



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

Genève, 22 et 23 juin 2017

Point 4 de l'ordre du jour provisoire

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

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

II. Changements climatiques : tendances récentes et projections**A. Projections climatiques récentes**

2. La dynamique des facteurs climatiques (température de surface des terres émergées et des mers, niveau de la mer, étendue de la couverture glaciaire arctique, bilan de masse

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



des glaciers, etc.), désormais mieux consignée et mieux comprise, laisse entrevoir une modification importante du climat et, dans certains cas, une accélération des changements climatiques. Une telle information et certains éléments plus récents donnent à penser que les facteurs climatiques qui influent sur les transports (CEE, 2013) se « dégradent ».

3. L'océan se réchauffera dans tous les scénarios RCP. D'après les projections, le réchauffement le plus marqué concernera l'océan superficiel des régions tropicales et subtropicales. À plus grande profondeur, c'est l'océan Austral qui se réchaufferait le plus. Les estimations les plus probables du réchauffement des océans sur les 100 premiers mètres sont de l'ordre de 0,6 °C (RCP2.6) à 2,0 °C (RCP8.5), et de 0,3 °C (RCP2.6) à 0,6 °C (RCP8.5) à une profondeur d'environ 1 000 m d'ici à la fin du XXI^e siècle. Pour le RCP4.5, la moitié de l'énergie absorbée par l'océan le sera dans les 700 premiers mètres de profondeur et 85 % dans les 2 000 m sous la surface. Compte tenu des longues échelles de temps de ce transfert de chaleur entre les eaux de surface et les couches profondes, le réchauffement des océans se poursuivra pendant des siècles, même si les émissions de gaz à effet de serre étaient stabilisées (GIEC, 2013).

4. S'agissant de la température de l'air, une tendance à la hausse sur le long terme se dessine nettement. Selon les projections pour la fin du XXI^e siècle, la température de l'air augmentera, en fonction du scénario, dans une fourchette de 1,0 °C à 3,7 °C (estimations moyennes, voir le tableau 1). En se fondant sur un éventail de scénarios possibles d'évolution des concentrations de gaz à effet de serre (GIEC, 2013), on obtient comme estimation centrale (point médian) du réchauffement une élévation de 1,0 °C à 2,0 °C pour la période 2046-2065 par rapport à la moyenne de la période 1986-2005, tandis que, vers la fin du XXI^e siècle (2081-2100), des hausses comprises entre 1,0 °C et 3,7 °C sont à prévoir. Cependant, la fourchette des projections s'élargit, passant à une valeur comprise entre 0,3 °C et 4,8 °C, lorsqu'on tient compte des incertitudes des modèles dans les calculs.

Tableau 1

Évolution prévue de la température moyenne à la surface du globe et du niveau moyen des mers pour la période 2081-2100 (moyennes et fourchettes probables) par rapport à la période 1986-2005, selon différents scénarios (d'après GIEC, 2013)

(Les prévisions sont établies selon quatre scénarios de forçage radiatif (profils représentatifs d'évolution de concentration (RCP)¹ : RCP 8.5, 6184 Gt CO² (cumul des émissions de CO² sur 2012-2100) ; RCP 6.0, 3890 Gt CO² ; RCP 4.5, 2863 Gt CO² ; RCP 2.6, 991 Gt CO². Les changements de la température moyenne de surface sont calculés à partir de l'ensemble CMIP5 (fourchettes des modèles allant de 5 % à 95 %). Les estimations de l'élévation du niveau des mers reposent sur 21 modèles CMIP5 (fourchettes des modèles allant de 5 % à 95 %). Les contributions de l'évolution dynamique rapide des calottes glaciaires et du stockage anthropique de l'eau dans les terres émergées sont considérées comme ayant des distributions uniformes des probabilités et comme étant en grande partie indépendants du scénario, vu que l'état actuel des connaissances ne permet pas d'évaluer quantitativement cette dépendance².)

Scénario	Température		Élévation du niveau des mers	
	Valeur moyenne (°C)	Fourchette probable (°C)	Valeur moyenne (m)	Fourchette probable (m)
RCP 2.6	1,0	0,3-1,7	0,40	0,26-0,55
RCP 4.5	1,8	1,1-2,6	0,47	0,32-0,63
RCP 6.0	2,2	1,4-3,1	0,48	0,33-0,63
RCP 8.5	3,7	2,6-4,8	0,63	0,45-0,82

¹ Les récentes prévisions du cinquième Rapport d'évaluation du GIEC (RE5) (2013) s'appuient sur des scénarios de profils représentatifs d'évolution de concentration (RCP) et non sur les scénarios SRES du GIEC. Les concentrations d'équivalent CO² (eq CO²) ont été fixées (voir notamment Moss *et al.*, 2010) comme suit : RCP 8.5, 1 370 eq CO² en 2100 ; RCP 6.0, 850 eq CO² en 2100 ; RCP 4.5, 650 eq CO² en 2100 ; et RCP 2.6, pic à 490 eq CO² avant 2100 (Moss *et al.*, 2010).

² Selon les scénarios, le niveau des mers ne cessera pas de monter après 2100, mais continuera de s'élever pendant des siècles ; en valeur médiane, l'élévation sera de 1,84 m pour le scénario de forçage le plus bas et de 5,49 m pour le plus élevé (RCP 8.5) à l'horizon 2500 (Jevrejeva *et al.*, 2012).

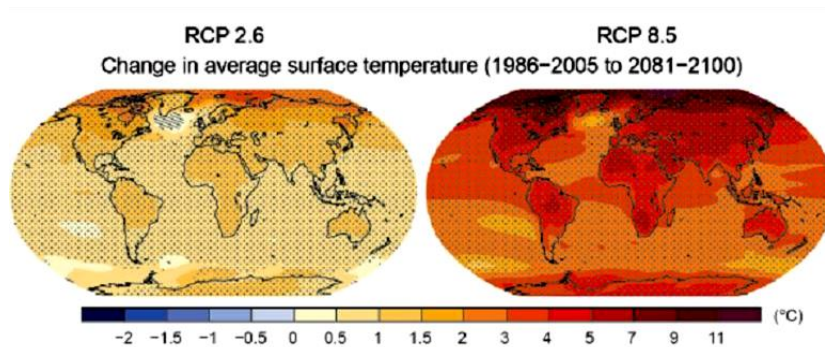
1.2.1 Température et précipitations

5. Le climat ne se modifie pas de façon uniforme : les températures augmentent plus vite près des pôles qu'à l'Équateur (fig. 21 et 22). Les précipitations évoluent de façon bien plus complexe, certaines régions en recevant davantage, et d'autres moins qu'auparavant (CEE, 2013). Ces tendances devraient s'accélérer à l'avenir, comme dans l'est de la Méditerranée, où la pluviométrie devrait accuser une baisse atteignant jusqu'à 25 % durant la décennie 2020-2029 par rapport à la décennie 1990-1999 (GIEC, 2007). Tant dans le scénario d'une augmentation basse à modérée des émissions (RCP4.5) que dans celui d'une forte augmentation (RCP8.5), des hausses importantes de la température à la surface du globe sont à prévoir, surtout en ce qui concerne la partie septentrionale de la région de la CEE (GIEC, 2013).

6. Les projections des modèles climatiques donnent à penser que la majeure partie de la région sud-ouest de l'Amérique du Nord et de nombreuses autres régions subtropicales seront victimes d'épisodes de sécheresse à grande échelle d'ici au milieu ou à la fin du XXI^e siècle (Milly *et al.*, 2008 ; GIEC, 2013). En revanche, alors que l'on prévoit des étés (généralement) plus secs au Royaume-Uni, les précipitations risquent d'y être plus abondantes. Des simulations effectuées à partir de modèles montrent que des précipitations intenses associées à des crues soudaines (plus de 30 mm en l'espace d'une heure) pourraient devenir cinq fois plus fréquentes (MetOffice, 2014).

Figure 21

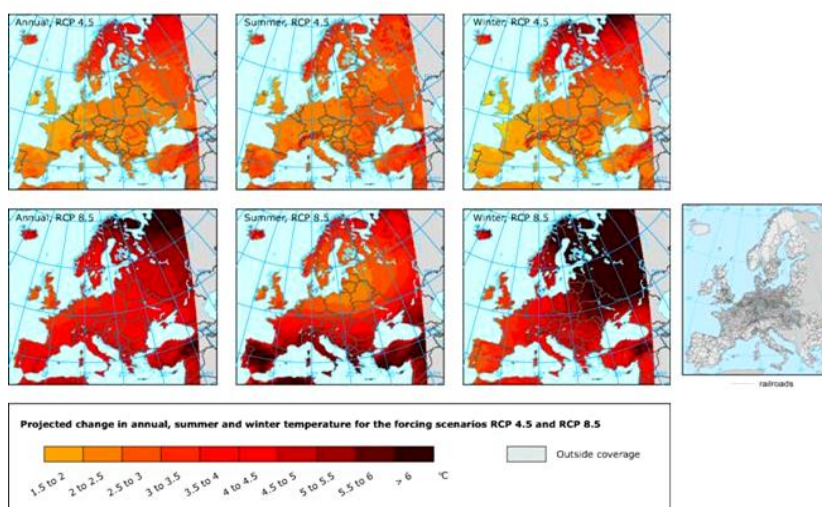
Projections des variations des températures moyennes en 2081-2100 par rapport à 1986-2005 selon un scénario de faibles émissions (RCP2.6) et un scénario de fortes émissions (RCP8.5) (GIEC, 2013)



7. Des études prévoient également une diminution de la durée et de l'intensité des épisodes de sécheresse en Europe méridionale et dans la Méditerranée, en Europe centrale et dans certaines parties de l'Amérique du Nord (voir notamment GIEC, 2013). Parallèlement, des études récentes donnent à penser que, pour les trente à quatre-vingt-dix années à venir (Dai, 2013), la majeure partie de la région sud-ouest de l'Amérique du Nord et les régions subtropicales pourraient connaître des épisodes de sécheresse graves et généralisés (GIEC, 2013). Selon Vogel *et al.* (2017), la moyenne multimodèle de la température maximale quotidienne (TX_x) augmente à l'échelle mondiale dans les simulations (modèles CTL et SM20c) jusqu'à la fin du siècle.

Figure 22

Projections des variations de la température de l'air 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))

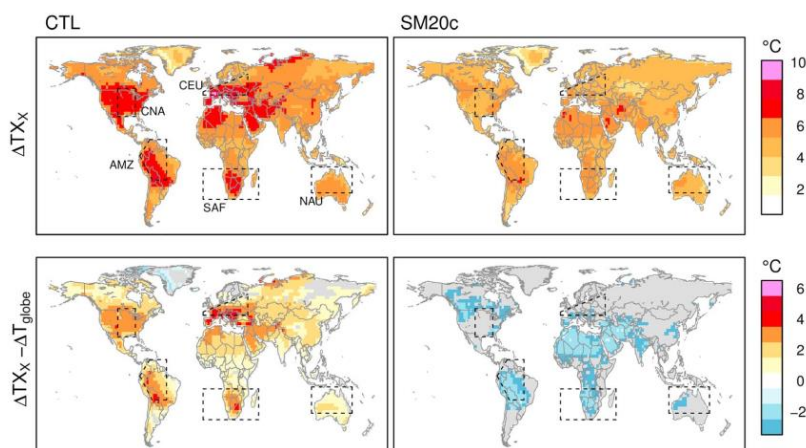


8. Les changements prévus sont plus prononcés dans le modèle CTL, les hausses régionales pouvant atteindre 10 °C, alors que, dans les simulations SM20c, les variations de température s'échelonnent entre 1 °C et 6 °C (fig. 23, en haut). Il semble y avoir aussi d'importantes différences régionales entre l'élévation prévue de la TX_x en Europe centrale, dans la partie centrale de l'Amérique du Nord, l'Australie septentrionale et l'Afrique australe. De telles différences peuvent laisser entrevoir des réactions humidité du sol – climat à des températures extrêmes dans des régions.

Figure 23

Projections des variations de la TX_x (en haut) entre 2081-2100 et 1951-1970 et de son augmentation additionnelle par rapport à la T_{globe} (en bas) entre 2081-2100 et 1951-1970 pour les modèles CTL (à gauche) et SM20c (à droite)

(La couleur grise dénote une convergence insuffisante des modèles, dans le cas où moins de 4 modèles font apparaître un signal de variation identique. L'échelle colorimétrique supérieure correspond aux schémas du haut, l'échelle colorimétrique inférieure aux schémas du bas (Vogel *et al.*, 2017)).



