



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 sur les réseaux et nœuds de transport
internationaux et l'adaptation à ces changements****Dix-septième session**

Genève, 24 et 25 avril 2019

Point 4 de l'ordre du jour provisoire

Débat sur le rapport final du Groupe d'experts**Conséquences de la variabilité du climat et des changements
climatiques pour les transports*****Communication présentée par un consultant****I. Introduction**

1. Le présent document, qui expose brièvement les conséquences de la variabilité du climat et des changements climatiques pour les transports, devrait servir d'introduction au rapport final. Le Groupe d'experts a demandé à sa seizième session qu'il soit présenté en tant que document officiel à la dix-septième session.

II. Conséquences pour les transports : un bref aperçu

2. S'agissant du degré de sensibilité des réseaux de transport à la variabilité du climat et aux changements climatiques, une précédente étude (ECE, 2013) a mis en évidence ce qui suit : a) les équipements du secteur des transports sont en général sensibles aussi bien à des changements progressifs des facteurs climatiques moyens qu'à des phénomènes météorologiques extrêmes, tels que des vagues de chaleur, de fortes précipitations, des vents violents et des élévations extrêmes du niveau de la mer ou des vagues géantes ; b) l'entretien, l'acheminement des voyageurs et des marchandises et la sécurité sont généralement plus vulnérables au forçage climatique que les équipements, 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 ; c) les équipements du secteur des transports sont sensibles à des facteurs de stress dont l'incidence est relativement rare par rapport aux variations météorologiques

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



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 provoquée par l'onde de tempête de l'ouragan Katrina, en 2005 (USDOT, 2012).

3. Les phénomènes hydrométéorologiques extrêmes (fortes pluies, inondations, sécheresse, etc.) causent déjà des dommages considérables aux infrastructures et aux services de transport. Les précipitations diluviennes sont susceptibles d'entraîner des crues qui risquent d'être particulièrement coûteuses pour les réseaux de transport intérieur (Hooper and Chapman, 2012), étant donné que des routes et des voies ferrées importantes 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. Les fortes précipitations peuvent causer des dégâts directs, pendant l'épisode et aussitôt après, qui nécessiteront une intervention d'urgence ainsi que des mesures propres à assurer l'intégrité structurelle et l'entretien des routes, des ponts, des réseaux d'évacuation des eaux et des tunnels (USDOT, 2012).

4. Selon les prévisions, 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 (voir notamment 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 et d'adaptation particulières telles que la construction de réseaux d'évacuation adaptés et l'utilisation d'enrobé drainant ou de liant bitumineux modifié aux polymères (voir notamment Willway et al., 2008). Les régions déjà sujettes aux inondations seront confrontées à des problèmes plus fréquents et encore plus graves. La stagnation de l'eau après les inondations pourrait avoir des conséquences graves et onéreuses ; par exemple, en Louisiane, les dommages engendrés par la longue immersion de la chaussée sur plus de 300 kilomètres d'autoroute ont été estimés à 50 millions de dollars (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 (EC, 2012 ; ECE, 2015).

5. 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 liés aux très fortes précipitations, aux inondations et aux 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 provoquer la submersion des ouvrages de défense et l'inondation des voies ferrées du littoral et des estuaires. Ils pourraient aussi entraîner des défaillances des infrastructures et des interruptions de service en raison des débris emportés par le vent (voir notamment PIARC, 2012 ; ECE, 2013 ; 2015).

6. L'augmentation de la fréquence et de la durée des vagues de chaleur peut également susciter d'importantes difficultés en matière d'exploitation et de service pour les transports ferroviaires, routiers et aériens, en raison de la déformation des rails et des chaussées et des réductions nécessaires de la charge utile des avions. Le nombre de journées affichant des températures supérieures à 38 °C devrait augmenter (Vogel et al., 2017), au risque d'entraîner des défaillances supplémentaires des infrastructures routières. Des étés plus secs et plus chauds contribueront à la dégradation ou à l'affaissement des chaussées, qui nuiront à leur efficacité et à leur résilience (PIARC, 2012). Il ressort de prévisions établies à l'aide

de modèles (EC, 2012) que les surcoûts annuels liés à la fabrication de nouveaux liants bitumineux pour l'Europe des Vingt-Sept dans le scénario SRES A1B¹ seraient compris entre 38,5 et 135 millions d'euros par an sur la période 2040-2070 et entre 65 et 210 millions d'euros par an sur la période 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. Il est à souligner également que le personnel des transports, les voyageurs et le fret peuvent souffrir fortement des vagues de chaleur, surtout si elles sont associées à un taux d'humidité relative élevé (Mora et al., 2017 ; Monioudi et al., 2018).

