et Lane (Hawaï). Les précipitations dues au cyclone tropical Lane ont été, après celles qui ont accompagné Harvey, les plus fortes que les États-Unis aient connus depuis 1950 (Cheng *et al.*, 2019b).

58. Bien que le nombre global de cyclones tropicaux en 2017 (84) soit proche de la moyenne à long terme, certains ont été particulièrement violents, principalement en Amérique du Nord. Trois ouragans exceptionnellement destructeurs se sont formés dans le nord de l'Atlantique à la fin du mois d'août et en septembre et ont dévasté les zones côtières du sud des États-Unis ainsi que plusieurs îles des Caraïbes, y compris des territoires d'outre-mer d'États membres de la CEE (notamment Porto Rico, les îles Vierges britanniques et Saint-Martin (parties française et néerlandaise)).

Figure 21

Dommmages causés aux infrastructures de transport par des ouragans en 2017.

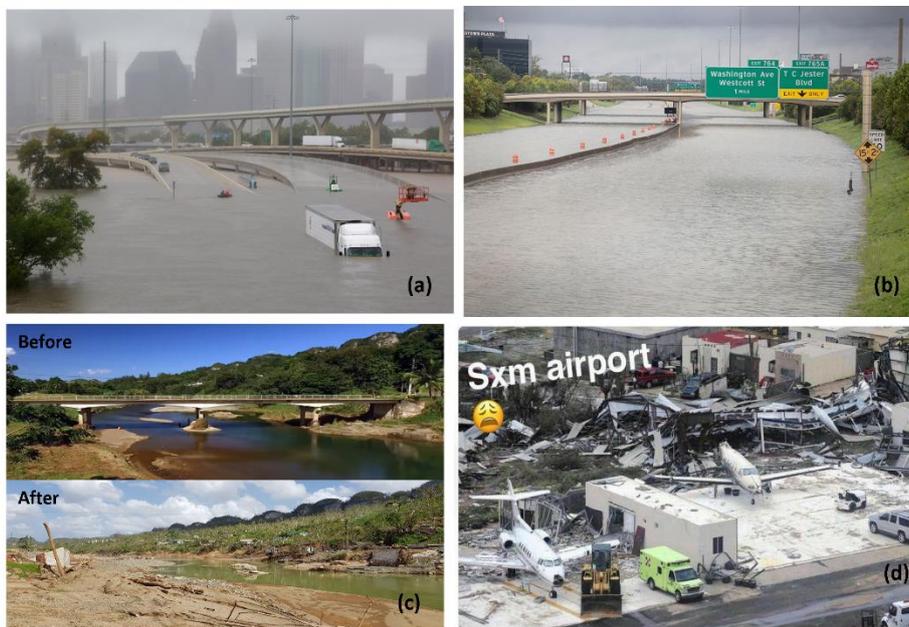
a) Harvey : autoroute inondée dans le centre ville de Houston (États-Unis)

(www.pbs.org/newshour/science/hurricane-harvey-became-extreme)

b) Harvey : autoroutes à Houston (www.vox.com/science-and-health/2017/8/28/16211392/100-500-year-flood-meaning)

c) Maria : Pont à Porto Rico (<https://coastalresiliencencecenter.unc.edu/2018/10/lessons-learned-from-hurricanes-irma-and-maria/>)

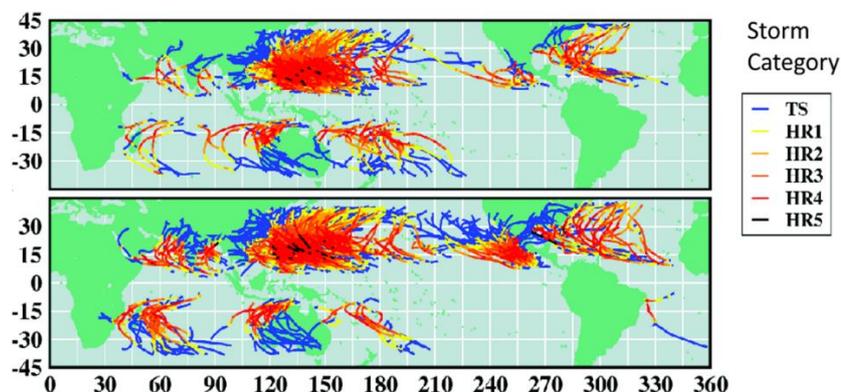
d) Irma : Destruction de l'aéroport international Princess Juliana de Saint-Martin (partie néerlandaise) en septembre 2017 (sxmgovernment.com/2017/09/07/new-photos-hurricane-irmas-destruction-of-st-maartens-princess-juliana-international-airport/)



59. Harvey a touché le sud du Texas alors qu'il était un ouragan de catégorie 4 et est resté presque stationnaire au-dessus de Houston pendant plusieurs jours, déversant des pluies diluviennes et causant de graves inondations (fig. 21) ; 1 539 mm de pluie sont tombés entre le 25 août et le 1^{er} septembre 2017 (probabilité d'apparition annuelle inférieure à 1 sur 1 000). En 2018, Trenberth et ses collègues ont avancé que le changement climatique anthropique avait rendu ce phénomène trois fois plus probable. Les ouragans Irma (catégorie 5, début du mois de septembre) et Maria (catégorie 5, mi-septembre) ont suivi. L'arrivée d'Irma sur la terre ferme a causé des dégâts terribles dans de nombreuses îles des Caraïbes (Barbuda, Saint-Martin (parties française et néerlandaise), Anguilla, Saint-Kitts-et-Nevis, îles Turques et Caïques, îles Vierges, sud des Bahamas et Cuba). Maria a d'abord touché terre à la Dominique (pertes et dégâts estimés à un total de 1,3 milliard de dollars, soit 224 % du PIB), avant de continuer vers Porto Rico où il a causé de graves pertes humaines et des dégâts généralisés. Ces ouragans sont responsables de la mort de plus de 320 personnes et le Centre national d'information environnementale les a classés parmi les cinq ouragans ayant causé les plus grandes pertes économiques aux États-Unis (avec Katrina en 2005 et Sandy en 2012), avec des préjudices estimés à 95 milliards de dollars (Harvey), 70 milliards de dollars (Maria) et 81 milliards de dollars (Irma) (Taalas, 2019).

Figure 22

Figure supérieure : Nombre actuel de tempêtes de catégories 4 et 5 (244).
Figure inférieure : Nombre de tempêtes de catégories 4 et 5 dans le cadre d'un réchauffement de la planète de 2 °C par rapport à la période préindustrielle (313) (en 2100, selon le scénario RCP4.5) (Taalas, 2019).