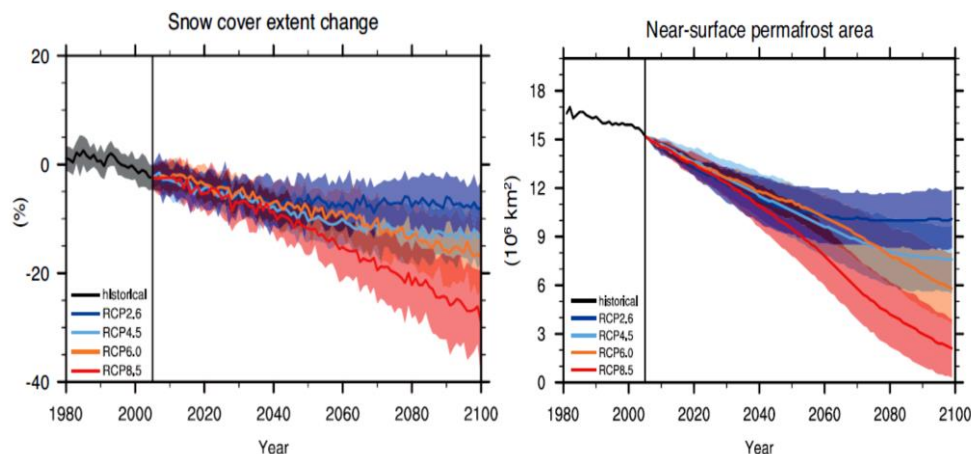
1.2.2 Fonte de la calotte glaciaire, du manteau neigeux et du pergélisol dans l'Arctique

9. On prévoit une augmentation des averses de neige et de pluie dans les régions arctiques en toute saison, mais surtout l'hiver ; en maints endroits, l'épaisseur maximale du manteau neigeux en hiver 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 10 % à 20 % de temps en moins chaque année sur la majeure partie des régions

arctiques en raison d'une fonte printanière plus précoce (AMAP, 2012). Le manteau neigeux de l'hémisphère Nord diminuera au printemps de 7 % d'ici à 2100 selon le scénario RCP2.6 et de 25 % selon le scénario RCP8.5 (fig. 24a). Concernant les glaciers de montagne et les calottes glaciaires, les projections des modèles climatiques font apparaître une réduction de 10 à 30 % de leur masse d'ici à la fin du siècle (AMAP, 2012). Les modèles prévoient aussi un dégel continu du pergélisol dû à la hausse des températures à l'échelle mondiale et à l'évolution du manteau neigeux (AMAP, 2012). 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 l'ampleur des changements touchant le permafrost, ce qui tient notamment aux processus pédologiques, aux scénarios de forçage climatique et à la modélisation des aspects physiques, son étendue devrait diminuer, d'ici à la fin du XXI^e siècle, de 37 % selon le scénario RCP2.6 et de 81 % selon le scénario RCP8.5 (degré de confiance moyen) (fig. 24b).

Figure 24

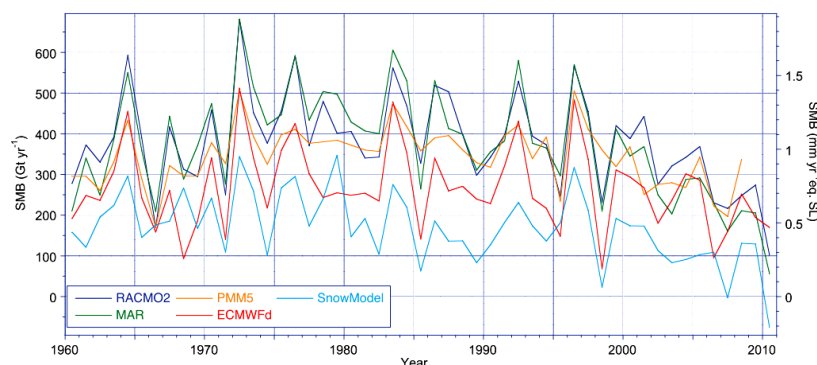
Projections a) de l'évolution de l'étendue du manteau neigeux et b) des modifications de la couche du pergélisol proche de la surface selon quatre profils représentatifs d'évolution de concentration (RCP) (tirés de l'ensemble de modèles CMIP5) (GIEC, 2013)



10. 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.

Figure 25

Bilan massique de surface (moyenne annuelle) de la calotte glaciaire du Groenland – simulation obtenue à partir de cinq modèles climatiques régionaux pour la période 1960-2010 (Hansen *et al.*, 2016)

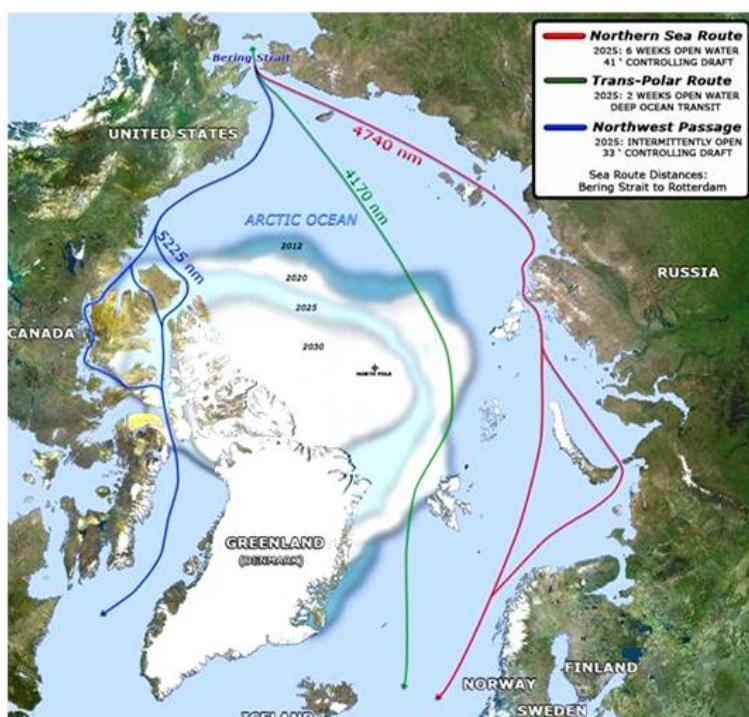


11. Il est probable que l'étendue et l'épaisseur de la banquise arctique continueront de diminuer sous l'effet de l'élévation des températures moyennes à la surface du globe, encore qu'il faille s'attendre à une variabilité considérable d'une année sur l'autre. Au vu de l'ensemble de modèles CMIP5, l'étendue de la calotte glaciaire arctique devrait nettement reculer. Pour la période 2081-2100, les projections laissent entrevoir une réduction moyenne pouvant atteindre entre 8 % et 34 % en février et entre 43 % et 94 % en septembre par comparaison avec la période 1986-2005 (limites inférieures et supérieures correspondant aux scénarios RCP2.6 et RCP8.5, respectivement) (GIEC, 2013).

12. Le réchauffement continu de la planète aura d'importantes répercussions sur l'inlandsis groenlandais dans les prochaines décennies. Dans les conditions climatiques actuelles, le Groenland présente un bilan massique de surface positif mais en diminution, entraînant une contribution croissante à l'élévation du niveau moyen des mers. D'après les éléments disponibles, il est peu probable que les modifications du bilan massique de surface se traduisent par un effondrement du glacier continental groenlandais au XXI^e siècle ; mais il faut sans doute s'y attendre sur des échelles de temps séculaires ou millénaires (GIEC, 2013). Les estimations de l'écart moyen et de l'écart type d'accumulation (précipitations moins sublimation) pour 1961-1990 sont de $-1,62 \pm 0,21 \text{ mm an}^{-1}$. Toutes les informations disponibles montrent que le bilan massique de surface du Groenland n'a guère évolué entre les années 1960 et les années 1980, mais qu'il a commencé à présenter des valeurs moins positives au début des années 1990 (soit une perte de masse de l'ordre de 3 % an^{-1} en moyenne). Il en résulte une contribution statistiquement significative et croissante à l'élévation du niveau moyen des mers à l'échelle mondiale (fig. 25). Selon le GIEC (2013), l'évolution dynamique de la calotte glaciaire du Groenland au cours du siècle prochain pourrait contribuer à une hausse du niveau des mers de l'ordre de 20 à 85 mm dans un scénario RCP8.5, et de 14 à 63 mm dans tous les autres scénarios (degré de confiance moyen). D'autres études prévoient des bilans massiques de surface de $0,92 \pm 0,26 \text{ mm an}^{-1}$ (par comparaison avec la période 1961-1990) (Hansen *et al.*, 2016). Par comparaison, le bilan massique de surface de la calotte glaciaire antarctique devrait s'accroître dans la plupart des scénarios du fait d'une tendance à la hausse des chutes de neige. Cela étant, il est à noter qu'une perte de masse dans l'Antarctique risquerait de contribuer pour plus d'un mètre à l'élévation du niveau des mers d'ici à 2100 (De Conto et Pollard, 2016).

Figure 26

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



13. Concernant la glace de l'Arctique, la marine des États-Unis prévoit l'ouverture de trois voies maritimes majeures d'ici à 2025 (fig. 26), ce qui ne va toutefois pas sans présenter des risques pour l'environnement et des problèmes d'aménagement. Il se peut qu'apparaissent de nouvelles perspectives économiques pour les communautés vivant dans l'Arctique dans la mesure où le recul de la glace facilitera l'accès à d'importants gisements d'hydrocarbures (dans les mers de Beaufort et des Tchouktches) et le commerce international. En même temps, les infrastructures existantes et tous les aménagements à venir subiront les effets du dégel du pergélisol et de l'action des vagues sur les côtes (voir ci-dessous) sous l'effet de la variabilité et des changements climatiques.

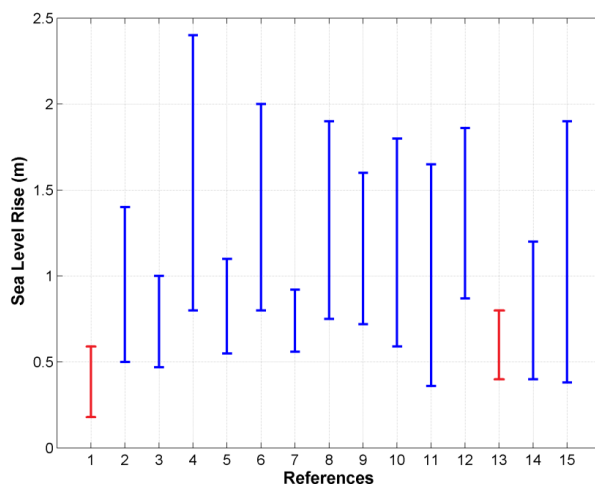
1.2.3 Niveau des mers

14. Pour ce qui est de l'élévation du niveau des mers, les prévisions fondées sur des processus pâtissent des incertitudes liées au comportement des calottes glaciaires du Groenland et de l'Antarctique occidental (Pritchard *et al.*, 2012), à l'effet stérique (Domingues *et al.*, 2008), à la contribution des glaciers de montagne (Raper et Braithwaite, 2009) ainsi qu'aux pompes d'eaux souterraines aux fins d'irrigation et de stockage dans des réservoirs (Wada *et al.*, 2012). La fonte de la calotte glaciaire de l'Antarctique pourrait relever le niveau de la mer de plus d'un mètre d'ici à 2100 (De Conto et Pollard, 2016).

Figure 27

Projections récentes de l'élévation du niveau de la mer à l'horizon 2100, par comparaison avec les projections du GIEC (2007a)

(Clef : 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 des projections s'explique par les écarts entre les hypothèses et les démarches retenues).



15. Le niveau moyen des mers est monté, à l'échelle mondiale, de 0,19 m entre 1901 et 2013 (au rythme de 1,7 mm an⁻¹ en moyenne), mais cette tendance s'est accélérée au cours des deux dernières décennies (atteignant près de 3,2 mm an⁻¹). Les modèles prévoient pour 2081-2100 (par comparaison avec 1986-2005) une augmentation probable 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. On pense que l'accroissement de la pente de la courbe correspondant à l'élévation du niveau des mers ces dernières décennies est principalement due aux apports croissants provenant de la fonte des glaces du Groenland et de l'Antarctique (voir notamment Rignot *et al.*, 2011 ; Hanna *et al.*, 2013 ; GIEC, 2013). Des estimations s'appuyant sur d'autres méthodes donnent une hausse du niveau moyen des mers nettement supérieure à ce qui était prévu une décennie plus tôt (GIEC, 2007) ; il est à noter que le GIEC fournit systématiquement des estimations relativement prudentes (fig. 27). Le niveau de la mer (fig. 28) ne cessera pas de monter en 2100 (voir notamment Jevrejeva *et al.*, 2012), car les variations de la chaleur contenue dans les océans pourraient entraîner une expansion thermique pendant plusieurs siècles (au moins), tandis que la fonte de la banquise et la perte dynamique de

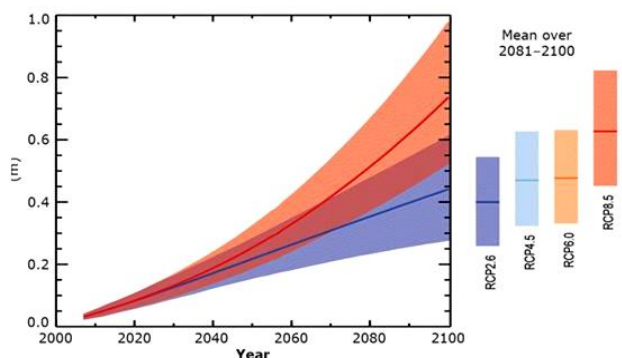
glace dans l'Antarctique et au Groenland se poursuivront elles aussi jusque dans un avenir assez lointain.