7. 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 de mer facilite l'accès aux importants gisements d'hydrocarbures (en mer de Beaufort et en mer des Tchouktches) et le commerce international. En même temps, le réchauffement de l'Arctique entraînera : i) une érosion du littoral plus marquée en raison de l'activité accrue des vagues sur les côtes (voir notamment Lantuit and Pollard, 2008) et des élévations extrêmes du niveau de la mer (Vousdoukas et al., 2018) sur les côtes polaires du Canada, de la Fédération de Russie et des États-Unis ; ii) une augmentation des coûts d'aménagement et d'entretien des infrastructures de transport en raison du dégel du pergélisol (ECE, 2015). Le dégel du pergélisol (voir notamment Streletskiy et al., 2012, Schuur et al., 2015) pose de graves problèmes pour les transports. Par exemple le dégel ou le gel peuvent entraîner des affaissements ou des soulèvements de la chaussée susceptibles de compromettre l'intégrité structurelle des routes et leur capacité à supporter les charges transportées (ECE, 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 (EEA, 2015a).

8. Les voies navigables intérieures² 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, les changements de morphologie des cours d'eau et les dommages occasionnés aux berges et aux dispositifs de protection contre les crues (ECE, 2013). De même, les voies navigables intérieures peuvent pâtir de basses eaux en cas de sécheresse, celle-ci étant considérée comme un risque plus grave que les inondations pour les voies de navigation intérieures (Christodoulou and Demirel, 2018). Une étude de cas³ sur le couloir Rhin-Main-Danube a montré que, sur une période de vingt ans, les pertes annuelles moyennes dues à la baisse du niveau des eaux 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 sérieux des épisodes 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 ».

9. 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 européenne⁴, qui 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

¹ Ce scénario équivaut *grosso modo* au scénario RCP6,0 du cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat.

² Selon le scénario de référence TRANSTOOLS8, en 2005, environ 293 millions de tonnes de fret ont été transportées entre les pays de l'Union européenne (hors commerce national) au moyen des voies navigables intérieures, un tonnage légèrement inférieur à celui transporté par rail et représentant environ un tiers du tonnage remorqué par la route.

³ Projet ECCONET du septième programme-cadre de l'Union européenne, <https://www.tmluven.be/en/project/ecconet>.

⁴ Projets WEATHER (www.weather-project.eu) et EWENT (www.weather-project.eu/weather/inhalte/research-network/ewent.php) du septième programme-cadre de l'Union européenne.

(réparation et entretien des infrastructures, dommages causés aux véhicules, augmentation des frais 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 était le mode de transport le plus touché, notamment dans certaines « zones critiques » en Europe de l'Est et en Scandinavie. Les effets sur les routes (principalement imputables aux accidents de la circulation liés aux conditions météorologiques) semblent par contre avoir été plus largement répartis sur l'ensemble de la région.

10. Les infrastructures de transport des zones côtières (routes, voies ferrées, ports maritimes et aéroports) seront proportionnellement beaucoup plus touchées par la variabilité et les changements climatiques car il faudra non seulement faire face aux problèmes décrits ci-dessus mais s'adapter à la recrudescence des inondations du littoral par l'eau de mer. Une étude récente portant sur les risques climatiques pour les ports maritimes et les aéroports côtiers dans la région des Caraïbes a mis en évidence un risque important et en constante augmentation d'inondation du littoral par l'eau de mer dès les années 2030, qui nécessitera des mesures d'adaptation technique considérables (Monioudi et al., 2018). Dans la région de la CEE, la montée du niveau moyen de la mer et la fréquence accrue des ondes de tempête, en particulier en Europe du Nord-Ouest, dans la mer Baltique et le long de la côte nord-est du Pacifique aux États-Unis et au Canada (voir notamment Vousdoukas et al., 2016a ; 2018), peuvent avoir des effets catastrophiques, par exemple en inondant les routes, les voies ferrées et les tunnels dans les régions littorales. Ces inondations peuvent, pendant toute leur durée, rendre les systèmes de transport inutilisables et endommager les terminaux, les installations de transport intermodal, les centres de fret, les zones de stockage et les marchandises, perturbant ainsi les chaînes d'approvisionnement bien au-delà de la décrite (ECE, 2013 ; 2015). Dans une étude réalisée par Pecherin et al. (2010), il a été estimé qu'une hausse d'un mètre du niveau d'élévation extrême du niveau de la mer par rapport au niveau constaté lors de la dernière tempête « centennale⁵ » 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.