60. Aux États-Unis, la fréquence des vents violents et des tornades entre 2012 et 2015 a été inférieure à la moyenne pour la période 1991-2010, mais l'Europe a connu plusieurs tempêtes associées à des cyclones extratropicaux. En 2013, le Danemark a enregistré des vents extrêmement forts (53,5 m/s) qui ont causé des dégâts très importants. Les niveaux d'onde de tempête les plus élevés depuis 1953 ont été observés aux Pays-Bas et au Royaume-Uni. Au Royaume-Uni, l'hiver 2013-2014 a été le plus humide jamais enregistré et les vents ont causé de graves dégâts et une érosion des côtes (OMM, 2016). En 2016, la saison des tornades aux États-Unis a été moins active que la normale (985 tornades, soit 10 % de moins que la moyenne calculée depuis 1990). Cependant, des chutes de grêle ont entraîné des dommages supérieurs à 5 milliards de dollars au Texas (OMM, 2017 ; NSIDC, 2017). En 2017, l'Europe centrale et orientale a également essuyé de violents orages. Le 29 mai 2017, des vents de plus de 100 km/h ont causé de multiples dégâts (et au moins 11 morts) à Moscou. On retiendra en outre que des vents violents ont balayé Innsbruck en Autriche (rafales à 165 km/h le 30 juillet) et le sud de la Finlande (12 août). La saison des tornades de 2017 a été supérieure à la normale aux États-Unis (1 406 tornades, soit 12 % de plus que la moyenne pour la période 1991-2010). Une violente tempête (Zeus) s'est abattue sur la France au début du mois de mars (rafales à 193 km/h en Bretagne), tandis que des vents violents ont été enregistrés en Autriche et en Tchéquie à la fin du mois d'octobre avec des rafales dépassant les 170 km/h (OMM, 2018).

61. Les tempêtes et vents violents sont difficiles à prévoir. Toutefois, étant donné que les tempêtes tropicales et extratropicales de forte intensité (qui sont généralement associées à des vents extrêmes, des pluies diluviennes et des inondations côtières) sont alimentées par l'augmentation du contenu thermique et de la température de la couche supérieure de l'océan, il est à prévoir qu'elles s'aggravent à l'avenir. Il a été avancé qu'une modeste hausse de 1° C de la température de la couche supérieure des océans pourrait entraîner une augmentation de la vitesse du vent pouvant atteindre 5 m/s et une hausse du nombre de cyclones les plus destructeurs (ceux de catégorie 5) (Steffen, 2009) ; ces augmentations peuvent avoir de graves effets sur les infrastructures de transport des zones côtières et intérieures (voir notamment Becker *et al.*, 2013). Selon des projections récentes, les tempêtes tropicales les plus intenses devraient se multiplier d'ici à la fin du siècle, même selon un scénario de réchauffement modéré (fig. 22).

4. Niveaux marins extrêmes et vagues de submersion : Tendances et projections

62. Les infrastructures de transport des zones côtières peuvent être touchées par l'érosion et les inondations côtières qui sont le produit des vagues de submersion et de l'élévation des niveaux marins extrêmes (voir notamment Ranasinghe, 2016 ; Rueda *et al.*, 2017). On considère que le niveau marin extrême (NME) est la somme du niveau moyen de la mer (NMM), de la marée astronomique ($\eta_{\text{marée}}$) et de l'élévation épisodique du niveau de l'eau le long des côtes (η_{EC}) due aux ondes de tempête et aux surcotes liées aux vagues. C'est pourquoi tout changement d'origine climatique dans l'un des éléments susmentionnés aura également une incidence sur le niveau marin extrême.

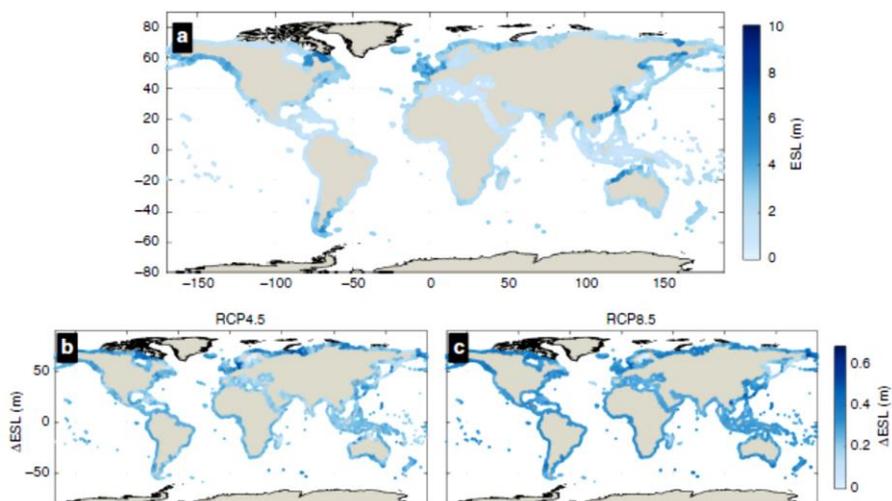
63. L'élévation du niveau moyen de la mer fait monter le niveau marin extrême (Marcos *et al.*, 2011), de même que la multiplication des ondes de tempête. Des variations avérées de l'intensité, de la fréquence et/ou de la configuration des vagues de submersion (Ruggiero, 2013 ; Bertin *et al.*, 2013 ; Pérez *et al.*, 2014 ; Mentaschi *et al.*, 2017) ont déjà et auront à l'avenir une incidence sur le niveau marin extrême, étant donné que de plus hautes vagues entraînent des surcotes plus élevées. Les niveaux marins extrêmes et les vagues de submersion constituent une menace très grave pour les zones côtières et pour les infrastructures et le fonctionnement des transports qui s'y trouvent, et de nombreuses zones côtières sont actuellement concernées par l'érosion et/ou les inondations liées à ces phénomènes (Losada *et al.*, 2013). Il est fort probable que ces aléas se multiplient à l'avenir à cause de l'accélération de l'élévation du niveau de la mer, toutes choses étant égales par ailleurs (Hallegatte *et al.* 2013 ; Vousdoukas *et al.*, 2017).

64. Les niveaux marins extrêmes varient énormément d'une région à l'autre ; ainsi, les valeurs sont très élevées pour de grandes étendues côtières du nord de la région de la CEE (par exemple l'ouest et l'est du Canada, la mer du Nord et l'est de la Russie) par rapport aux côtes de la Méditerranée et de la mer Noire (fig. 24 a). L'élévation du niveau marin extrême peut menacer tout particulièrement les zones côtières très développées et basses, telles que les deltas de fleuve, qui sont considérées comme des points chauds de l'érosion et de la vulnérabilité côtières en raison de l'élévation fréquemment importante du niveau moyen de la mer (CEE, 2013).