16. Il convient de noter qu'en raison de l'importante variabilité spatiale constatée (et projetée) de l'élévation du niveau des mers (fig. 29), les tendances régionales devraient être prises en considération si l'on souhaite en évaluer l'impact le long de telle ou telle côte (voir notamment Carson *et al.*, 2016).

17. Outre les processus à l'œuvre à l'échelle planétaire, des facteurs régionaux peuvent aussi contribuer aux variations observées du niveau des eaux côtières, notamment des modifications de la circulation des océans (circulation méridienne océanique) et un rythme différent de fonte des glaces à l'échelle régionale, l'ajustement isostatique et le tassement des sédiments côtiers (GIEC, 2013 ; King *et al.*, 2015 ; Carson *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, dépassant sensiblement la moyenne mondiale actuelle qui est d'environ 3 mm an⁻¹ (voir notamment Cronin, 2012).

Figure 28

Projections de l'élévation du niveau moyen des mers à l'échelle du globe dans le courant du XXI^e siècle par rapport à 1986-2005 (GIEC, 2013)

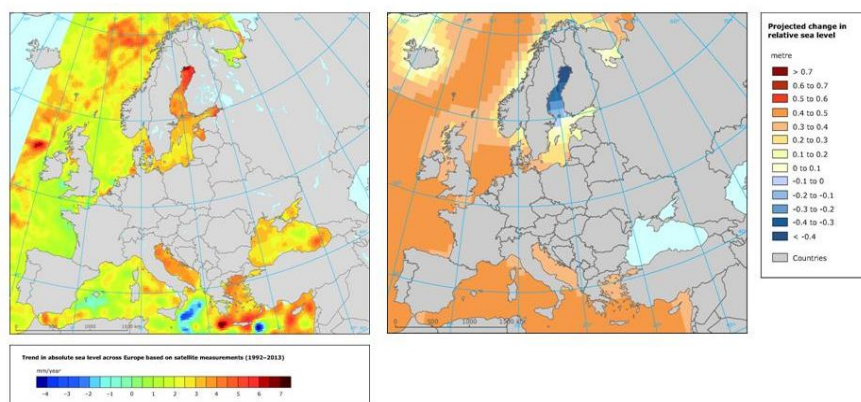


18. Au Royaume-Uni, l'élévation du niveau de la mer devrait être de 0,12-0,76 m (hors modification du niveau des terres émergées) au XXI^e siècle, en fonction du scénario d'émissions retenu ; des hausses plus importantes sont prévues en cas de fonte accrue de la banquise (Lowe *et al.*, 2009). Pour le 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. À partir de 12 modèles climatiques mondiaux et en se fondant sur trois scénarios d'émissions, Marcos et Tsimplis (2008) ont calculé qu'au XXI^e siècle, l'élévation du niveau de la mer sous l'effet du changement de température serait comprise entre 0,03 et 0,61 m en Méditerranée ; cette hausse s'accompagnerait d'une élévation liée à la salinité pouvant atteindre 0,31 m (voir aussi AEE, 2012).

Figure 29

Évolution du niveau absolu des mers en Europe, à partir de mesures effectuées par satellite (1992-2013) (AEE, 2014b)

(Projections du niveau relatif des mers en 2081-2100 par comparaison avec la période 1986-2005 selon le scénario RCP4.5 d'émissions moyennes à faibles (à partir d'un ensemble de modèles climatiques CMIP5). Aucune projection n'est disponible pour la mer Noire (AEE, 2014c)).



1.2.4 Phénomènes extrêmes

Vagues de chaleur

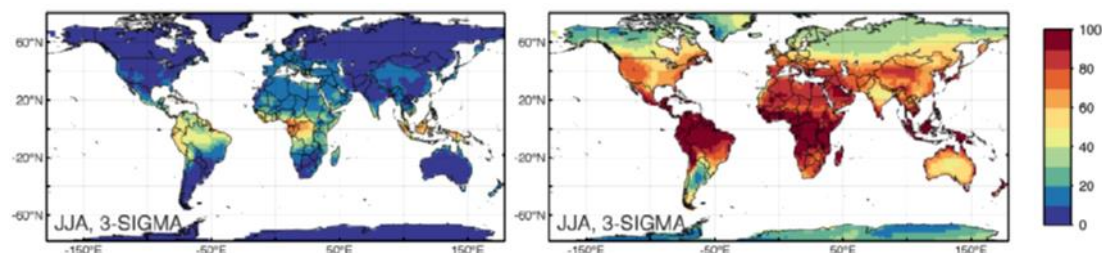
19. Il faut s'attendre, d'ici à la fin du XXI^e siècle, à une augmentation des températures extrêmement chaudes et à de moindres extrêmes de froid hivernal, sachant que la fréquence, la durée et l'ampleur de tels épisodes subiront l'influence du forçage anthropique (GIEC, 2013). Les journées chaudes devraient afficher des changements plus marqués dans les régions subtropicales et de latitude moyenne (fig. 30), tandis que la fréquence des journées froides diminuera dans toutes les régions. Les projections montrent que les étés très chauds seront à l'avenir nettement plus fréquents, dans tous les scénarios de changements climatiques.

20. Il est également probable que la fréquence et la durée des vagues de chaleur (périodes prolongées de chaleur excessive) augmenteront, principalement sous l'effet de la tendance à la hausse de la température saisonnière moyenne (fig. 31). Pour la plupart des terres émergées, on peut tabler sur une fréquence deux fois plus élevée des épisodes de canicule se produisant aujourd'hui tous les vingt ans (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 en Europe, avec des températures probablement élevées en été, surtout selon le scénario RCP8.5 (fig. 30).

Figure 30

Variations prévues des pics de chaleur saisonniers pour la période 2071-2100 selon les scénarios RCP 2.6 et 8.5

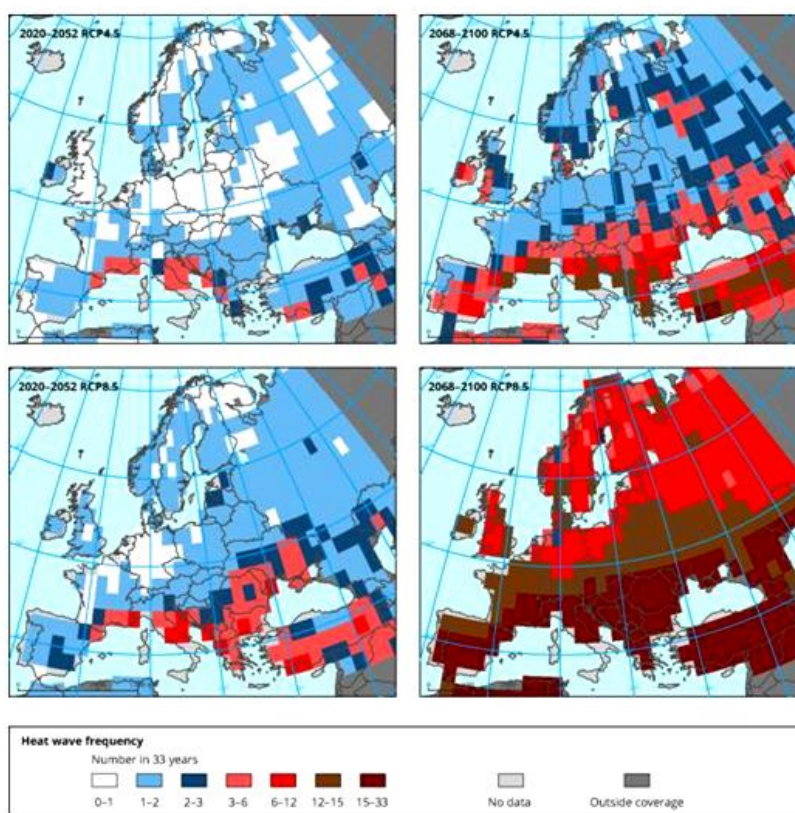
(Dans les régions en jaune/orange/rouge il faut s'attendre à (au moins) un été sur deux plus chaud que l'été le plus chaud de la période 1901-2100 (Coumou et Robinson, 2013)).



21. Une vague de chaleur aussi forte que celle de 2003 peut se produire approximativement une fois en l'espace d'un siècle dans les conditions climatiques actuelles ; au début du troisième millénaire, 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). De plus, des études récentes donnent à penser que la probabilité de voir revenir une vague de chaleur extrême comme celle qui a touché la Russie en 2010 pourrait être 5 à 10 fois supérieure d'ici à 2050 (Dole *et al.*, 2011).

Figure 31

Projection (valeur médiane) de la récurrence des 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)

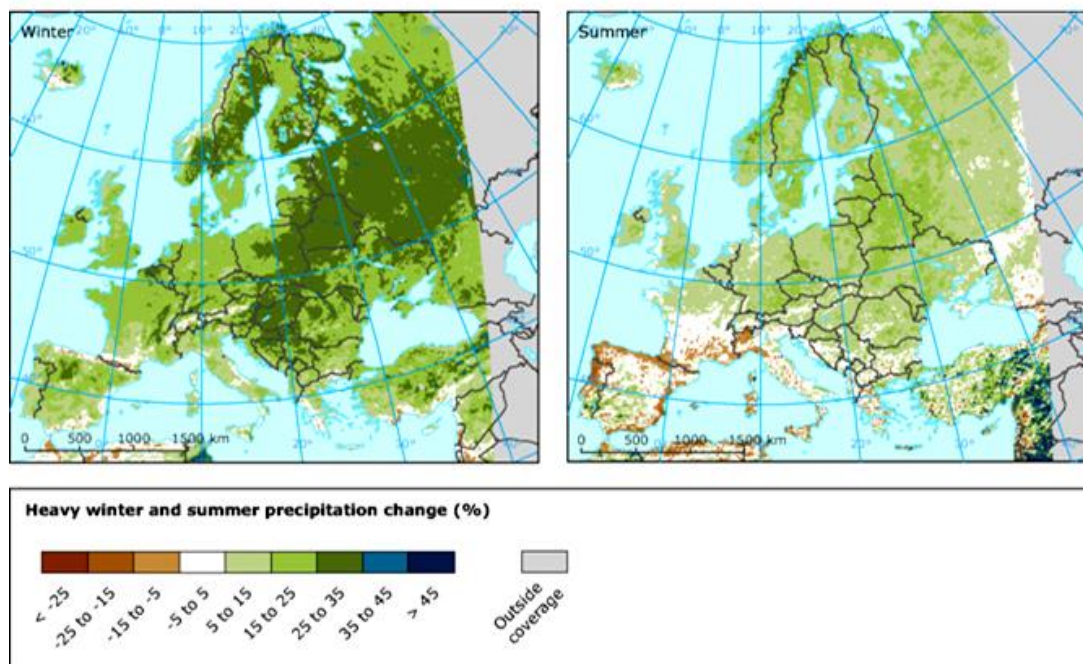


Précipitations

22. Les phénomènes extrêmes liés au cycle de l'eau, tels que les épisodes de sécheresse, les pluies diluviennes et les inondations, causent déjà des dégâts considérables. À mesure que la température augmentera, 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 des précipitations aux latitudes moyennes et hautes et à une moindre pluviométrie dans les régions subtropicales arides et semi-arides. Les épisodes de précipitations extrêmes seront probablement plus intenses sur la majeure partie des régions de moyenne latitude et des régions tropicales humides (GIEC, 2013). Pour l'Europe centrale et du Nord-Est, les projections laissent présager un net accroissement (25 %) des précipitations intenses d'ici à la fin du XXI^e siècle (fig. 32). Les modèles climatiques à haute résolution montrent que les fortes pluies d'été pourraient s'intensifier sous l'effet de l'évolution du climat (MetOffice, 2014). Pour le Royaume-Uni, 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 32

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 (MCG) (AEE, 2015c)