11. Une autre étude (EC, 2012) a fourni une première estimation des risques futurs liés à une élévation du niveau moyen de la mer et aux ondes de tempête sur l'infrastructure des transports côtiers en Europe, grâce à une comparaison entre la hauteur des infrastructures côtières et les effets combinés d'une élévation d'un mètre du niveau moyen de la mer et de la hauteur de l'onde de tempête centennale. Cette étude a montré que 4,1 % des infrastructures de transport du littoral (par exemple, les routes côtières), dont la valeur est d'environ 18,5 milliards d'euros, étaient exposées à un risque. Toutefois, étant donné que des projections plus précises sur les élévations extrêmes du niveau de la mer et les vagues côtières à venir deviennent disponibles (Vousdoukas et al., 2016 ; 2018 ; Camus et al., 2017) pour la région de la CEE (et au-delà), il est utile de réévaluer les conséquences potentielles des inondations sur l'infrastructure de transport de la CEE selon différents scénarios de variabilité du climat et de changements climatiques.

12. Une étude récente sur les ports (Christodoulou and Demirel, 2018) a montré que 64 % des ports maritimes de l'Union européenne risquaient d'être inondés si les estimations de la hausse du niveau de la mer (IPCC, 2013) et les prévisions d'élévations extrêmes du niveau de la mer (voir notamment Vousdoukas *et al.*, 2018) se concrétisaient. Ces phénomènes auront pour principales répercussions la perturbation des activités et des dommages causés aux infrastructures portuaires et aux navires, mais les liaisons avec l'arrière-pays seront également affectées. Les ports maritimes de la Grèce (169), du Royaume-Uni (165) et du Danemark (90) seront les plus touchés d'ici à 2080, date à laquelle le nombre de ports maritimes de l'Union européenne exposés au risque d'inondation devrait avoir augmenté de 50 % par rapport à 2030 (pour atteindre 852 ports). Cette tendance est particulièrement marquée le long de la côte de la mer du Nord qui, selon la base de données GISCO, compte plus de 500 ports, dont le trafic représente jusqu'à 15 %

⁵ L'hypothèse retenue dans l'étude est celle d'un coût moyen de propriété linéaire de 10 millions d'euros par kilomètre de revêtement routier et de frais de réparation d'environ 250 000 euros par kilomètre.

du transport mondial de marchandises (EUCC-D, 2013). Une enquête mondiale sur l'industrie portuaire menée récemment par la CNUCED a toutefois révélé que, dans l'ensemble, les ports mondiaux ne disposaient pas des informations et des données nécessaires à une adaptation efficace et qu'ils étaient peu préparés (Asariotis et al., 2017).

13. Enfin, il convient de noter que le secteur des transports est tributaire de la demande. Or, 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 (ECE, 2015).

14. De manière générale, il semble nécessaire de procéder d'urgence à une évaluation plus détaillée des effets des phénomènes extrêmes sur l'infrastructure côtière des transports (et sur les chaînes d'approvisionnement connexes). Il convient également de noter que, la tendance actuelle en matière de recherche sur le climat consistant à réaliser des études d'impact par seuils de température (voir notamment IPCC, 2018), il serait très utile de comprendre les conséquences de la variabilité du climat et des changements climatiques sur les infrastructures et les activités pour des cibles mondiales de température données et de diffuser ces connaissances (Seneviratne et al., 2016).

Tableau 1

Tableau récapitulatif des conséquences de la variabilité du climat et des changements climatiques pour les infrastructures et les opérations de transport (liste non exhaustive)