65. Selon les projections mondiales, les niveaux marins extrêmes augmenteront au cours du XXI^e siècle dans toutes les régions, mais pas dans la même mesure (fig. 23 b et c). S'agissant de la composante onde de tempête, les projections pour l'Europe donnent des niveaux plus élevés pour les côtes (et les ports) de l'Atlantique et de la Baltique dans tous les scénarios considérés (Vousdoukas *et al.*, 2016a ; Vousdoukas *et al.*, 2017). Les projections pour la mer du Nord, qui est un secteur où l'on observe déjà quelques-uns des plus hauts niveaux d'ondes de tempête en Europe, montrent une augmentation des valeurs extrêmes, surtout le long de la côte est. Les ondes de tempête devraient s'intensifier sur le littoral atlantique du Royaume-Uni et de l'Irlande, en raison principalement d'un accroissement constant des valeurs hivernales extrêmes. Par comparaison, il ressort d'études sur la mer Méditerranée qu'il n'y aura que peu voire pas de changements à l'avenir et qu'une baisse de la fréquence et de l'intensité des phénomènes extrêmes est probable (Conte et Lionello, 2014 ; Androulidakis *et al.* 2015) ou que les variations seront pour l'essentiel de l'ordre de plus ou moins 5 % (Vousdoukas *et al.*, 2016a). Ce constat s'accorde avec les tendances historiques décrites (Menéndez et Woodworth, 2010). Les projections pour le nord de l'Adriatique, côte qui a été étudiée de façon plus approfondie du fait de la forte exposition de la région de Venise, ne font pas apparaître de changement statistiquement significatif dans les niveaux d'onde de tempête (Mel *et al.* 2013 ; voir également Lionello *et al.*, 2012).

Figure 23

Niveaux marins extrêmes actuels dans le monde et variations dues aux changements climatiques. Les cartes exposent l'élévation extrême médiane du niveau de la mer de fréquence centennale dans les conditions actuelles a) et les variations prévues selon les scénarios RCP4.5 b) et RCP8.5 c) d'ici à 2100 (Vousdoukas *et al.*, 2018).

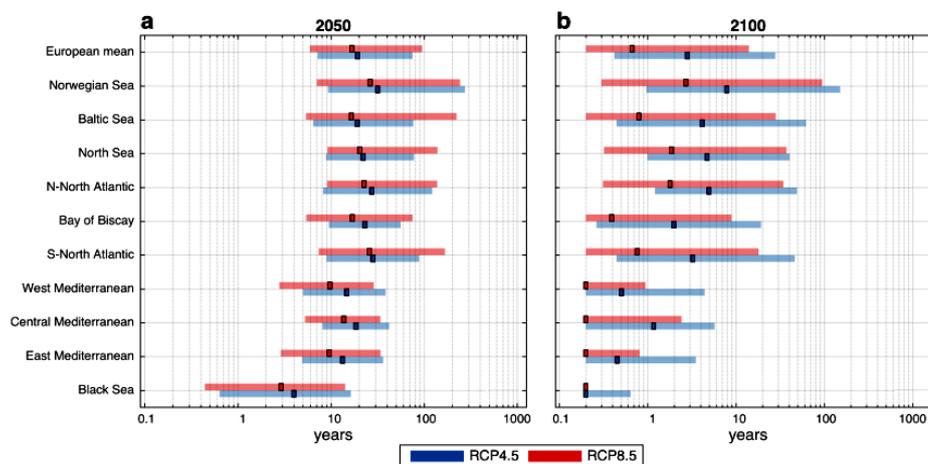


66. Ainsi qu'il ressort des projections des valeurs moyennes pour les côtes européennes, l'élévation extrême du niveau de la mer de fréquence centennale dans les conditions actuelles se produirait, d'ici à 2050, tous les onze ans environ et, d'ici à 2100, tous les trois ans selon le scénario RCP4.5 et tous les ans selon le scénario RCP8.5 (fig. 24). Les 5 millions d'Européens (et leurs infrastructures de transport) actuellement exposés une fois tous les cent ans à ce risque pourraient donc se retrouver inondés quasiment chaque année d'ici à la fin du siècle (Vousdoukas *et al.*, 2016b ; 2017). Certaines régions devraient connaître une augmentation encore plus forte de la fréquence des événements extrêmes, en particulier le long de la Méditerranée et de la mer Noire, où l'on prévoit que l'élévation extrême du niveau de la mer actuellement centennale se produira encore plus souvent.

67. Il convient de noter que plus de 200 millions de personnes dans le monde vivent le long de côtes qui s'élèvent de moins de 5 m au-dessus du niveau de la mer et que leur nombre pourrait atteindre 400 à 500 millions d'ici à la fin du XXI^e siècle. L'exposition croissante au risque (pour les populations comme pour les biens), l'élévation du niveau de la mer due à la variabilité du climat et aux changements climatiques et, dans certaines régions, l'affaissement sensible du littoral causé par le drainage des eaux côtières et le pompage des eaux souterraines, aggraveront à des degrés divers le risque d'inondation. Ainsi, une élévation d'un mètre du niveau marin relatif peut multiplier par 40 la fréquence des inondations côtières centennales à Shanghai, par 200 à New York et par 1 000 à Kolkata (OMM, 2014).

Figure 24

Intervalle de récurrence de l'élévation extrême du niveau de la mer actuellement centennale le long de la côte européenne selon les scénarios RCP4.5 et RCP8.5 en 2050 a) et 2100 b). Les cellules colorées correspondent à la valeur d'ensemble moyenne et les barres colorées à la variabilité entre les modèles (meilleure-pire hypothèse). (Vousdoukas *et al.*, 2017)



68. Selon Hallegatte *et al.* (2013), la situation des 136 plus grandes villes côtières risque d'être la suivante d'ici une cinquantaine d'années : i) le montant des dommages pourrait passer de 6 à 52 milliards de dollars par an du fait de l'augmentation des habitants et des biens ; ii) les pertes annuelles pourraient avoisiner voire dépasser les 1 000 milliards de dollars par an si les dispositifs de protection contre les inondations ne sont pas renforcés ; iii) même en cas de renforcement de ces dispositifs, les pertes pourraient s'accroître à mesure de l'intensification des épisodes d'inondation côtière sous l'effet de l'élévation du niveau de la mer. Cela soulève la question de savoir s'il y existe d'éventuels seuils au-delà desquels les tendances actuelles et projetées en matière de croissance des populations côtières et de leurs biens pourraient s'inverser (King *et al.*, 2015).

69. En ce qui concerne les vagues de submersion, les résultats de travaux de modélisation menés récemment dans le cadre du scénario RCP8.5 laissent présager une augmentation pouvant aller jusqu'à 30 % des flux d'énergie liés à la houle pour un intervalle de récurrence de cent ans dans la plupart des régions côtières de la zone tempérée sud, hormis l'est de l'Australie, l'Atlantique sud et le Pacifique est subéquatorial-tropical

(Mentaschi *et al.*, 2017). En comparaison, de vastes zones côtières de l'hémisphère Nord devraient afficher une tendance négative, à l'exception du Pacifique nord-est et de la mer Baltique qui pourraient connaître des hausses allant jusqu'à 30 %.