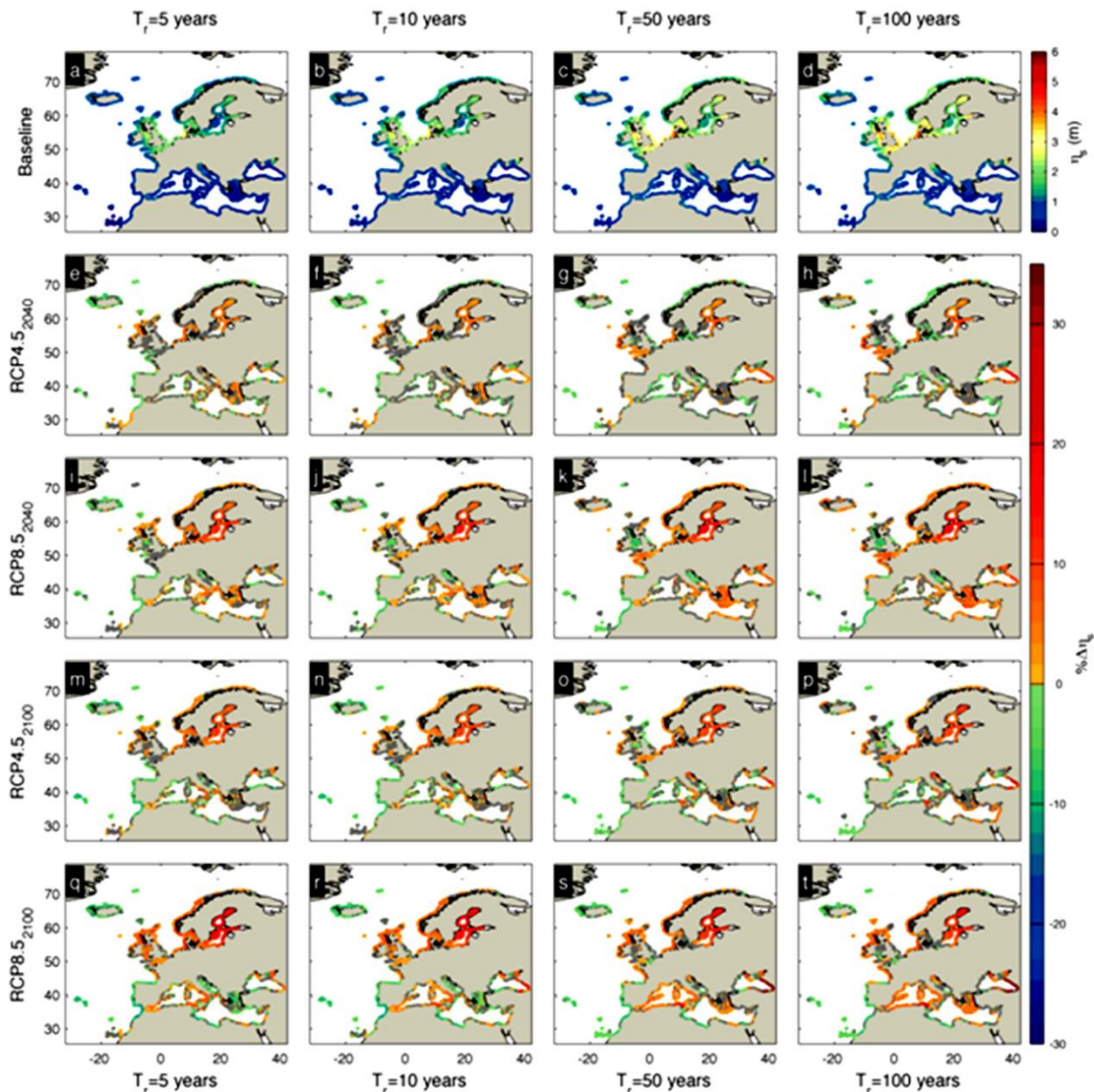
Tempêtes et crues

23. En dépit des nouveaux risques liés aux modifications des niveaux extrêmes des eaux côtières, les différents profils représentatifs d'évolution de concentration (RCP) ne fournissent guère d'informations sur les niveaux des ondes de tempête (GIEC 2013). Cela tient essentiellement au fait que la plupart des études antérieures ont été réalisées à l'échelle locale ou régionale. Autrement dit, a) il y a plusieurs régions pour lesquelles on ne dispose d'aucune information concernant l'élévation prévue du niveau des ondes de tempête, et b) compte tenu de l'utilisation de scénarios des émissions de gaz à effet de serre et de modèles climatiques et océaniques différents, et vu la diversité des milieux côtiers, il est difficile de tirer des conclusions générales à l'échelle mondiale ou régionale.

Figure 33

Moyenne d'ensemble des niveaux extrêmes des ondes de tempête (m) le long des côtes européennes pour des intervalles de récurrence de cinq, dix, cinquante et cent ans (correspondant aux différentes colonnes), pour la période de référence (a à d), et variations relatives de ces niveaux selon les scénarios RCP4.5 2040 (e à h), RCP8.5 2040 (i à l), RCP4.5 2100 (m à p) et RCP8.5 2100 (q à t) (correspondant aux différentes rangées)

(Les couleurs chaudes indiquent une augmentation, les couleurs froides une diminution ; les zones pour lesquelles les modèles divergent le plus sont indiquées dans des teintes de gris (Vousdoukas *et al.*, 2016a)).



24. En ce qui concerne l'Europe, les projections donnent des niveaux plus élevés d'ondes de tempête pour les côtes et les ports de l'Atlantique et de la Baltique dans tous les scénarios et les épisodes de violentes tempêtes considérés (Vousdoukas *et al.*, 2016a ; Vousdoukas *et al.*, 2017). La mer du Nord est un secteur où l'on observe quelques-uns des plus hauts niveaux d'ondes de tempête en Europe (fig. 33) et les projections 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. Les côtes atlantiques de la France, de l'Espagne et du Portugal sont elles aussi exposées à des vagues extrêmement puissantes (Pérez *et al.*, 2014). La mer Méditerranée a fait l'objet d'une étude portant sur la dynamique prévue des ondes de tempête, dont il ressort, à partir de tous les travaux fondés sur les scénarios SRES, que la fréquence et l'intensité des phénomènes extrêmes ne varieront sans doute pas et pourraient même décroître (Conte et Lionello,

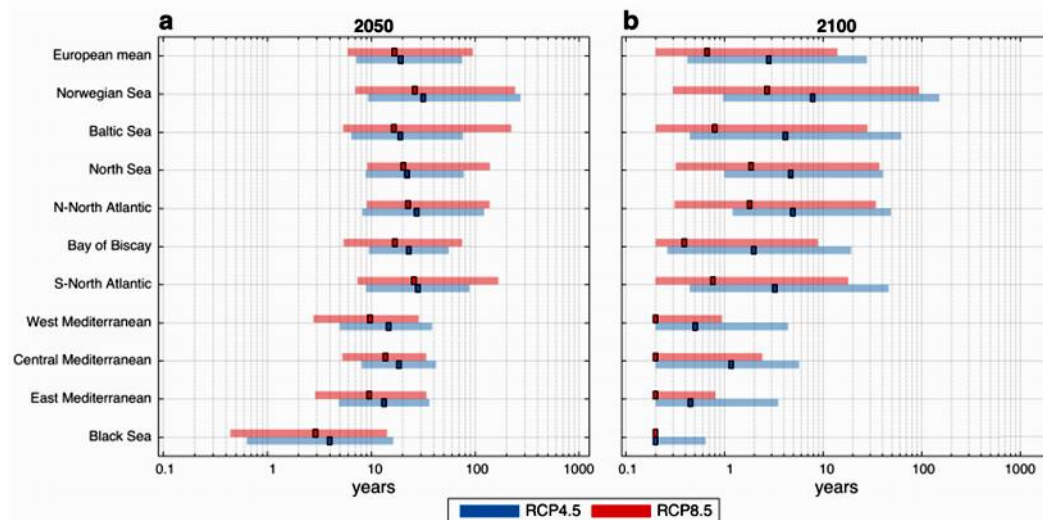
2013 ; Androulidakis *et al.*, 2015). Ce constat s'accorde avec les tendances historiques décrites (Menéndez et Woodworth, 2010) et avec des conclusions plus récentes, prévoyant essentiellement des variations – positives ou négatives – dans une fourchette de $\pm 5\%$ (Vousdoukas *et al.*, 2016a). Le nord de l'Adriatique est une région qui a été étudiée de façon plus approfondie en raison de la forte vulnérabilité (et de l'importance socioéconomique) de la région de Venise, pour laquelle les projections ne font apparaître aucun changement statistiquement significatif, si ce n'est une diminution (Mel *et al.*, 2013), même si les projections de Lionello *et al.* (2012) laissent entrevoir une augmentation de la fréquence de phénomènes extrêmes dans les environs de Venise d'après le scénario SRES B2.

25. Il est à noter que plus de 200 millions de personnes dans le monde vivent le long de côtes d'une hauteur inférieure à 5 m au-dessus du niveau de la mer ; 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 des mers due aux changements climatiques et, dans certaines régions, l'affaissement sensible du littoral dû au drainage des eaux côtières et au pompage des eaux souterraines aggraveront à des degrés divers le risque d'inondation. Une élévation d'un mètre du niveau marin relatif multiplie, par exemple, par 40 la fréquence des épisodes d'inondation centennale à Shanghai, par 200 à New York et par 1 000 à Kolkata (OMM, 2014).

Figure 34

Intervalle de récurrence des hausses centennales actuelles du niveau des mers selon les scénarios RCP4.5 et RCP8.5 en a) 2050 et b) 2100. Les cellules de couleur foncée correspondent à la valeur d'ensemble moyenne et les barres colorées à la variabilité entre les modèles (meilleure-pire hypothèse).

(Les valeurs indiquées sont des moyennes calculées pour le littoral européen et pour les côtes de 10 zones géographiques (Vousdoukas *et al.*, 2017)).

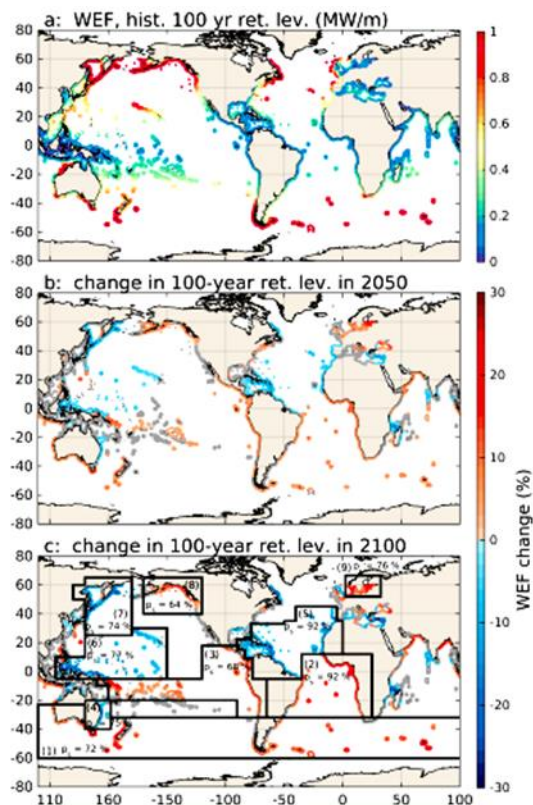


26. Selon Hallegatte *et al.* (2013), les 136 plus grandes villes côtières risquent, d'ici une cinquantaine d'années, d'être exposées aux menaces suivantes : i) le montant des dommages pourrait passer de 6 à 52 milliards de dollars des États-Unis par an rien que du fait de l'accumulation d'habitants et de biens ; ii) les pertes annuelles pourraient avoisiner 1 000 milliards de dollars par an, à moins que les dispositifs de protection contre les inondations ne soient renforcés ; iii) même en cas de renforcement de ces dispositifs, les pertes pourraient s'accroître à mesure que les épisodes d'inondation s'intensifient en raison de l'augmentation des hauteurs d'eau faisant suite à l'élévation du niveau marin relatif. Cela pose la question de savoir s'il y a des seuils au-delà desquels les tendances actuelles et projetées en matière de croissance des populations côtières pourraient s'inverser (King *et al.*, 2015). Compte tenu des normes applicables aux défenses côtières et des incertitudes quant au degré de probabilité d'une défaillance de ces ouvrages, environ 5 millions de personnes en Europe pourraient être touchées par une élévation extrême – aujourd'hui centennale – du niveau de la mer (Vousdoukas *et al.*, 2016b).

Figure 35

Projections des flux d'énergie liés à la houle le long des côtes dans le monde :
a) niveau de référence dans l'hypothèse d'une récurrence centennale ;
b) variation relative du flux centennal pour 2050 ; et c) variation relative
du flux centennal pour 2100

(Les points en gris correspondent à des endroits où il n'y a pas de changement significatif. Sur le schéma c), les zones de changement significatif sont signalées avec le pourcentage d'augmentation. 1) Zone tempérée sud, 2) Atlantique sud, 3) Pacifique est subéquatorial-tropical, 4) Est de l'Australie, 5) Atlantique nord tropical, 6) Pacifique tropical nord-ouest, 7) Pacifique nord-ouest, 8) Pacifique nord-est et 9) Mer Baltique (Mentaschi *et al.*, 2017)).

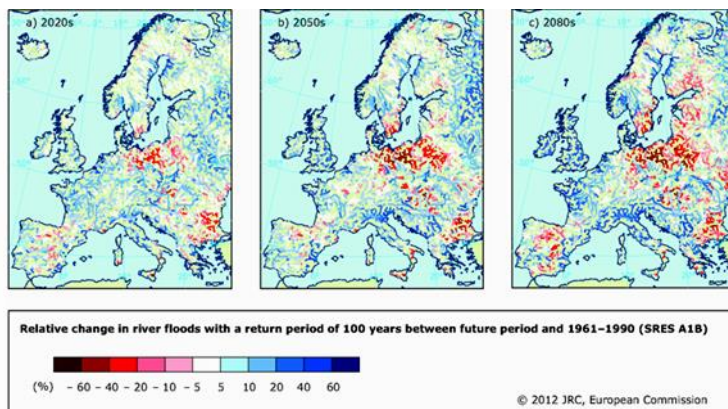


27. Ainsi qu'il ressort de projections des valeurs moyennes pour les côtes européennes, l'élévation extrême du niveau de la mer³ de fréquence centennale dans les conditions actuelles se produirait, d'ici à 2050, tous les onze ans environ et, d'ici à 2100, tous les trois ans selon le scénario RCP4.5 et tous les ans selon le scénario RCP8.5 (fig. 34). Les 5 millions d'Européens actuellement exposés une fois tous les cent ans à ce risque pourraient donc se trouver inondés quasiment chaque année d'ici à la fin du siècle (Vousdoukas *et al.*, 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.