<i>Facteur/danger</i>	<i>Conséquences</i>		
	<i>Route</i>	<i>Rail</i>	<i>Ports intérieurs et aéroports</i>
Température			
Hausse des températures moyennes ; vagues de chaleur/ épisodes de sécheresse ; fluctuation du nombre de journées chaudes et froides	Surchauffe et dégradation du revêtement routier ; orniérage de l'asphalte ; dommages thermiques aux ponts ; augmentation de la fréquence des glissements de terrain sur les routes de montagne ; réduction de la durée de vie des équipements ; besoins accrus de refroidissement (voyageurs et marchandises) ; intervalles d'entretien plus courts ; augmentation des coûts de construction et d'entretien ; fluctuations potentielles de la demande	Déformation des voies ferrées ; surchauffe et défaillance des infrastructures et du matériel roulant ; glissements de talus ; problèmes de signalisation ; limitations de vitesse ; réduction de la durée de vie des équipements ; besoins accrus en refroidissement ; intervalles d'entretien plus courts ; augmentation des coûts de construction et d'entretien ; fluctuations de la demande	Dommages occasionnés aux infrastructures, à l'équipement et aux marchandises ; augmentation de la consommation d'énergie pour le refroidissement ; restrictions de la charge utile par transport aérien et nécessité de rallonger les pistes ; réductions potentielles des coûts de déneigement et de dégivrage ; prolongation de la saison des travaux
Diminution du manteau neigeux et de l'étendue des glaces sur terre et sur mer dans les régions arctiques ; dégradation et fonte du pergélisol	Déformation des routes ; diminution de la durée des trajets ; instabilité des pentes et glissements de talus ; érosion du littoral touchant les routes côtières ; problèmes pour les routes de glace	Dommages aux voies ferrées ; instabilité des pentes et glissements de talus ; restrictions pour le fret et les voyageurs	Dommages aux infrastructures portuaires et aéroportuaires ; saisons de navigation plus longues et voies de navigation plus courtes dans l'Arctique (passage du Nord-Est) – diminution des dépenses en combustibles, mais hausse du coût des services d'appui

<i>Facteur/danger</i>	<i>Conséquences</i>		
	<i>Route</i>	<i>Rail</i>	<i>Ports intérieurs et aéroports</i>
Précipitations			
Variations des valeurs moyennes ; variations de l'intensité et de la fréquence des phénomènes extrêmes (inondations et sécheresse)	Inondations ; augmentation de la fréquence des glissements de terrain ; glissements de talus, de remblais et de terrassements ; impacts sur les nœuds vitaux (ponts) ; mauvaise visibilité augmentant le risque d'accident ; augmentation de la fréquence des coulées de boue ; retards ; fluctuations de la demande	Submersion et affouillement des ponts ; problèmes liés aux systèmes d'évacuation des eaux et aux tunnels ; glissements de terrain ; inondations souterraines ; dommages aux remblais et aux terrassements ; problèmes d'exploitation ; retards ; fluctuations de la demande	Inondation des infrastructures portuaires ; dommages directs à la cargaison et à l'équipement ; en cas de pluies extrêmement faibles, restrictions de la navigation sur les voies navigables intérieures en raison de la sécheresse et de la diminution du niveau des cours d'eau
Vents violents			
Variations de la fréquence et de l'intensité des phénomènes	Dommages aux clôtures ; diminution de la sécurité routière et augmentation des accidents de la route	Dommages aux installations et aux caténaires ; surtensions ; perturbation des activités	Problèmes de navigation des bateaux et d'accostage dans les ports ; annulations et retards dans les aéroports
Niveau de la mer et tempêtes			
Élévation du niveau moyen de la mer	Risque accru d'inondation permanente ou d'érosion des routes côtières	Affouillement des ponts, dommages aux installations et aux caténaires des équipements côtiers	Dommages aux infrastructures dus à l'inondation des équipements côtiers ; augmentation des coûts de protection des ports ; effets sur les principaux points de transit (par exemple, le canal de Kiel)
Hausse des élévations extrêmes du niveau de la mer ; variations de l'énergie et de la direction des vagues	Dommages structurels aux routes côtières ; inondations temporaires rendant les routes inutilisables ; retards et déviations de la circulation	Dommages structurels aux voies ferrées, aux remblais et aux terrassements le long des côtes ; restrictions et perturbations des activités ferroviaires côtières	Inondation des équipements ; augmentation des coûts de construction et d'entretien des ports ; sédimentation dans les chenaux de navigation ; réinstallation des personnes et des entreprises, problèmes d'assurance

III. Références

Asariotis R., Mohos-Naray V., Benamara H., 2017. Port Industry Survey on Climate Change Impacts and Adaptation. UNCTAD Research Paper No. 18, UNCTAD/SER.RP/2017/18. 37 pp plus Appendices.

unctad.org/en/PublicationsLibrary/ser-rp-2017d18_en.pdf

Christodoulou A., Demirel H., 2018. Impacts of climate change on Transport. A focus on airports, seaports and inland waterways. EUR 28896 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2018, ISBN 978-92-79-97039-9, doi:10.2760/378464, JRC108865,

EC, 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. Publications Office of the European Union, Luxembourg, ISBN 978-92-79-27037-6.