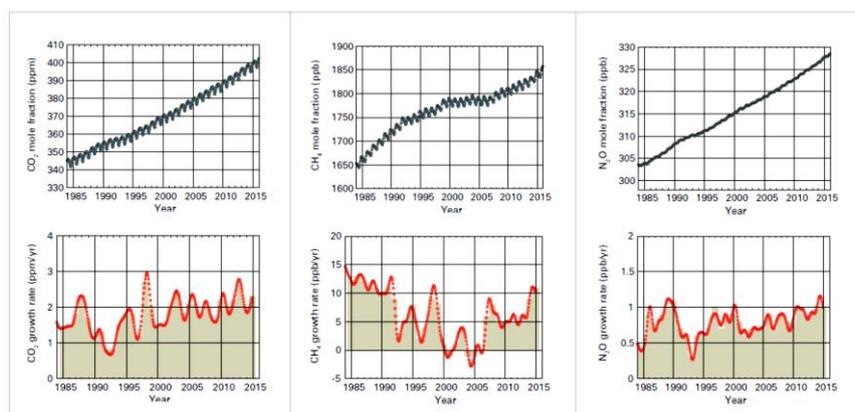
F. Mécanisme de forçage

70. Les concentrations de plus en 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). Les GES 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 (GIEC, 2013). Sans effet de serre, les températures moyennes sur la Terre seraient de l'ordre de -19 °C, soit environ 34 °C de moins qu'actuellement. Toutes les planètes qui contiennent dans leur atmosphère des gaz absorbant la chaleur sont soumises à l'effet de serre. Ainsi, les températures extrêmement élevées sur Vénus sont dues à une forte concentration de GES dans son atmosphère.

71. Présente en abondance, la vapeur d'eau est un gaz qui contribue beaucoup à l'effet de serre. La capacité de l'atmosphère de retenir la vapeur d'eau augmente avec le réchauffement de la planète, donc la vapeur d'eau non seulement suit mais amplifie les variations de température mondiales dues à la concentration croissante d'autres GES (voir, notamment Richardson *et al.*, 2009 ; Shakun *et al.*, 2012). Les concentrations de dioxyde de carbone (CO₂), de méthane (CH₄) et d'autres GES dans l'atmosphère ont énormément augmenté au cours des dernières décennies (fig. 25), probablement à cause des activités de l'homme (GIEC, 2013).

Figure 25

Rangée supérieure : Moyenne de la fraction molaire (mesure de la concentration) à l'échelle du globe du CO₂ en parties par million (gauche), du CH₄ en parties par milliard (milieu) et du N₂O en parties par milliard (droite) entre 1984 et 2016.
Rangée inférieure : Taux de croissance représentant une hausse des moyennes annuelles successives des fractions molaires du CO₂ (gauche), du CH₄ (milieu) et du N₂O (droite) (OMM, 2018).



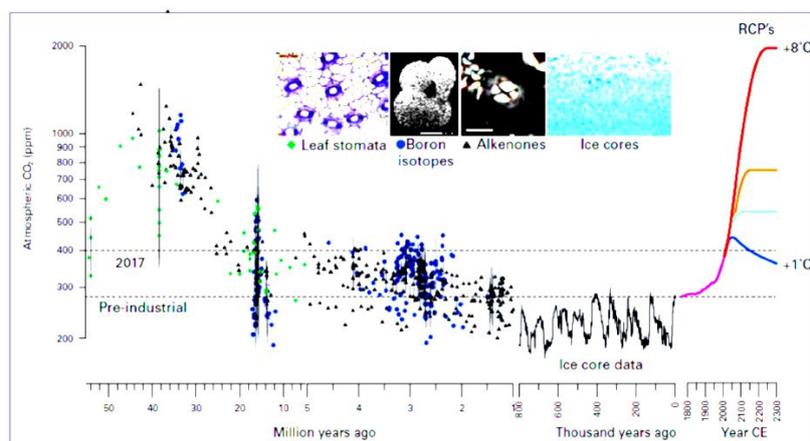
72. Les mesures du CO₂ dans l'atmosphère et dans l'air piégé par la glace montrent que les GES ont augmenté d'environ 40 % depuis 1800, l'essentiel de cette hausse se produisant depuis les années 1970 avec l'accélération de la consommation d'énergie dans le monde (AEE, 2015a). Des données provenant de carottes de glace et d'autres éléments factuels donnent à penser que les concentrations actuelles en CO₂ n'ont jamais été aussi élevées au cours des deux derniers millions d'années au moins (fig. 26), la barre des 400 parties par million ayant été franchie le 9 mai 2013 (NOAA, 2015).

73. En dépit des quelques mesures prises pour atténuer les changements climatiques, les émissions totales de GES à l'échelle de la planète n'ont cessé de croître ces dernières décennies (fig. 26 et 27). Depuis 2014, le taux de croissance des concentrations en CO₂ et

en N_2O est légèrement supérieur à la moyenne pour la période 1995-2014. La concentration en CH_4 s'est elle aussi accrue, après une période de relative stabilité entre 1999 et 2006 (NOAA, 2015 ; OMM, 2016). On estime qu'environ 44 % de l'ensemble du CO_2 émis par les activités humaines resterait dans l'atmosphère et que les 56 % restants seraient stockés dans les océans et la biosphère terrestre (OMM, 2014 et 2016).

Figure 26

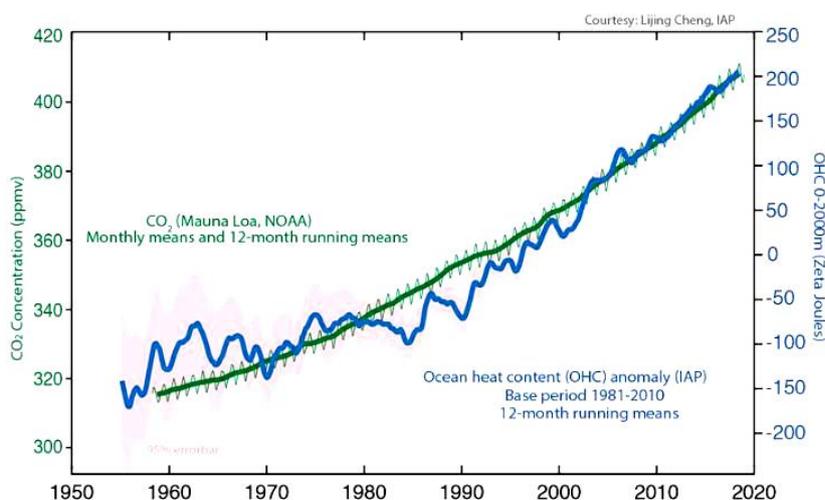
Reconstitution du CO_2 dans l'atmosphère depuis 55 millions d'années fondée sur des données indirectes (isotopes du bore – ronds bleus, alcénonnes – triangles noirs et stomates des feuilles – losanges verts). Les mesures directes des 800 000 dernières années proviennent de carottes de glace de l'Antarctique et d'instruments modernes (rose). Les estimations pour l'avenir concernent les profils représentatifs d'évolution de concentration du GIEC (RCP) 8,5 (rouge), 6 (orange), 4,5 (bleu clair) et 2,6 (bleu foncé). CE = current era (notre ère) (OMM, 2018).