28. Pour la fin du XXI^e siècle, les résultats récents de travaux de modélisation dans le cadre d'un scénario de fortes émissions (RCP8.5) laissent entrevoir une augmentation significative allant jusqu'à 30 % des flux d'énergie liés à la houle pour un intervalle de récurrence de cent ans dans la majorité 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 (fig. 35) qui pourraient connaître des hausses allant jusqu'à 30 %.

³ L'élévation extrême du niveau de la mer est la combinaison du niveau moyen de la mer, de la marée, du niveau de l'onde de tempête et de la configuration de la houle (Losada *et al.*, 2013).

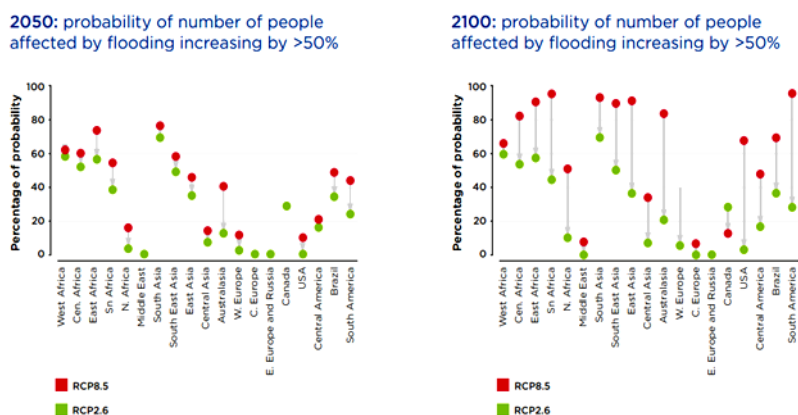
Figure 36
Évolution relative du débit fluvial minimal à compter de a) 2020, b) 2050 et c) 2080, par comparaison avec la période 1961-1990 dans le cadre du scénario SRES A1B (AEE, 2012)



29. Les crues constituent également une menace importante pour la population mondiale, l'augmentation observée des écoulements extrêmes étant bien documentée (Feyen *et al.*, 2010). L'ampleur des dommages sera pour l'essentiel imputable à l'exposition des populations et des infrastructures, qui ne cesse de croître dans les zones inondables (GIEC, 2013). La figure 36 présente les changements auxquels l'Europe doit s'attendre en matière d'inondations fluviales.

30. La figure 37 montre, région par région, une augmentation de plus de 50 % du risque d'inondation dû aux changements climatiques pour les populations aujourd'hui exposées à un risque de crue trentenaire, par comparaison avec la situation qui prévaudrait sans changements climatiques. D'ici aux années 2050, il existe un risque d'au moins 50 % de voir les changements climatiques à eux seuls accroître 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 (King *et al.*, 2015). 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, à savoir de cinq à six fois en l'espace d'un siècle pour le profil d'évolution à fortes émissions RCP8.5, en raison essentiellement d'une augmentation en Asie du Sud, du Sud-Est et de l'Est (King *et al.*, 2015). Concernant la région de la CEE, l'impact des crues en 2050 devrait être moindre que dans d'autres régions ; il est néanmoins à prévoir que la situation se dégrade nettement d'ici à 2100 pour certaines zones (fig. 37).

Figure 37
Probabilité, selon deux scénarios RCP, que les changements climatiques accroissent de plus de 50 % le nombre de personnes touchées par la crue trentenaire, par comparaison avec la situation hors changements climatiques. Cette simulation se fonde sur l'hypothèse d'une croissance démographique moyenne (King *et al.*, 2015)



1.3 Conséquences pour les transports : un bref aperçu

31. S'agissant du degré de sensibilité des réseaux de transport à la variabilité du climat et aux changements climatiques, une récente étude (CEE, 2013) a mis en évidence ce qui suit : a) les éléments d'infrastructure sont plus sensibles à des phénomènes météorologiques extrêmes, tels que des ondes de tempête, de fortes précipitations, des vagues de chaleur et les vents violents, qu'à des changements progressifs des variables climatiques moyennes ; b) l'entretien, l'acheminement des voyageurs et des marchandises et la sécurité sont généralement plus vulnérables au forçage climatique que le matériel, car les seuils au-delà desquels les services de transport devront par exemple être retardés ou annulés sont le plus souvent inférieurs à ceux qui s'appliquent en cas de dommages causés à l'infrastructure ; et c) les moyens de transport sont sensibles à des facteurs de stress dont l'incidence est relativement rare par rapport aux variations météorologiques habituelles. Par exemple, la superstructure des ponts situés le long du golfe du Mexique aux États-Unis s'est révélée vulnérable à l'assaut direct des vagues dû à l'élévation sans précédent du niveau de la mer correspondant à l'onde de tempête de l'ouragan Katrina (2015) (USDOT, 2012).

32. Les phénomènes hydrométéorologiques extrêmes (fortes pluies, inondations, sécheresse, etc.) causent déjà des dommages considérables aux infrastructures et aux services de transport. Des variations des précipitations extrêmes susceptibles d'entraîner des crues risquent d'être particulièrement coûteuses pour les réseaux de transport intérieur (Hooper et Chapman, 2012), étant donné que d'importantes routes et voies ferrées se trouvent dans des plaines inondables ou les traversent ; elles peuvent aussi avoir de lourdes conséquences pour les gares routières, les terminaux ferroviaires et les opérations de transport par voies navigables intérieures. Il peut y avoir des dommages directs pendant et aussitôt après de fortes précipitations, ce qui nécessite une intervention d'urgence ainsi que des mesures pour soutenir l'ensemble de la structure et l'entretien des routes, des ponts, des systèmes de drainage et des tunnels (USDOT, 2012).

33. Les réseaux routier et ferroviaire seront probablement exposés à d'importants risques d'inondation et d'affouillement des ponts, tandis que l'accroissement des fortes précipitations et des inondations provoquera aussi une augmentation du nombre des accidents de la route liés aux intempéries (en raison des dommages occasionnés aux véhicules et à la voirie et de la visibilité réduite), des retards et des perturbations de la circulation (par exemple Hambly *et al.*, 2012). Les réseaux routiers risquent d'être gravement touchés par la multiplication prévue des précipitations abondantes et des inondations qui auront des effets divers sur les différents types de bitume, d'asphalte et de béton, nécessitant des opérations d'entretien particulières telles que la construction de réseaux d'évacuation adaptés et l'utilisation d'enrobé drainant ou de bitume modifié aux polymères (par exemple Willway *et al.*, 2008). Les régions déjà sujettes aux inondations seront aux prises avec des problèmes plus fréquents et encore plus préoccupants. La stagnation de l'eau pourrait avoir des conséquences graves et onéreuses ; les dommages engendrés par la longue immersion de la chaussée en Louisiane ont par exemple été estimés à 50 millions de dollars pour plus de 300 kilomètres d'autoroute (Karl *et al.*, 2009). Aux États-Unis, les coûts d'adaptation des ponts (routiers et ferroviaires) vulnérables aux crues se situent, selon des estimations, entre 140 et 250 milliards de dollars sur la durée du XXI^e siècle (Wright *et al.*, 2012). Pour les 27 États de l'Union européenne, les coûts seraient moindres : les mesures de protection des ponts contre les inondations pourraient coûter jusqu'à 540 millions d'euros par an (Commission européenne, 2012 ; CEE, 2015).

34. L'infrastructure ferroviaire pourrait aussi être lourdement touchée, qu'il s'agisse des dégâts causés aux voies et au matériel le long des voies, de l'affouillement au niveau des ponts et des berges dû à la montée des cours d'eau et au ravinement, des glissements de terrain, ou de problèmes liés à la sécurité du personnel et à l'accès au parc de matériel roulant et aux dépôts d'entretien. Au Royaume-Uni, les coûts de très fortes précipitations, des inondations et d'autres phénomènes extrêmes, que l'on estime déjà à 50 millions de livres sterling par an, pourraient atteindre 500 millions de livres par an d'ici aux années 2040 (Rona, 2011). Les vents extrêmement violents devraient également se révéler plus catastrophiques à l'avenir (Rahmstorf, 2012), en particulier dans les zones côtières où ils peuvent entraîner la submersion des ouvrages de défense et l'inondation des voies ferrées

du littoral et des estuaires. Ils pourraient aussi entraîner des défaillances de l'infrastructure et des interruptions de service en raison des débris emportés par le vent (voir notamment AIPCR, 2012 ; CEE, 2013 ; 2015).

35. La fréquence accrue des vagues de chaleur que laissent entrevoir les projections peut également susciter d'importantes difficultés en matière d'exploitation et de service pour les chemins de fer et les routes (ainsi que les aéroports), en raison de déformations des rails et des chaussées et des réductions nécessaires de la charge utile des aéronefs. Le nombre de journées affichant des températures supérieures à 38 °C devrait augmenter (Vogel *et al.*, 2017), ce qui peut entraîner des défaillances supplémentaires de l'infrastructure routière. Des étés plus secs et plus chauds contribueront à dégrader ou affaiblir la chaussée, nuisant à ses performances et à sa résilience (AIPCR, 2012). Ainsi qu'il ressort de prévisions établies à l'aide de modèles (Commission européenne, 2012), les coûts annuels supplémentaires liés à la fabrication de nouveaux liants bitumineux pour l'Europe des 27 dans le scénario SRES A1B⁴ seraient compris entre 38,5 et 135 millions d'euros par an à l'horizon 2040-2070 et entre 65 et 210 millions d'euros par an à l'horizon 2070-2100. Il convient néanmoins de noter que le revêtement routier est généralement remplacé tous les vingt ans et que les changements climatiques pourraient donc être pris en compte au moment de la réfection.

36. Le réchauffement de la zone arctique pourrait allonger la saison de navigation dans l'Arctique et faire apparaître de nouvelles voies de navigation. Il pourrait y avoir de nouveaux débouchés économiques pour les collectivités des régions arctiques, car la réduction de l'étendue des glaces facilite l'accès aux importants gisements d'hydrocarbures (en mer de Beaufort et en mer des Tchouktsches) et le commerce international. En même temps, le réchauffement de l'Arctique entraînera : a) une érosion côtière plus marquée en raison de l'activité accrue des vagues sur les côtes polaires du Canada, de la Fédération de Russie et des États-Unis (voir notamment Lantuit et Pollard, 2008) ; et b) une augmentation des coûts d'aménagement et d'entretien de l'infrastructure de transport en raison de la fonte du pergélisol (CEE, 2015). Le dégel du permafrost (voir notamment Streletskiy *et al.*, 2012) pose de graves problèmes pour les transports, comme l'affaissement ou le soulèvement des routes par le gel qui peuvent nuire à leur structure et à leur capacité de supporter les charges transportées (CEE, 2013). Dans les régions arctiques, de nombreuses routes sont construites sur un pergélisol déjà discontinu et fragmentaire, d'où des coûts d'entretien non négligeables et des restrictions d'utilisation (Karl *et al.*, 2009). Il est à prévoir que de telles perturbations augmenteront considérablement à mesure que le dégel du pergélisol gagnera en superficie et en profondeur (AEE, 2015a).

37. Les voies navigables peuvent elles aussi être touchées tant par des crues que par la sécheresse. Parmi les principaux effets des inondations, il convient de mentionner la suspension de la navigation, l'envasement, des changements dans la morphologie des cours d'eau et les dommages occasionnés aux berges et aux dispositifs de protection contre les crues (CEE, 2013). De même, les voies navigables intérieures peuvent pâtir de niveaux d'étiage bas en cas de sécheresse. De récents travaux de recherche⁵ comportant une étude de cas consacrée au couloir Rhin-Main-Danube ont montré que, sur une période de vingt ans, les pertes annuelles moyennes dues à de faibles niveaux d'étiage étaient de l'ordre de 28 millions d'euros (voir aussi Jonkeren *et al.*, 2007). Cependant, les projections de différents modèles climatiques ne font pas apparaître d'effets significatifs des conditions de faible débit dans ce couloir avant 2050 ; les années « sèches » peuvent néanmoins majorer de 6 à 7 % le coût total des transports par rapport aux années « humides ».

38. Les effets de la variabilité du climat et des changements climatiques sur les systèmes de transport européens ont été étudiés dans le cadre de deux récents projets de l'Union européenne⁶. Tous deux ont montré qu'il n'y avait guère d'informations fiables sur la vulnérabilité des différents modes de transport. Les coûts directs supportés par le secteur des transports (réparation/entretien des infrastructures, dommages causés aux véhicules,

⁴ Ce scénario équivaut *grosso modo* au scénario RCP6.0 du cinquième rapport d'évaluation du GIEC.

⁵ Projet FP7-ECCONET de l'Union européenne, www.tmluven.be/project/econet/home.htm.