ECE, 2013. Climate Change Impacts and Adaptation for International Transport Networks, United Nations Economic Commission for Europe, New York and Geneva, 2013, 248 pp. www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/main/wp5/publications/climate_change_2014.pdf

ECE, 2015. Transport for Sustainable Development: The case of Inland Transport. United Nations Economic Commission for Europe, Transport Trends and Economics Series ECE/TRANS/251.

www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/publications/Transport_for_Sustainable_Development_UNECE_2015.pdf

GISTEMP, 2016. NASA Goddard Institute for Space Studies - GISS Surface Temperature Analysis (GISTEMP). Available from: data.giss.nasa.gov/gistemp/.

Hambly, D., J. Andrey, B. Mills and C. Fletcher, 2012. Projected implications of climate change for road safety in Greater Vancouver, Canada. *Climatic Change*. (doi: 10.1007/s10584-012-0499-0).

Hooper, E. and 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, eds., Emerald Group Publishing Ltd, pp. 105–136. Available from [dx.doi.org/10.1108/S2044-9941\(2012\)0000002008](http://dx.doi.org/10.1108/S2044-9941(2012)0000002008)

IPCC, 2013. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

IPCC, 2018: Summary for Policymakers. In: *Global warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty* [V. Masson-Delmotte, P. Zhai, H. O. Pörtner et al. (eds.)]. World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland 32 pp. www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2018/07/SR15_SPM_High_Res.pdf

Jonkeren O., P. Rietveld and 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. and Peterson, T. C. 2009. *Global Climate Change Impacts in the United States*. Cambridge University Press, 189 pp.

Lantuit, H. and W.H. Pollard, 2008. Fifty years of coastal erosion and retrogressive thaw slump activity

- Monioudi I., N., Asariotis R., Becker A. et al., 2018. Climate change impacts on critical international transportation assets of Caribbean Small Island Developing States (SIDS): The case of Jamaica and Saint Lucia. *Regional Environmental Change*, 18 (8), 2211–2225.
- Mora, C., Dousset, B., Caldwell, I.R. et al., 2017. Global risk of deadly heat. *Nature Climate Change* 7, 501-507. DOI: 10.1038/NCLIMATE3322
- NSIDC, 2012. Rapid sea ice retreat in June [WWW] National Snow & Ice Data Center. Available from: nsidc.org/arcticseaicenews/2012/07/rapid-sea-ice-retreat-in-june/ [accessed 15/02/2016]
- Perherin, C., A. Roche, F. Pons, I. Roux, G. Desire, and C. Boura (2010). Vulnérabilité du territoire national aux risques littoraux. XIèmes Journées Nationales Génie Côtier – Génie Civil Les Sables d’Olonne, 22-25 June 2010. (doi: 10.5150/jngcgc.2010.072-P).
- PIARC, 2012. Dealing with the effects of climate change on road pavements. World Road Association (PIARC) Technical Committee D.2 Road Pavements, 146 pp. (ISBN: 2-84060-247-4).
- Rona, J., 2011. Climate Change Adaptation and Transport – UK and Rail. Presentation at the second session of the Group of Experts on Climate change impacts and adaptation for international transport networks, UNECE, Geneva, 8 November 2011.
- Schuur EAG, McGuire A.D., Schädel C., et al., 2015. Climate change and the permafrost carbon feedback. *Nature* 520, 171–179. 10.1038/nature14338
- Seneviratne S. I., et al., 2016. Allowable CO2 emissions based on regional and impact-related climate targets. *Nature* 529, 477–483. doi:10.1038/nature16542.
- Streletskiy D.A., N.I. Shiklomanov and 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 and C Snow (eds.)]. Department of Transportation, Washington, DC, USA, 470 pp.
- Vogel M.M., Orth R., Cheruy F. et al., 2017. Regional amplification of projected changes in extreme temperatures strongly controlled by soil moisture temperature feedbacks. *Geophys. Res. Letters*, 44, 1511–1519. doi:10.1002/2016GL071235.
- Vousdoukas M.I., Voukouvalas E., Annunziato A., Giardino A. and Feyen, L., 2016a. Projections of extreme storm surge levels along Europe. *Climate Dynamics* doi: 10.1007/s00382-016-3019-5.
- Vousdoukas M.I., Mentaschi L., Voukouvalas E., Verlaan M., Jevrejeva S., Jackson L.P., Feyen L., 2018. Global probabilistic projections of extreme sea levels show intensification of coastal flood hazard. *Nat. Commun.* 9, 2360. doi.org/10.1038/s41467-018-04692-w.
- Willway, T., Baldachin L., Reeves S. et al., 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. United Kingdom
- Wright L., Chinowsky P., Strzepak K. et al., 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).