74. En outre, il semble y avoir une bonne corrélation entre la concentration de CO_2 et le stockage de chaleur dans l'océan (fig. 27), ce qui pose un problème croissant pour les populations et infrastructures des zones côtières étant donné la relation avérée entre le stockage de chaleur par l'océan et l'élévation du niveau de la mer.

Figure 27

Évolution du contenu thermique de l'océan (jusqu'à 2 000 m de profondeur) et de la concentration de CO_2 dans l'atmosphère (L. Cheng).



75. Une ventilation des émissions anthropiques totales de GES en 2010 a révélé que le CO_2 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 CH_4 pour 16 %, le N_2O 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 et de production (GIEC, 2014). Une évaluation des émissions de CO₂ rapportées au revenu des pays montre qu'elles ont doublé dans les pays à revenu moyen supérieur (Chine et Afrique du Sud, par exemple) entre 1990 et 2010, atteignant pratiquement le niveau des pays à revenu élevé. On observe aussi une augmentation notable des émissions de CO₂ dans les pays à revenu moyen inférieur (GIEC, 2014).

G. Références

- Alfieri L., Feyen L., Dottori F. and Bianchi A., 2015. Ensemble flood risk assessment in Europe under high end climate scenarios. *Global Environmental Change* 35,199-212. (doi:10.1016/j.gloenvcha.2015.09.004)
- Alfieri L., Dottori F., Betts R., Salamon P., Feyen L., 2018. Multi-model projections of river flood risk in Europe under global warming. *Climate* 6, 16 doi:10.3390/cli6010016
- AMAP, 2012. Arctic Climate Issues 2011: Changes in Arctic Snow, Water, Ice and Permafrost. SWIPA 2011.Overview Report
- Androulidakis Y.S., Kombiadou K.D., Makris C.H., Baltikas V.N. and Krestenitis Y.N. 2015 Storm surges in the Mediterranean Sea: Variability and trends under future climatic conditions. *Dynamics of Atmospheres and Oceans* 71, 56–82.
- Arnell N. et al 2014. Global-scale climate impact functions: the relationship between climate forcing and impact. *Climate Change* (134), 475–87.
- Asariotis R., Mohos-Naray V., Benamara H., 2017. Port Industry Survey on Climate Change Impacts and Adaptation. UNCTAD Research Paper No. 18, UNCTAD/SER.RP/2017/18. 37 pp plus Appendices.
- https://unctad.org/en/PublicationsLibrary/ser-rp-2017d18_en.pdf
- Becker A., Acciaro A., Asariotis R., Cabrera E. et al., 2013. A note on climate change adaptation for seaports: A challenge for global ports, a challenge for global society. *Climatic Change*, 120, 683-695.
- Beniston M. and Diaz H.F. 2004. The 2003 heat wave as an example of summers in a greenhouse climate? Observations and climate model simulations for Basel, Switzerland. *Global and Planetary Change* 44, 73–81.
- Bertin X., Prouteau E. and Letetrel C. 2013. A significant increase in wave height in the North Atlantic Ocean over the 20th century. *Global and Planetary Change* 106, 77–83.
- Camus P., Losada I.J., Izaguirre C., Espejo A., Menéndez M., Pérez J., 2017. Statistical wave climate projections for coastal impact assessments. *Earth's Future* 5, 918–933. <https://doi.org/10.1002/2017EF000609>
- Canadell J.G., Le Quere C., Raupach M.R. et al. 2007. Contributions to accelerating atmospheric CO₂ growth from economic activity, carbon intensity, and efficiency of natural sinks. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 104, 18866-18870.
- Carson M., Kohl A., Stammer D. et al., 2016. Coastal sea level changes, observed and projected during the 20th and 21st century. *Climatic Change* 134, 269-281. (doi: 10.1007/s10584-015-1520-1).
- Cheng L., Abraham J., Hausfather Z., Trenberth K.E., 2019a. How fast are the oceans warming? Observational records of ocean heat content show that ocean warming is accelerating. *Science* 363 (6423), 128–129.
- Cheng L., Zhu J., Abraham J. et al., 2019b. Continues Record Global Ocean Warming. *Advances in Atmospheric Sciences* 36 (3), 249–252. doi.org/10.1007/s00376-019-8276-x.
- Church J.A., Clark P.U., Cazenave A., et al., 2013. Sea level change. In *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth*

- Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. (T.F. Stocker, Qin D., Plattner G.-K. et al. [eds]) Cambridge; UK 1137–1216.
- Conte, D. and Lionello, P. 2014. Storm Surge Distribution Along the Mediterranean Coast: Characteristics and Evolution, *Procedia -Social and Behavioral Sciences* 120, 110–115. (ISSN 1877-0428).
- Coumou, D. and Rahmstorf, S. 2012. A decade of weather extremes. *Nature Climate Change* 29, 491-496. (doi:10.1038/nclimate1452).
- Coumou D. and Robinson A., 2013. Historic and future increase in the global land area affected by monthly heat extremes. *Environmental Research Letters* 8 (3) iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/8/3/034018/meta.
- Cowan K. and Way R. G. 2014. Coverage bias in the HadCRUT4 temperature series and its impact on recent temperature trends. *Q.J.R. Meteorol. Soc.* 140, 1935–1944. (doi: 10.1002/qj.2297)
- Cronin T.M., 2012. Rapid sea-level rise. *Quaternary Science Reviews* 56, 11–30.
- Dai A., 2013. Increasing drought under global warming in observations and models. *Nature Climate Change* 3, 52–58.
- De Conto R.M. and Pollard D., 2016. Contribution of Antarctica to past and future sea-level rise. *Nature* 531, 591-596. (doi: 10.1038/nature17145)
- Dieng H.B., A. Cazenave, B. Meyssignac, K. von Schuckmanc and H. Palanisamy, 2017a. Sea and land surface temperatures, ocean heat content, Earth's energy imbalance and net radiative forcing over the recent years. *Int. J. Climatol.* (2017), 12 pp., doi: 10.1002/joc.4996
- Dieng H. et al., 2017b. New estimate of the current rate of sea level rise from a sea level budget approach. *Geophysical Research Letters*, 44, doi: 10.1002/2017GL073308.
- Dole et al., 2011. Was there a basis for anticipating the 2010 Russian heat wave? *Geophysical Research Letters* 38, L06702.
- Dutton A., Carlson A.E., Long A. J. et al., 2015. Sea-level rise due to polar ice-sheet mass loss during past warm periods. *Science* 349, 6244 <https://marine.rutgers.edu/pubs/private/Science-2015-Dutton-.pdf>
- ECE, 2013. *Climate Change Impacts and Adaptation for International Transport Networks*, United Nations Economic Commission for Europe, New York and Geneva, 2013, 248 pp. www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/main/wp5/publications/climate_change_2014.pdf
- EEA, 2010. *The European environment: State and outlook 2010, Adapting to climate change*. European Environmental Agency, Copenhagen. (ISBN 978-92-9213-159-3).
- EEA, 2012. *Climate change, impacts and vulnerability in Europe 2012. An indicator-based report*. European Environmental Agency (EEA), Copenhagen, Denmark, 300 pp. (ISBN 978-92-9213-346-7)
- EEA, 2014a. Projected changes in annual, summer and winter temperature. [Online image]. European Environment Agency (EEA). Available from: www.eea.europa.eu/data-and-maps/figures/projected-changes-in-annual-summer-1 [Accessed 01/03/2016].
- EEA, 2014b. Trend in absolute sea level in European Seas based on satellite measurements (1992–2013). [Online image]. European Environment Agency (EEA). Available from: www.eea.europa.eu/data-and-maps/figures/sea-level-changes-in-europe-october-1992-may-1 [Accessed 01/03/2016].
- EEA, 2014c. Projected change in relative sea level. [Online image]. European Environment Agency (EEA). Available from: www.eea.europa.eu/data-and-maps/figures/projected-change-in-sea-level [Accessed 01/03/2016].
- EEA, 2015a, *Global megatrends assessment: Extended background analysis complementing the SOER 2015 'Assessment of global megatrends'*. European Environmental Agency, Copenhagen. (ISSN 1725-2237).