⁶ Projets FP7 WEATHER www.weather-project.eu et EWENT (www.weather-project.eu/weather/inhalte/research-network/ewent.php) de l'UE.

augmentation des coûts d'exploitation, etc.) ont été estimés pour la période 1998-2010 à 2,5 milliards d'euros par an et les coûts indirects liés aux perturbations des transports à 1 milliard d'euros par an. Le rail a été le mode de transport le plus touché, avec des « points chauds » en Europe orientale et en Scandinavie, alors que les effets sur les routes (accidents de la circulation liés aux conditions météorologiques, principalement) semblent avoir été plus largement répartis.

39. L'infrastructure de transport des zones côtières (routes, voies ferrées, ports maritimes et aéroports) sera touchée dans une mesure disproportionnée par la variabilité et les changements climatiques car il lui faudra, en sus des problèmes décrits ci-dessus, s'adapter à l'augmentation des épisodes d'invasion par l'eau de mer. Dans la région de la CEE, la montée du niveau moyen de la mer et la fréquence accrue des ondes de tempête, en particulier le long de l'Europe du Nord-Ouest, de la mer Baltique et de la côte pacifique nord-est des États-Unis et du Canada (Vousdoukas *et al.*, 2016a ; Mentaschi *et al.*, 2017), peuvent avoir un impact majeur, en inondant par exemple les routes, les voies ferrées et les tunnels dans les zones côtières. Ces inondations peuvent, tant qu'elles durent, rendre les systèmes de transport inutilisables et endommager les terminaux, les installations de transport intermodal, les plateformes logistiques, les zones de stockage et les marchandises, perturbant ainsi pour un temps relativement long les chaînes d'approvisionnement (CEE, 2013 ; 2015). Dans une étude de Perherin *et al.* (2010), il a été estimé qu'une élévation d'un mètre du niveau de la mer au-dessus de la hauteur d'inondation d'une tempête centennale⁷ entraînerait des dégâts et des frais de réparation (hors dépenses de fonctionnement et de desserte) pouvant atteindre 2 milliards d'euros pour les routes principales de France métropolitaine. Une autre étude (Commission européenne, 2012) a fourni une première estimation des risques liés à une hausse du niveau moyen de la mer et d'ondes de tempête sur l'infrastructure des transports côtiers en Europe en effectuant une comparaison entre la hauteur des infrastructures côtières, une élévation du niveau de la mer d'un mètre et la hauteur de l'onde de tempête centennale. Cette étude a montré que 4,1 % des infrastructures de transport du littoral (routes côtières), d'une valeur d'environ 18,5 milliards d'euros, étaient exposées à un risque. Cela étant, à mesure que des projections plus détaillées des valeurs extrêmes des niveaux marins et de l'énergie de la houle le long du littoral deviennent disponibles (Vousdoukas *et al.*, 2016b ; 2017 ; Mentaschi *et al.*, 2017) pour la région de la CEE (et au-delà), il sera utile d'évaluer à nouveau l'impact éventuel des inondations sur l'infrastructure de transport de la CEE selon différents scénarios de variabilité et de changements climatiques.

40. Enfin, les transports étant une activité conditionnée par la demande, la variabilité et les changements climatiques peuvent avoir des effets considérables dans la quasi-totalité des secteurs de l'économie et, du même coup, influencer indirectement sur les services de transport, par exemple par des fluctuations de la demande de matières premières et des transports touristiques (CEE, 2015).

1.4 Résumé

41. La présente section passe en revue les tendances récentes et à long terme 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 dans différents scénarios d'émissions. Les principales constatations sont récapitulées ci-dessous.

Tendances

42. Les preuves d'un réchauffement de la planète depuis le XIX^e siècle abondent, comme l'attestent les observations scientifiques effectuées depuis la haute atmosphère jusqu'aux grands fonds marins. La température moyenne de la planète a augmenté en surface de 1,1 °C depuis la fin du XIX^e siècle, les six dernières années (2011-2016) étant la période la plus chaude jamais enregistrée. L'année 2016 est aussi la plus chaude qui ait jamais été enregistrée (1,1 °C au-dessus de la moyenne de 14 °C calculée pour la période

⁷ L'hypothèse retenue dans l'étude est celle d'un coût moyen linéaire de 10 millions d'euros par kilomètre de chaussée et de frais de réparation d'environ 250 000 euros par kilomètre.

1901-2000). Dans la région de la CEE, les températures ont été supérieures de 1 °C à la moyenne de 1961-1990 dans la majeure partie de l'Europe, le nord de l'Asie et le sud-ouest des États-Unis, et supérieures de 3 °C à la normale dans certaines parties de l'Arctique russe. Le contenu thermique intégré des océans enregistré dans la couche 0-700 m a été supérieur à celui de toute autre période et les températures à la surface de la mer ont été supérieures à la moyenne dans la plupart des océans. Les éléments disponibles donnent à penser 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.

43. Les données relatives aux précipitations sur les terres émergées révèlent une tendance à l'accroissement des quantités mesurées au XX^e siècle, surtout à des latitudes moyennes à hautes, et une forte variabilité régionale qui, dans bien des cas, semble être influencée par d'importantes modulations climatiques telles que les épisodes ENSO (oscillation australe El Niño) et NAO (oscillation nord-atlantique). Au cours de la période la plus récente (2011-2016), les précipitations sur la terre ferme ont été grandement influencées par le phénomène ENSO, c'est-à-dire des conditions La Niña en 2011-2012 et le fort épisode El Niño de 2015-2016. En 2016, les précipitations ont dépassé le 90^e centile dans une vaste zone s'étendant du Kazakhstan à la Russie occidentale et jusqu'en Norvège en passant par la Finlande et le nord de la Suède ; en même temps, 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.

44. Les épisodes de fortes précipitations ont augmenté (en intensité et/ou en fréquence) dans de nombreuses parties de la région de la CEE. L'une des tendances les plus manifestes semble être la fréquence ou l'intensité croissante des pluies torrentielles dans des zones où il y a déjà un risque élevé de crues (de type centennal), en particulier en Europe centrale et orientale, en Asie centrale et dans les grands bassins versants sud-nord de Sibérie. Par conséquent, les dégâts dus aux crues devraient considérablement s'accroître d'ici à la fin du siècle, en étant généralement plus importants dans le nord que dans le sud. Certains éléments donnent à penser que la fréquence et l'intensité des vagues de chaleur, ainsi que des épisodes de sécheresse, augmenteront également (en Méditerranée, par exemple).

45. Depuis quelques décennies, l'étendue et la persistance du manteau neigeux tendent à décroître dans la région arctique. Le manteau neigeux a reculé (en juin) de 11,7 % par décennie sur la période 1967-2012. Cette tendance n'est cependant pas uniforme ; certaines régions (Alpes et Scandinavie, par exemple) font apparaître une diminution de la hauteur de la couverture neigeuse à basse altitude, mais une augmentation à haute altitude, tandis que l'on ne constate aucune tendance cohérente dans d'autres régions (Carpatés, Pyrénées et Caucase, par exemple). Le nombre de jours de gel a diminué à moyenne altitude. La banquise arctique a continué de se rétrécir fortement. En 2016, l'étendue des glaces de mer a été bien inférieure à la normale, affichant des niveaux historiquement bas sur une grande partie de l'année ; le maximum saisonnier de mars, de 14,52 millions de km², a été le plus faible qui ait été observé par satellite depuis 1979. Les glaciers de montagne ont eux aussi continué de reculer. L'étendue du pergélisol ne cesse en outre de diminuer ; on a récemment observé un réchauffement jusqu'à une profondeur de 20 m dans les zones de pergélisol de l'Arctique.

46. Depuis 1860, le niveau des mers a augmenté d'environ 0,20 m, à un rythme devenant progressivement plus rapide, en particulier depuis les années 1990. La tendance qui ressort des relevés satellitaires (1993-2015) correspond à une élévation du niveau marin de 3-3,2 mm an⁻¹, nettement supérieure à la moyenne de 1900-2010 (1,7 mm an⁻¹).

47. Les phénomènes hydrométéorologiques extrêmes (vagues de chaleur ou de froid, cyclones tropicaux, inondations, sécheresse, violentes tempêtes, etc.) occasionnant des pertes et des dommages considérables semblent également s'accroître ; le bilan humain n'a heureusement pas suivi la tendance nettement ascendante des préjudices économiques associés à ces phénomènes.

Projections

48. Les récentes projections relatives aux facteurs climatiques qui pourraient peser sur l'infrastructure et le fonctionnement des transports sont présentées ci-dessous. Globalement, les problèmes que certains de ces facteurs posent déjà aux infrastructures de transport s'accroîtront sensiblement.

49. D'ici à la fin du XXI^e siècle, la température moyenne de l'air devrait, en fonction du scénario RCP retenu, augmenter dans une fourchette de 1,0 °C à 3,7 °C au-dessus de la température moyenne de la période 1986-2005. Les océans se réchaufferont selon tous les scénarios, les plus fortes hausses des températures à la surface de la mer étant attendues dans les régions subtropicales et tropicales. Il devrait y avoir, d'ici à la fin de ce siècle, une hausse des températures extrêmement chaudes et de moindres extrêmes de froid, en particulier dans les régions de moyenne latitude. Les maxima de température (TX_x) varieront beaucoup d'une région à l'autre ; ils pourraient augmenter en Europe centrale, dans la partie centrale de l'Amérique du Nord et dans le nord de l'Australie. La fréquence et la durée des vagues de chaleur devraient augmenter pour bon nombre de régions (et en Europe), surtout dans les scénarios à fortes émissions. Pour la plupart des terres émergées, il est considéré comme probable que les épisodes de canicule se produisant aujourd'hui tous les vingt ans deviendront deux fois plus fréquents ; certaines régions pourraient même y être exposées tous les ans ou tous les deux ans. Parallèlement, les épisodes de grand froid revenant actuellement tous les vingt ans devraient sensiblement se raréfier à l'avenir.

50. À mesure que la température augmentera, les précipitations moyennes afficheront d'importantes variations spatiales. On peut s'attendre sur les terres émergées à une augmentation des précipitations aux latitudes moyennes et hautes et à une moindre pluviométrie dans les régions subtropicales arides et semi-arides. Les épisodes de précipitations extrêmes seront probablement plus intenses sur la majeure partie des régions de latitude moyenne et des régions tropicales humides. Pour l'Europe centrale et du Nord-Est, les projections laissent présager un net accroissement (25 %) des précipitations intenses d'ici à la fin du siècle. En même temps, la majeure partie de la région sud-ouest de l'Amérique du Nord connaîtra 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 épisodes de sécheresse devraient diminuer en Europe méridionale et dans la Méditerranée, en Europe centrale et dans d'autres parties de l'Amérique du Nord.

51. On prévoit une augmentation des averses de neige et de pluie dans les régions arctiques, principalement en hiver. Cependant, même si l'épaisseur maximale du manteau neigeux en hiver va sans doute s'accroître (en particulier en Sibérie), sa fonte précoce entraînera une diminution considérable (allant jusqu'à 25 %) de la couverture neigeuse de printemps dans l'hémisphère Nord. Dans le cas des glaciers de montagne et des calottes glaciaires, les projections font apparaître une réduction de 10 à 30 % de leur masse d'ici à la fin du siècle. Les modèles prévoient aussi un dégel accéléré du pergélisol dû à la hausse des températures mondiales et aux variations du manteau neigeux. La surface du pergélisol en Europe se réchauffe actuellement de 0,04 à 0,07 °C an⁻¹ et, en dépit des difficultés qu'il y a à évaluer de tels changements, sa superficie devrait (degré de confiance moyen) diminuer de 37 % selon le scénario RCP2.6 et de 81 % selon le scénario RCP8.5 d'ici à 2100.

52. Il est également probable que les glaces de mer de l'Arctique continueront de diminuer en étendue et en épaisseur, encore qu'il faille s'attendre à une variabilité considérable d'une année sur l'autre. Les projections concernant l'étendue de la calotte glaciaire arctique laissent entrevoir sur la période 2081-2100 (par comparaison avec les valeurs moyennes de la période 1986-2005) des réductions de l'ordre de 8 à 34 % (en février) et de 43 à 94 % (en septembre) pour les scénarios RCP2.6 et RCP8.5. Une telle évolution pourrait ouvrir dans l'Arctique des voies maritimes majeures, ce qui ne va toutefois pas sans poser des risques pour l'environnement et des problèmes d'aménagement, comme ceux que le dégel prévu du pergélisol pose pour la mise en place ou l'entretien de l'infrastructure côtière et terrestre de transport nécessaire pour desservir ces itinéraires.

53. De plus, l'infrastructure de transport des zones côtières de la CEE va sans doute être exposée à des risques accrus liés à la variabilité du climat et aux changements climatiques. L'élévation du niveau de la mer pour la région de la CEE dépend du scénario d'émissions, de plus fortes hausses étant prévues en cas de fonte supplémentaire des calottes glaciaires. La montée des niveaux marins serait en moyenne de l'ordre de 0,40 à 1,05 m pour le littoral de la mer du Nord, par exemple, l'élévation étant légèrement inférieure pour la côte méditerranéenne. Un rehaussement des ondes de tempête est à prévoir pour les côtes (et les ports) de l'Atlantique, de la mer du Nord et de la Baltique dans tous les scénarios et les phénomènes extrêmes de tempête. Cependant, les projections sont plus favorables pour l'Europe méridionale, les variations prévues des niveaux des ondes de tempête s'inscrivant pour l'essentiel dans une fourchette de $\pm 5\%$.