- EEA, 2015b. Number of extreme heat waves in future climates under two different climate forcing scenarios. Available from: www.eea.europa.eu/data-and-maps/figures/number-of-extreme-heat-waves [Accessed 13/07/2015].
- EEA, 2015c. Projected changes in heavy precipitation (in per cent) in winter and summer from 1971–2000 to 2071–2100 for the RCP8.5 scenario based on the ensemble mean of different regional climate models (RCMs) nested in different general circulation models (GCMs). Available from: www.eea.europa.eu/data-and-maps/figures/projected-changes-in-20-year-2 [accessed 21/03/2016].
- Egorshv S., 2018. Presentation at the ECE Expert Group 18 and 19 December 2019, Geneva.a. www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/doc/2018/wp5/2_Russian_Federation_Mr_Egorshv_Climate_Change_18-19_December_2018.pdf
- Emanuel K. 2005. Increasing destructiveness of tropical cyclones over the past 30 years. *Nature* 436, 686–688.
- EPA, 2015. Precipitation Worldwide, 1901–2013 [Online image]. Available from: <https://www3.epa.gov/climatechange/science/indicators/weather-climate/precipitation.html> [Accessed 03/02/2016].
- Feyen L., Dankers R. and Bodis K., 2010. Climate warming and future flood risk in Europe. *Climatic Change*.
- Forzieri G., Feyen L., Russo S. et al. 2016. Multi-hazard assessment in Europe under climate change. *Climatic Change* 137, 105 - 119. <https://doi.org/10.1007/s10584-016-1661-x>.
- Fourier J. J., 1827. MEMOIRE sur les temperatures du globe terrestre et des espaces planetaires Memoires d l'Academie Royale des Sciences de l'Institute de France VII, pp. 570–60.
- Fyfe J.C., Meehl G.A., England M.H. et al., 2016. Making sense of the early-2000s warming slowdown. *Nature Climate Change* 6, 224–228, doi:10.1038/nclimate2938.
- Grinsted A., Moore J.C. and Jervejeva S., 2010. Reconstructing sea level from paleo and projected temperatures 200 to 2100 AD. *Climate Dynamics* 34, 461–472.
- Hallegatte S., Green C., Nicholls R. J. and Corfee-Morlot J., 2013. Future flood losses in major coastal cities, *Nature Climate Change* 3, 802–806. (doi:10.1038/NCLIMATE1979)
- Hanna E. et al., 2013. Ice sheet mass balance and climate change. *Nature* 498, 51–59.
- Hansen J., Sato M., Hearty P. et al., 2016. Ice melt, sea level rise and superstorms: Evidence from paleoclimate data, climate modeling, and modern observations that 2°C global warming could be dangerous. *Atmos. Chem. Phys.* 16, 3761–3812 (doi:10.5194/acp-16-3761-2016).
- Hay C.C., Morrow E., Kopp R.E. and Mitrovica J.X., 2015. Probabilistic reanalysis of twentieth-century sea-level rise. *Nature* 517, 481–484.
- Hinkel J., Lincke D., Vafeidis A.T. et al., 2014. Coastal flood damages and adaptation costs under 21st century sea-level rise, *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, 111, 3292–3297.
- Horton R., Herweijer C, Rosenzweig C, Liu J, Gornitz V, and Ruane AC, 2008. Sea level rise projections for current generation CGCMs based on the semi-empirical method. *Geophysical Research Letters* 35 DOI:10/1029/2007GL032486.
- Horton, B.P., Rahmstorf, S., Engelhart, S.E. and Kemp, A.C. 2014. Expert assessment of sea-level rise by AD 2100 and AD 2300. *Quaternary Science Reviews*, 84, 1–6.
- IPCC, 2007. *Climate Change 2007. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (Solomon S, D Qin, M Manning, Z Chen, M Marquis, KB Averyt, M Tignor and HL Miller (eds)). Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 996 pp.

- IPCC, 2013. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker T.F., Qin D., Plattner G.-K. et al. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- IPCC, 2014. *Summary for policy makers. In: Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Field C.B., Barros V.R Dokken D.J., et al. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1-32.
- IPCC, 2018: *Summary for Policymakers. In: Global warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty* [V. Masson-Delmotte V., Zhai P., Pörtner J.O. et al. (eds.)]. World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland 32 pp. www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2018/07/SR15_SPM_High_Res.pdf
- IPCC SREX, 2012. *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation* [Field C.B., Barros V., Stocker T.F. et al. (eds.)]. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA. 582 pp.
- Jevrejeva S., Moore J.C. and Grinsted A., 2010. How will sea level respond to changes in natural and anthropogenic forcings by 2100? *Geophysical Research Letters* 37. DOI: 10.1029/2010GL042947.
- Jevrejeva S., Moore J.C. and Grinsted A. 2012. Sea level projections to AD2500 with a new generation of climate change scenarios. *Global and Planetary Change* 80–81, 14–20. (doi:10.1016/j.gloplacha.2011.09.006).
- Jevrejeva S., Jackson L.P., Riva R.E.M., Grinsted A., Moore J.C., 2016. Coastal sea level rise with warming above 2°C. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 113, 13342 LP-13347. <https://doi.org/10.1073/pnas.1605312113>.
- Karl T.R., Melillo J. T. and Peterson T. C. 2009. *Global Climate Change Impacts in the United States*. Cambridge University Press, 189 pp.
- Karl T.R., Arguez A., Huang, B. et al., 2015. Possible artifacts of data biases in the recent global surface warming hiatus, *Science*, 348, pp. 1469–1472.
- Katsman C.A., Sterl A., Beersma J.J. et al., 2011. Exploring high end scenarios for local sea level rise to develop flood protection strategies for a low-lying delta. The Netherlands as an example. *Climatic Change* 109 (3-4), 617–645. (doi:10.1007/s10584-011-00375)
- King D., Schrag D., Dadi Z., Ye Q. and Ghosh A. 2015. *Climate Change: A Risk Assessment*. Centre for Science and Policy, University of Cambridge. (www.csap.cam.ac.uk/media/uploads/files/1/climate-change--a-risk-assessment-v9-spreads.pdf)
- Kopp R., Simons F., Mitrovica J., Maloof A. and Oppenheimer M., 2009. Probabilistic assessment of sea level during the last interglacial stage. *Nature* 462, 863–867. (doi:10.1038/nature08686).
- Lionello P., Galati M.B. and Elvini E. 2012. Extreme storm surge and wind wave climate scenario simulations at the Venetian littoral. *Phys Chem Earth Parts A/B/C* 40–41, 86–92.
- Losada I.J., Reguero B.J., Mendez F.G., et al., R. 2013. Long-term changes in sea level components in Latin America and the Caribbean. *Global and Planetary Change* 104, 34–50.
- Marcos M., Jorda G., Gomis D. and Perez B. 2011. Changes in storm surges in southern Europe from a regional model under climate change scenarios. *Global and Planetary Change* 77(3–4), 116–128. (doi:10.1016/j.gloplacha.2011.04.002)
- Mel R., Sterl A. and Lionello P. 2013. High resolution climate projection of storm surge at the Venetian coast. *Nat Hazards Earth System Science* 13, 1135–1142.