54. De récents travaux de recherche laissent entrevoir une tendance négative dans les flux d'énergie liés à la houle (pour un intervalle de récurrence de cent ans) dans les zones côtières de la CEE, à l'exception des côtes du Pacifique nord-est et de la mer Baltique qui devraient connaître des hausses allant jusqu'à 30%. Concernant les niveaux marins extrêmes et compte tenu de la présence de défenses côtières, des normes applicables en la matière et des incertitudes quant au degré de probabilité d'une défaillance de ces ouvrages, environ 5 millions de personnes en Europe pourraient être touchées par une élévation extrême – aujourd'hui centennale – du niveau de la mer. Ainsi qu'il ressort de projections des valeurs moyennes pour les côtes européennes, il est prévu qu'un tel phénomène se produise tous les onze ans environ d'ici à 2050 et tous les un à trois ans d'ici à 2100 (scénarios RCP4.5 et RCP8.5). Les millions d'Européens actuellement exposés une fois tous les cent ans à ce risque pourraient donc se trouver inondés quasiment chaque année d'ici à la fin du siècle. Certaines régions devraient même connaître une fréquence accrue des phénomènes extrêmes, notamment le long de la Méditerranée et de la mer Noire, où l'on prévoit qu'ils se produiront encore plus souvent. Il semble nécessaire de procéder d'urgence à une évaluation plus détaillée des effets de tels phénomènes sur l'infrastructure côtière des transports (et sur les chaînes logistiques connexes).

III. Bibliographie

- AEE, 2010. The European environment: State and outlook 2010, Adapting to climate change. Agence européenne pour l'environnement, Copenhague (ISBN 978-92-9213-159-3).
- AEE, 2012. Climate change, impacts and vulnerability in Europe 2012. An indicator-based report. Agence européenne pour l'environnement (AEE), Copenhague, Danemark, 300 pages (ISBN 978-92-9213-346-7).
- AEE, 2014a. Projected changes in annual, summer and winter temperature. [Carte cliquable]. Agence européenne pour l'environnement (AEE). Accessible à l'adresse : www.eea.europa.eu/data-and-maps/figures/projected-changes-in-annual-summer-1 [Consulté le 01/03/2016].
- AEE, 2014b. Trend in absolute sea level in European Seas based on satellite measurements (1992-2013). [Carte cliquable]. Agence européenne pour l'environnement (AEE). Accessible à l'adresse : www.eea.europa.eu/data-and-maps/figures/sea-level-changes-in-europe-october-1992-may-1 [Consulté le 01/03/2016].
- AEE, 2014c. Projected change in relative sea level. [Carte cliquable]. Agence européenne pour l'environnement (AEE). Accessible à l'adresse : www.eea.europa.eu/data-and-maps/figures/projected-change-in-sea-level [Consulté le 01/03/2016].
- AEE, 2015a. Global megatrends assessment: Extended background analysis complementing the SOER 2015 « Assessment of global megatrends ». Agence européenne pour l'environnement, Copenhague (ISSN 1725-2237).
- AEE, 2015b. Number of extreme heat waves in future climates under two different climate forcing scenarios. Accessible à l'adresse : www.eea.europa.eu/data-and-maps/figures/number-of-extreme-heat-waves [Consulté le 13/07/2015].

- AEE, 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). Accessible à l'adresse : www.eea.europa.eu/data-and-maps/figures/projected-changes-in-20-year-2 (consulté le 21/03/2016).
- AIPCR, 2012. Prendre en compte les effets du changement climatique sur les chaussées routières. Association mondiale de la route, Comité technique D.2 Chaussées routières, 151 pages (ISBN : 2-84060-248-2).
- AMAP, 2012. Arctic Climate Issues 2011 : Changes in Arctic Snow, Water, Ice and Permafrost. SWIPA 2011. Rapport d'ensemble.
- Alfieri, L., Feyen, L., Dottori, F. et 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).
- Androulidakis, Y. S., Kombiadou, K. D., Makris, C. H., Baltikas, V. N. et 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.
- Beniston, M. et 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. et Letetrel, C. 2013. A significant increase in wave height in the North Atlantic Ocean over the twentieth century. *Global and Planetary Change* 106, 77-83.
- Caldeira, K. 2009. Ocean acidification: Humanity and the environment in geologic time, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Sciences* 6(3), 462004.
- Canadell, J. G., Le Quere, C., Raupach, M. R., Field, C. R., Buitenhuis, E., Ciais, P., Conway, T. J., Gillett, N. P., Houghton, R. A. et Marland, G., 2007. Contributions to accelerating atmospheric CO₂ growth from economic activity, carbon intensity, and efficiency of natural sinks. *Compte rendu des travaux de l'Académie nationale des sciences* 104, 18866-18870.
- Carson, M., Kohl, A., Stammer, D., Slangen, A. B. A., Katsman, C. A., van de Wal, R. S. W., Church, J. et White, N., 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).
- CCNUCC, 2015. Accord de Paris adopté par les Parties à la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques. unfccc.int/meetings/paris_nov_2015/items/9445.php.
- CEE, 2013. Effets des changements climatiques et adaptation à ces changements dans les réseaux de transports internationaux, Commission économique pour l'Europe, New York et Genève, 2013, 274 pages, http://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/main/wp5/publications/climate_change_2014f.pdf.
- CEE, 2015. Les transports au service du développement durable. Le cas des transports intérieurs. Commission économique pour l'Europe, série Tendances et économie des transports, ECE/TRANS/251 www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/publications/Transport_for_Sustainable_Development_UNECE_2015.pdf.
- Church, J. A. et White, N. J. 2006. A twentieth century acceleration in global sea-level rise. *Geophysical Research Letters* 33, L01602 (doi:10.1029/2005GL024826).
- Church, J. A., Clark, P. U., Cazenave, A., Gregory, J. M., Jevrejeva, S., Levermann, A., Merrifield, M. A., Milne, G. A., Nerem, R. S., Nunn, P. D., Payne, A. J., Pfeffer, W. T., Stammer, D., Unnikrishnan, A. S., 2013. Élévation du niveau de la mer. In *Changements climatiques 2013 : Les éléments scientifiques. Contribution du Groupe de travail I au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution*

- du climat (T. F. Stocker, Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S. K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., Midgley, P. M.[dir. publ.]) Cambridge (Royaume-Uni) ; 1137-1216.
- Commission européenne, 2012. Impacts of Climate Change on Transport: A focus on road and rail transport infrastructures, (F. Nemry and H. Demirel), JRC Scientific and Policy Reports. Office des publications de l'Union européenne, Luxembourg, ISBN 978-92-79-27037-6.
- Conte, D. et 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. et Rahmstorf, S., 2012. A decade of weather extremes. *Nature Climate Change* 29, 491-496 (doi:10.1038/nclimate1452).
- Coumou D. et Robinson A., 2013. Historic and future increase in the global land area affected by monthly heat extremes. *Environmental Research Letters* 8 (3) <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/8/3/034018/meta>.
- Cowtan, K. et 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. et 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 et H. Palanisamya, 2017. 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 pages, doi:10.1002/joc.4996.
- Dole *et al.*, 2011. Was there a basis for anticipating the 2010 Russian heat wave? *Geophysical Research Letters* 38, L06702.
- Domingues, C. M., Church, J. A., White, N. J., Gleckler, P. J., Wijffels, S. E., Barker, P. M. et Dunn, J. R. 2008. Improved estimates of upper-ocean warming and multi-decadal sea-level rise. *Nature* 453, 1090-1094.
- Dutton A., A. E. Carlson, A. J. Long, G. A. Milne, P. U. Clark, R. DeConto, B. P. Horton, S. Rahmstorf, et M. E. Raymo, 2015. Sea-level rise due to polar ice-sheet mass loss during past warm periods. *Science* 349, 6244 marine.rutgers.edu/pubs/private/Science-2015-Dutton-.pdf.
- Emanuel, K. 2005. Increasing destructiveness of tropical cyclones over the past 30 years. *Nature* 436, 686-688.
- Engelhart, S. E., Horton, B. P., Douglas, B. C., Peltier, W. R. et Törnqvist, T. E., 2009. Spatial variability of late Holocene and twentieth century sea-level rise along the US Atlantic coast. *Geology* 37, 1115-1118.
- EPA, 2015. Precipitation Worldwide, 1901-2013 [Graphique téléchargeable]. Accessible à l'adresse : www3.epa.gov/climatechange/science/indicators/weathclimate/precipitation.html (consulté le 03/02/2016).
- Feyen L., Dankers R. et Bodis K., 2010. Climate warming and future flood risk in Europe. *Climatic Change*.
- Fourier J. J., 1827. MÉMOIRE sur les températures du globe terrestre et des espaces planétaires. Mémoires de l'Académie royale des sciences de l'Institut de France VII, 569-604.

- Fyfe J.C., Meehl G.A., England M.H., Mann M.E., Santer B.D., Flato G.M., Hawkins E., Gillett N.P., Xie S-P., Kosaka Y. et Swart N.C., 2016. Making sense of the early-2000s warming slowdown. *Nature Climate Change* 6, 224-228, doi:10.1038/nclimate2938.
- Gehrels, W. R. et Woodworth, P. L. 2012. When did modern rates of sea-level rise start? *Global Planet Change* 100, 263-277.
- GIEC, 2007. Changements climatiques 2007. Les éléments physiques. Contribution du Groupe de travail I au quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [Solomon S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor et de H. L. Miller (dir. publ.)]. Cambridge University Press, Cambridge (Royaume-Uni) et New York (États-Unis), 996 pages.
- GIEC, 2013. Changements climatiques 2013. Les éléments scientifiques. Contribution du Groupe de travail I au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [Stocker, T. F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex et P. M. Midgley (dir. publ.)]. Cambridge University Press, Cambridge (Royaume-Uni) et New York (États-Unis).
- GIEC, 2014. Résumé à l'intention des décideurs, dans : Changements climatiques 2014 : Incidences, adaptation et vulnérabilité. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution du Groupe de travail II au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [Field, C. B., V. R. Barros, D. J. Dokken, K. J. Mach, M. D. Mastrandrea, T. E. Bilir, M. Chatterjee, K. L. Ebi, Y. O. Estrada, R. C. Genova, B. Girma, E. S. Kissel, A. N. Levy, S. MacCracken, P. R. Mastrandrea, et L. L. White (dir. publ.)]. Cambridge University Press, Cambridge (Royaume-Uni) et New York (États-Unis), 1-32.
- GISTEMP, 2016: NASA Goddard Institute for Space Studies - GISS Surface Temperature Analysis (GISTEMP). Accessible à l'adresse : data.giss.nasa.gov/gistemp/.
- Grinsted A, Moore J. C. et Jervejeva S., 2010. Reconstructing sea level from paleo and projected temperatures 200 to 2100 AD. *Climate Dynamics* 34, 461-472.
- Hallegratte, S., Green, C., Nicholls, R. J. et Corfee-Morlot, J., 2013. Future flood losses in major coastal cities, *Nature Climate Change* 3, 802-806 (doi:10.1038/NCLIMATE1979).
- Hambly, D., J. Andrey, B. Mills et C. Fletcher (2012). Projected implications of climate change for road safety in Greater Vancouver, Canada. *Climatic Change*. (doi:10.1007/s10584-012-0499-0).
- Hanna, E. *et al.*, 2013. Ice sheet mass balance and climate change. *Nature* 498, 51-59.
- Hansen, J., Sato, M., Hearty, P., Ruedy, R., Kelley, M., Masson-Delmotte, V., Russell, G., Tselioudis, G., Cao, J., Rignot, E., Velicogna, I., Tormey, B., Donovan, B., Kandiano, E., von Schuckmann, K., Kharecha, P., LeGrande, A. N., Bauer, M. et K.-W. Lo., 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. et Mitrovica, J. X., 2015. Probabilistic reanalysis of twentieth-century sea-level rise, *Nature* 517, 481-484.
- Hooper, E. et L. Chapman, 2012. Chapter 5 - The Impacts of Climate Change on National Road and Rail Networks. In *Transport and Climate Change, Transport and Sustainability*, Vol. 2., T. Ryley and L. Chapman, dir. publ., Emerald Group Publishing Ltd, 105-136. Accessible à l'adresse : [dx.doi.org/10.1108/S2044-9941\(2012\)0000002008](https://dx.doi.org/10.1108/S2044-9941(2012)0000002008).
- Horton, R., Herweijer, C., Rosenzweig, C., Liu, J., Gornitz, V., et Ruane, A. C., 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. et Kemp, A. C., 2014. Expert assessment of sea-level rise by AD 2100 and AD 2300, *Quaternary Science Reviews* 84, 1-6.

- Jevrejeva S., Moore J. C. et 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. et 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).
- Jonkeren O., P. Rietveldand J. van Ommeren (2007). Climate Change and Inland Waterway Transport: Welfare effects of low water levels on the river Rhine. *Journal of Transport Economics and Policy* 41 (3), 387-411.
- Karl, T. R., Melillo, J. T. et Peterson, T. C., 2009. *Global Climate Change Impacts in the United States*. Cambridge University Press, 189 pages.
- Karl, T. R., Arguez, A., Huang, B., Lawrimore, J. H., McMahon, J. R., Menne, M. J., Peterson, T. C., Vose, R. S. et Zhang, H., 2015. Possible artifacts of data biases in the recent global surface warming hiatus, *Science* 348, 1469-1472.
- Katsman, C. A., Sterl, A., Beersma, J. J., Brink, H. W., Church, J. A., Hazeleger, W., Kopp, R. E., Kroon, D., Kwadijk, J., Lammersen, R., Lowe, J., Oppenheimer, M., Plag, H. P., Ridley, J., Storch, H. 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. et 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. et Oppenheimer, M., 2009. Probabilistic assessment of sea level during the last interglacial stage. *Nature* 462, 863-867. (doi:10.1038/nature08686).
- Lantuit, H. et W.H. Pollard, 2008. Fifty years of coastal erosion and retrogressive thaw slump activity on Herschel Island, Southern Beaufort Sea, Yukon Territory, Canada. *Geomorphology* 95 (1-2), 84-102.
- Lionello, P., Galati, M. B. et 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., Castanedo, S., Abascal, A. J. et Minguez, R., 2013. Long-term changes in sea level components in Latin America and the Caribbean. *Global and Planetary Change* 104, 34-50.
- Lowe, J. A., Howard, T., Jenkins, G., Ridley, J., Dye, S. et Bradley, S., 2009. *UK Climate Projections science report: Marine and coastal projections*. Met. Office Hadley Centre, Exeter (Royaume-Uni).
- Lyman, J. M. et al., 2010. Robust warming of the global upper ocean, *Nature* 465, 334-337.
- Marcos, M. et Tsimplis, M. N., 2008. Comparison of results of AOGCMs in the Mediterranean Sea during the twenty-first century. *Journal of Geophysical Research* 113 (C12) (doi:10.1029/2008JC004820).
- Marcos, M., Jorda, G., Gomis, D. et 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. et Lionello, P., 2013. High resolution climate projection of storm surge at the Venetian coast. *Nat Hazards Earth System Science* 13, 1135-1142.
- Melillo, J. M., Richmond, T. T. C., Yohe, G. W., 2014. *Climate Change Impacts in the United States: The Third National Climate Assessment*. U.S. Global Change Research Program, NCA, p. 841.

- Menendez, M. et 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).
- Mentaschi, L., M. I. Vousdoukas, E. Voukouvalas, A. Dosio et L. Feyen, 2017. Global changes of extreme coastal wave energy fluxes triggered by intensified teleconnection patterns. *Geophys. Res. Lett.* 44, 2416-2426, doi:10.1002/2016GL072488.
- MetOffice, 2014. *Climate risk An update on the science*. Met Office, Handley Center, Devon (Royaume-Uni), 9 pages.
- Meyer-Christoffer, A.; Becker, A.; Finger, P.; Rudolf, B.; Schneider, U.; Ziese, M. *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 (Allemagne), 2015.
- Milly, P. C. D., Betancourt, J., Falkenmark, M., Hirsch, R. M., Kundzewicz, Z. W., Lettenmaier D. P. et Stouffer, R. J., 2008. Stationarity is dead: Whither water management? *Science* 319, 573-574.
- Mori N., Shimura T., Yasuda T. et 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*, dx.doi.org/10.1016/j.oceaneng.2013.02.016i.
- 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. Accessible à l'adresse : www.giss.nasa.gov/research/news/20160120/ (consulté le 13/02/2016).
- NOAA, 2015. 2014 State of the Climate: Carbon Dioxide [WWW]. Accessible à l'adresse : www.climate.gov/news-features/understanding-climate/2014-state-climate-carbon-dioxide.
- NOAA, 2016a. Global Analysis - Annual 2015: 2015 year-to-date temperatures versus previous years [WWW] National Centers for Environmental Information. Accessible à l'adresse : www.ncdc.noaa.gov/sotc/global/2015/13/supplemental/page-3 [consulté le 12/02/2016].
- NOAA, 2016b. Global Analysis – novembre 2015 [WWW] National Centers for Environmental Information. Accessible à l'adresse : www.ncdc.noaa.gov/sotc/global/201511 (consulté le 12/02/2016).
- NOAA, 2016c. Global Analysis – février 2016 [WWW] National Centers for Environmental Information. Consultable à l'adresse : www.ncdc.noaa.gov/sotc/global/201602 (consulté le 12/02/2016).
- NOAA, 2016d. Global Analysis – février 2016 [WWW] National Centers for Environmental Information. Accessible à l'adresse : www.ncdc.noaa.gov/sotc/global/201602 (consulté le 12/02/2016).
- NOAA, 2017a. National Centers for Environmental Information (NCEI), State of the Climate: Global Snow and Ice for 2016. (Publié en ligne en janvier 2017, consulté le 9 mai 2017 à l'adresse : www.ncdc.noaa.gov/sotc/global-snow/201613).
- NOAA, 2017b. National Centers for Environmental Information (NCEI). 2016 Officially Warmest Year on Record. (Publié en ligne en janvier 2017, consulté le 24 mai 2017 (www.nnvl.noaa.gov/MediaDetail2.php?MediaID=1989&MediaTypeID=3&ResourceID=105007/)).
- NOAA, 2017c. National Centers for Environmental Information (NCEI) U.S. Billion-Dollar Weather and Climate Disasters. www.ncdc.noaa.gov/billions/.

- NSIDC, 2012. Rapid sea ice retreat in June [WWW] National Snow & Ice Data Center. Accessible à l'adresse : nsidc.org/arcticseaicenews/2012/07/rapid-sea-ice-retreat-in-june/ (consulté le 15/02/2016).
- NSIDC, 2017. National Snow and Ice Data Center. Snow, Ice and Climate Change (consulté le 24 mai 2017 à l'adresse : nsidc.org/cryosphere/climate-change.html).
- OMM, 2014. Déclaration de l'OMM sur l'état du climat mondial en 2014, Organisation météorologique mondiale, OMM-N° 1152, Président du Comité des publications, Genève (Suisse), 20 pages (ISBN : 978-92-63-11152-4).
- OMM, 2016. Déclaration de l'OMM sur l'état du climat mondial en 2015, Organisation météorologique mondiale, OMM. 1167, Président du Comité des publications, Genève (Suisse) 26 pages (ISBN : 978-92-63-11167-8.). Voir aussi www.indiaenvironmentportal.org.in/content/421694/provisional-statement-on-the-status-of-global-climate-in-2011-2015/.
- OMM, 2017. Déclaration de l'OMM sur l'état du climat mondial en 2016, Organisation météorologique mondiale, OMM-N°1189, https://library.wmo.int/opac/doc_num.php?explnum_id=3500.
- Perherin, C., A. Roche, F. Pons, I. Roux, G. Desire et C. Boura (2010). Vulnérabilité du territoire national aux risques littoraux. XI^e Journées Nationales Génie Côtier – Génie Civil Les Sables d'Olonne, 22-25 juin 2010. (doi:10.5150/jngcgc.2010.072-P).
- Pérez, J., Menendez, M., Mendez, F. et 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 twenty-first century sea levelrise. *Science* 321, 1340-1343 (doi:10.1126/science.1159099).
- Pritchard, H. D., Ligtenberg, S. R. M., Fricker, H. A., Vaughan, D. G., van den Broeke, M. R. et Padman, L., 2012. Antarctic ice-sheet loss driven by basal melting of ice shelves. *Nature* 484, 502-505.
- Rahmstorf S., Cazenave A., Church J. A., Hansen J. E., Keeling R. F., Parker D. E., et R. C. J. Somerville, 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 et H. Benamara, dir. publ., Earthscan, 3-11.
- Rahmstorf S., Foster G., Cahill N, 2017. Global temperature evolution: recent trends and some pitfalls. *Environmental Research Letters* 12, 054001.
- Raper, S. C. B. et Braithwaite, R. J., 2009. Glacier volume response time and its links to climate and topography based on a conceptual model of glacier hypsometry. *The Cryosphere* 3, 183-194 (ISSN 1994-0416).
- Richardson, K., Steffen, W., Schellnhuber, H. J., Alcamo, J., Barker, T., Kammen, D. M., Leemans, R., Liverman, D., Munasinghe, M., Osman-Elasha, B., Stern, N. et O Ole W.ver., 2009. Synthesis Report. *Climate change: Global Risks, Challenges and Decisions*. Université de Copenhague, 39 pages.
- Rignot, E., Velicogna, I., van den Broeke, M. R., Monagha, A. et Lenaerts, J., 2011. Acceleration of the contribution of the Greenland and Antarctic ice sheets to sea level rise. *Geophysical Research Letters*, (38), 5 pages (doi:10.1029/2011GL046583).
- Rohling E., Grant K., Hemleben C., Siddall M., Hoogakker B., Bolshaw M. et Kucera M., 2008. High rates of sea levelrise during the last interglacial period. *Nature Geosciences* 1, 38-42 (doi:10.1038/ngeo.2007.28).
- Rona, J., 2011. *Climate Change Adaptation and Transport - UK and Rail*. Communication présentée à la deuxième session du Groupe d'experts chargé d'étudier les effets des

- changements climatiques et l'adaptation à ces changements dans les réseaux de transport internationaux, CEE, Genève, 8 novembre 2011.
- Ruggiero, P., Komar, P. D. et 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., P.Finger, A. Meyer-Christoffer, El. Rustemeier, M. Ziese et A. Becker, 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.
- 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., Marcott, S. A., Mix, A. C., Liu, Z., Otto-Bliesner, B., Schmittner, A. et Bard, E., 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 et 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, Gouvernement australien.
- Stockdon, H. F., Doran, K. J., Thompson, D. M., Sopkin, K. L., Plant, N. G. et Sallenger, A. H., 2012. National assessment of hurricane-induced coastal erosion hazards: Gulf of Mexico: U.S. Geological Survey Open-File Report 2012-1084, 51 pages.
- Streletskiy D.A., N.I. Shiklomanov et F.E. Nelson (2012). Spatial variability of permafrost active-layer thickness under contemporary and projected climate in Northern Alaska. *Polar Geography* 35 (2) 95-116.
- USDOT, 2012. *Impacts of Climate Change and Variability on Transportation Systems and Infrastructure: The Gulf Coast Study, Phase II*. A report by the US Department of Transportation, Center for Climate Change and Environmental Forecasting [Choate A, W Jaglom, R Miller, B Rodehorst, P Schultz et C Snow (dir. publ.)]. Ministère des transports, Washington (États-Unis), 470 pages.
- U.S. Climate Resilience Toolkit, 2015. Arctic Development and Transport. [WWW] Accessible à l'adresse : toolkit.climate.gov/content/about-climate-resilience-toolkit (consulté le 15/01/2016).
- Valdes-Abellan J., Pardo M.A. et Tenza-Abril, 2017. Observed precipitation trend changes in the Western Mediterranean region. *Int. J. Climatol.* doi:10.1002/joc.4984.
- Van der Wiel K., Kapnick S.B. et 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. et 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 (Pays-Bas). www.knmi.nl/bibliotheek/knmipubWR/WR2009-05.pdf.
- Vermeer M. et Rahmstorf S., 2009 Global sea level linked to global temperature. *Proceedings of the National Academy of Sciences, États-Unis*, 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 et 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., D. Wziatek et L. P. Almeida 2012. Coastal vulnerability assessment based on video wave run-up observations at a mesotidal, steep-sloped beach. *Ocean Dynamics* 62 (1), 123-137, doi:10.1007/s10236-011-0480-x.
- Vousdoukas, M. I., Voukouvalas, E., Annunziato, A., Giardino, A. et 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 et 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 et L. Feyen, 2017. Extreme sea levels on the rise along Europe's coasts. *Earth's Future* 5, 304-323. doi:10.1002/2016EF000505.
- Wada, Y., van Beek, L. P. H., Weiland, F. C. S., Chao, B. F., Wu, Y.-H. et Bierkens, M. F. P., 2012. Past and future contribution of global groundwater depletion to sea-level rise. *Geophys Res Letters* 39, L09402 (doi:10.1029/2012GL051230).
- Willway, T., L. Baldachin, S. Reeves, M. Harding, M. McHale et M. Nunn (2008). The effects of climate change on highway pavements and how to minimise them: Technical report. PPR184, TRL Limited. ISBN 978-1-84608-734-9. Royaume-Uni.
- Wright, L., P. Chinowsky, K. Strzepek, R. Jones, R. Streeter, J.B. Smith, J.M. Mayotte, A. Powell, L. Jantarasami et W. Perkins, 2012. Estimated effects of climate change on flood vulnerability of U.S. bridges. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 17, 939-955 (doi:10.1007/s11027-011-9354-2).
- Yan, X.-H., T. Boyer, K. Trenberth, T. R. Karl, S.-P. Xie, V. Nieves, K.-K. Tung et D. Roemmich, 2016. The global warming hiatus: Slowdown or redistribution? *Earth's Future*, 4, 472-482, doi:10.1002/2016EF000417.
-