- Menendez M. and Woodworth P.L. 2010. Changes in extreme high water levels based on a quasi-global tidegauge data set. *Journal of Geophysical Research*, 115, C10011. (doi:10.1029/2009JC005997).
- Menounos, B., Hugonnet R., Shean D. et al., 2018. Heterogeneous Changes in western North American glaciers linked to decadal variability in zonal wind strength. *Geophysical Research Letters* 45, <https://doi.org/10.1029/2018GL08094>.
- Mentaschi L., M. I. Vousdoukas E. Voukouvalas A. Dosio, and L. Feyen, 2017. Global changes of extreme coastal wave energy fluxes triggered by intensified teleconnection patterns. *Geophys. Res. Let.* 44, 2416–2426, doi:10.1002/2016GL072488.
- MetOffice, 2014. *Climate risk An update on the science*. Met Office, Handley Center, Devon, UK, 9 pp.
- Meyer-Christoffer A., Becker A., Finger P. et al., 2015. *GPCC Climatology Version 2015 at 0.25°: Monthly Land-Surface Precipitation Climatology for Every Month and the Total Year from Rain-Gauges Built on GTS-Based and Historic Data*; GPCC: Offenbach, Germany, 2015.
- Milly P.C.D., Betancourt J., Falkenmark M. et al., 2008. Stationarity is dead: Whither water management? *Science* 319, 573–574.
- Monioudi I. N., Asariotis R. Becker A. et al., 2018. Climate change impacts on critical international transportation assets of Caribbean Small Island Developing States (SIDS): The case of Jamaica and Saint Lucia. *Regional Environmental Change*, 18 (8), 2211–2225.
- Mora C., Dousset B., Caldwell I.R. et al., 2017. Global risk of deadly heat. *Nature Climate Change* 7, 501–507. DOI: 10.1038/NCLIMATE3322
- Mori N., Shimura T., Yasuda T. and Mase H., 2013. Multi-model climate projections of ocean surface variables under different climate scenarios—Future change of waves, sea level and wind. *Ocean Engineering*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.oceaneng.2013.02.016>
- Moss R. et al., 2010. The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature* 463, 747–756.
- Munich Re, 2015. *NatCatSERVICE: Loss events worldwide 1980–2014*.
- NASA, 2016. NOAA Analyses Reveal Record-Shattering Global Warm Temperatures in 2015 [WWW] Goddard Institute for Space Studies. Available from: www.giss.nasa.gov/research/news/20160120/ [Accessed 13/02/2016]
- NOAA, 2015. 2014 State of the Climate: Carbon Dioxide [WWW] Available from: <https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/2014-state-climate-carbon-dioxide>
- NOAA, 2016. Global Analysis - Annual 2015: 2015 year-to-date temperatures versus previous years [WWW] National Centers for Environmental Information. Available from: www.ncdc.noaa.gov/sotc/global/2015/13/supplemental/page-3 [Accessed 12/02/2016]
- NOAA, 2017a. National Centers for Environmental Information (NCEI). 2016 Officially Warmest Year on Record. (Published online January 2017, accessed on May 24, 2017 www.nvnl.noaa.gov/MediaDetail2.php?MediaID=1989&MediaTypeID=3&ResourceID=105007/
- NOAA, 2017b. National Center for Environmental Information (NCEI), State of the Climate: Global Snow and Ice for 2016. (Published online 01/2017, retrieved on May 9, 2017 from www.ncdc.noaa.gov/sotc/global-snow/201613
- NOAA, 2017c. National Centers for Environmental Information (NCEI) U.S. Billion-Dollar Weather and Climate Disasters. www.ncdc.noaa.gov/billions/
- NSIDC, 2017. National Snow and Ice Data Center. Snow, Ice and Climate Change (retrieved on May 24, 2017 from nsidc.org/cryosphere/climate-change.html
- Pérez J., Menendez M., Mendez F. and Losada I. 2014. Evaluating the performance of CMIP3 and CMIP5 global climate models over the north-east Atlantic region. *Climate Dynamics* 43, 2663–2680.

- Pfeffer W., Harper J. and O' Neel S., 2008. Kinematic constraints on glacier contributions to 21st century sea level rise. *Science* 321, 1340–1343. (doi:10.1126/science.1159099).
- Rahmstorf S., Cazenave A., Church J.A. et al., 2007. Recent climate observations compared to projections. *Science* 316, 709–709.
- Rahmstorf S., 2012. Climate Change: State of Science. In: *Maritime Transport and the Climate Change Challenge*, R. Asariotis and H. Benamara, eds., Earthscan, pp. 3–11.
- Rahmstorf S., Foster G., Cahill N., 2017. Global temperature evolution: recent trends and some pitfalls. *Environmental Research Letters* 12, 054001.
- Ranasinghe R., 2016. Assessing climate change impacts on open sandy coasts: A review. *Earth Science Reviews* 160, 320-332.
- Richardson K., Steffen W., Schellnhuber H.J. et al., 2009. Synthesis Report. *Climate change: Global Risks, Challenges and Decisions*. University of Copenhagen, 39 pp.
- Rignot, E., Velicogna, I., van den Broeke, M.R., Monaga, A. and Lenaerts, J. 2011. Acceleration of the contribution of the Greenland and Antarctic ice sheets to sea level rise. *Geophysical Research Letters*, (38), 5 pp. (doi:10.1029/2011GL046583).
- Rignot E., Mouginot, J., Scheuchl, B. et al., 2019. Four decades of Antarctic Ice Sheet mass balance from 1979–2017. *PNAS* doi.org/10.1073/pnas.1812883116
- Rohling E., Grant K., Hemleben C. et al., 2008. High rates of sea level rise during the last interglacial period. *Nature Geosciences* 1, 38–42. (doi:10.1038/ngeo.2007.28).
- Rueda A., Vitousek S., Camus P. et al., 2017. A global classification of coastal flood hazard climates associated with large-scale oceanographic forcing. *Scientific Reports* 7, 5038. doi.org/10.1038/s41598-017-05090-w
- Ruggiero P., Komar P.D. and Allan J.C., 2010. Increasing wave heights and extreme value projections: The wave climate of the U.S. Pacific Northwest. *Coastal Engineering* 57, 539–552.
- Ruggiero P. 2013. Is the intensifying wave climate of the U.S. Pacific Northwest increasing flooding and erosion risk faster than sea-level rise? *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering* 139 (2), 88–97.
- Schneider U., Finger P., Meyer-Christoffer A., 2017. Evaluating the Hydrological Cycle over Land Using the Newly-Corrected Precipitation Climatology from the Global Precipitation Climatology Centre (GPCC). *Atmosphere*, 8 (52), doi: 10.3390/atmos8030052.
- Schuur EAG, McGuire A.D., Schädel C., et al., 2015. Climate change and the permafrost carbon feedback. *Nature* 520, 171–179. 10.1038/nature14338
- Seneviratne, S. I., et al., 2016. Allowable CO2 emissions based on regional and impact-related climate targets. *Nature* 529, 477–483. doi:10.1038/nature16542.
- Shakun J.D., Clark P.U., He F. et al., 2012. Global warming preceded by increasing carbon dioxide concentrations during the last deglaciation, *Nature* 484, 49–55.
- Simmons A.J., P. Berrisford, D.P. Dee, H. Hersbach, S. Hirahara and J.N. Thepaut, 2017. A reassessment of temperature variations and trends from global reanalyses and monthly surface climatological datasets. *Q.J.R. Meteorol. Soc.* 143, 101–119, doi:10.1002/qj.2949.
- Steffen, W. 2009. *Climate Change 2009: Faster Change and More Serious Risks*. Report to the Department of Climate Change, Australian Government.
- Taalas P., 2019. WMO presentation, UN Oceans Meeting, 7–8 February 2019, Geneva.
- Trenberth K.E., Cheng L., Jacobs P., Zhang Y., Fasullo J.T., 2018. Hurricane Harvey links to ocean heat content and climate change adaptation. *Earth's Future* 6, 730–744. doi.org/10.1029/2018EF000825

- U.S. Climate Resilience Toolkit, 2015. Arctic Development and Transport. [WWW] Available from: toolkit.climate.gov/content/about-climate-resilience-toolkit (accessed 15/01/2016).
- UNFCCC, 2015. The Paris Agreement by Parties to the United Nations Framework Convention on Climate Change. unfccc.int/meetings/paris_nov_2015/items/9445.php.
- Van der Wiel K., Kapnick S.B. and Vecchi G.A., 2017. Shifting patterns of mild weather in response to projected radiative forcing. *Climatic Change* 140, 649-658. doi: 10.1007/s10584-016-1885-9.
- Velicogna I., Sutterley T. C. and van den Broeke M. R. 2014. Regional acceleration in ice mass loss from Greenland and Antarctica using GRACE time-variable gravity data. *Geophys. Res. Lett.*, 41(22), 8130-8137.
- Vellinga P. et al. 2008. Exploring high-end climate change scenarios for flood protection of the Netherlands. International Scientific Assessment for the Delta Committee. SR WR-2009-05. KNMI, Alterra, The Netherlands. www.knmi.nl/bibliotheek/knmipubWR/WR2009-05.pdf.
- Vermeer M. and Rahmstorf S., 2009 Global sea level linked to global temperature. *Proceedings of the National Acedemy of Sciences USA* 106, 21527–21532. (doi:10.1073/pnas.0907765106).
- Vogel M.M., R. Orth, F. Cheruy, S. Hagemann, R. Lorenz, B.J.J.M. van den Hurk, and S.I. Seneviratne, 2017. Regional amplification of projected changes in extreme temperatures strongly controlled by soil moisture-temperature feedbacks. *Geophys. Res. Letters*, 44, 1511–1519. doi:10.1002/2016GL071235.
- Vousdoukas M.I., Voukouvalas E., Annunziato A., Giardino A. and Feyen, L., 2016a. Projections of extreme storm surge levels along Europe. *Climate Dynamics* doi: 10.1007/s00382-016-3019-5.
- Vousdoukas M.I., E. Voukouvalas, L. Mentaschi, F. Dottori, A. Giardino, D. Bouziotas, A. Bianchi, P. Salamon and L. Feyen, 2016b. Developments in large-scale coastal flood hazard mapping. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 16, 1841–1853, doi:10.5194/nhess-16-1841-2016.
- Vousdoukas M.I., L. Mentaschi, E. Voukouvalas, M. Verlaan, and L. Feyen, 2017. Extreme sea levels on the rise along Europe’s coasts. *Earth’s Future* 5, 304–323. doi:10.1002/2016EF000505.
- Vousdoukas M.I., Mentaschi L., Voukouvalas E., Verlaan M., Jevrejeva S., Jackson L.P., Feyen L., 2018. Global probabilistic projections of extreme sea levels show intensification of coastal flood hazard. *Nat. Commun.* 9, 2360. doi.org/10.1038/s41467-018-04692-w.
- Wada Y., van Beek L.P.H., Weiland F.C.S. et al., 2012. Past and future contribution of global groundwater depletion to sea-level rise. *Geophys Res Letters* 39, L09402. (doi: 10.1029/2012GL051230)
- Wester, P., Mishra, A. Mukherji, A. Shrestha. A.B., (eds), 2019. *The Hindu Kush Himalaya Assessment- Mountains, Climate Change, Sustainability and People*. Springer Nature Switzerland AG, Cham. link.springer.com/content/pdf/10.1007/978-3-319-92288-1.pdf
- WMO, 2014. Statement on the status of the global climate in 2014, World Meteorological Organization, WMO-No. 1152, Chairperson, Publications Board, Geneva, 22 pp. (ISBN: 978-92-63-11152-4.)
- WMO, 2016. WMO Statement on the Status of the Global Climate in 2015, World Meteorological Organization, WMO-No. 1167, Chairperson, Publications Board, Geneva, Switzerland, 26 pp. (ISBN: 978-92-63-11167-8.). See also www.indiaenvironmentportal.org.in/content/421694/provisional-statement-on-the-status-of-global-climate-in-2011-2015/.
- WMO, 2017. WMO Statement on the State of the Global Climate in 2016. World Meteorological Organization Report 1189, library.wmo.int/opac/doc_num.php?explnum_id=3414).

WMO, 2018. WMO Statement on the State of the Global Climate in 2017. World Meteorological Organization Report 1212. library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=4453.

Yan X.-H., Boyer T., Trenberth K. et al., 2016. The global warming hiatus: Slowdown or redistribution? *Earth's Future*, 4, 472–482, doi:10.1002/2016EF000417.
