

COMMISSION ÉCONOMIQUE DES NATIONS UNIES POUR L'EUROPE

Effets des changements climatiques et adaptation à ces changements dans les réseaux de transport internationaux



« Ce n'est pas l'espèce la plus forte qui survit,
ni la plus intelligente, mais celle qui
s'adapte le mieux au changement. »
Charles Darwin



UNITED NATIONS

Effets des changements climatiques et adaptation à ces changements dans les réseaux de transport internationaux

Rapport du Groupe d'experts



NATIONS UNIES
New York et Genève, 2013

Note

La cote des documents de l'Organisation des Nations Unies se compose de lettres majuscules et de chiffres. La simple mention d'une cote dans un texte signifie qu'il s'agit d'un document de l'Organisation.

Les appellations employées dans la présente publication et la présentation des données qui y figurent n'impliquent de la part du Secrétariat de l'Organisation des Nations Unies aucune prise de position quant au statut juridique des pays, territoires, villes ou zones, ou de leurs autorités, ni quant au tracé de leurs frontières ou limites. Les cartes et les rapports par pays ne sont donnés qu'à titre d'information. Les données correspondantes ont été transmises par les pays concernés et leur contenu relève de l'entière responsabilité de ces derniers. Dans les quelques cas où les pays n'ont pas fourni de données, le secrétariat s'en est procuré auprès des sources disponibles. Le Groupe d'experts des Nations Unies pour les noms géographiques (GENUNG), qui fait partie du Département des affaires économiques et sociales (DAES) du Secrétariat de l'Organisation des Nations Unies (<http://unstats.un.org/unsd/geoinfo/UNGEEN/default.html>), traite des questions se rapportant aux noms géographiques en s'appuyant sur des initiatives émanant des États membres.

Remerciements : Le présent rapport a été établi par le professeur A.F. Velegakis, de l'université de l'Égée (Grèce), qui souhaite remercier tous les membres du Groupe d'experts de la CEE chargé d'étudier les effets des changements climatiques et l'adaptation à ces changements dans les réseaux de transport internationaux pour leur précieuse contribution à l'élaboration du rapport, mais aussi toutes les personnes ayant participé à l'établissement du questionnaire qui faisait partie de la présente étude.

ECE/TRANS/241

La Commission économique pour l'Europe de l'ONU

La Commission économique pour l'Europe (CEE) est l'une des cinq commissions régionales du Conseil économique et social de l'Organisation des Nations Unies (ONU). Créée en 1947, elle avait initialement pour mission d'aider à la reconstruction de l'Europe d'après guerre, de développer l'activité économique et de renforcer les relations économiques entre les pays européens ainsi qu'entre l'Europe et le reste du monde. Durant la guerre froide, la CEE a tenu lieu d'espace unique de dialogue et de coopération économique entre l'Est et l'Ouest. Malgré la complexité de cette période, des résultats notables ont été obtenus et de nombreux accords d'harmonisation et de normalisation ont pu faire l'objet d'un consensus.

Après la guerre froide, la Commission économique pour l'Europe a non seulement accueilli bon nombre de nouveaux États membres, mais elle s'est également vu confier de nouvelles fonctions. Dès le début des années 1990, elle a centré ses activités sur l'analyse du processus de transition, mettant à profit son expérience de l'harmonisation pour faciliter l'intégration des pays d'Europe centrale et orientale dans l'économie mondiale.

La Commission économique pour l'Europe est une instance qui permet à ses 56 pays membres, d'Europe occidentale, centrale et orientale, d'Asie centrale et d'Amérique du Nord, de se réunir pour élaborer leurs instruments de coopération économique. Cette coopération porte sur les questions économiques, la statistique, l'environnement, les transports, le commerce, l'énergie durable, le bois et l'habitat. La CEE sert de cadre à l'élaboration et à l'harmonisation de conventions et de normes au niveau régional. Ses experts fournissent une assistance technique aux pays de l'Europe du Sud-Est et à la Communauté d'États indépendants, sous la forme de services de conseil, de séminaires de formation et d'ateliers où les pays peuvent échanger leurs expériences et leurs meilleures pratiques.

Les transports à la CEE

Le Comité des transports intérieurs de la CEE s'attache à faciliter la circulation internationale des personnes et des biens par les divers modes de transport intérieur. Il a pour objectif d'améliorer la compétitivité, la sécurité, l'efficacité énergétique et la sûreté des transports. Dans le même temps, il met l'accent sur les moyens de réduire les incidences négatives des activités de transport sur l'environnement et de contribuer efficacement au développement durable. Le Comité des transports intérieurs remplit les fonctions suivantes:

- Centre de normalisation et de gestion de traités multilatéraux relatifs au transport à l'échelle européenne mais aussi à l'échelle mondiale comme par exemple dans les domaines du transport des marchandises dangereuses et de la construction des véhicules routiers;
- Portail d'assistance technique et d'échange des meilleures pratiques;
- Promoteur de la planification des investissements multinationaux;
- Partenaire essentiel des initiatives de facilitation du commerce et du transport;
- Centre historique des statistiques des transports.

Depuis plus de soixante ans, le Comité des transports intérieurs sert de plateforme de coopération intergouvernementale visant à faciliter et développer les transports internationaux tout en améliorant leur sécurité et leur performance environnementale. Grâce à ces travaux importants et de longue haleine, plus d'une cinquantaine de conventions et d'accords internationaux ont vu le jour, fournissant un cadre juridique international et un ensemble de règlements techniques pour le développement des transports internationaux, qu'il s'agisse de la route, du rail, des voies navigables, du transport intermodal, des marchandises dangereuses ou de la construction des véhicules. Étant donné les besoins du secteur des transports et de ses organes de réglementation, la CEE propose une approche équilibrée prenant en compte tant les questions de facilitation que la sécurité des transports.

Table des Matières

| | |
|---|-----------|
| Note | II |
| La Commission économique pour l'Europe de l'ONU | III |
| Les transports à la CEE..... | IV |
| Résumé..... | XVII |
| Objet et structure du rapport..... | XXIII |
| Chapitre 1. Changements climatiques: fondements physiques..... | 1 |
| 1.1. Phénoménologie des changements climatiques..... | 1 |
| 1.1.1 Température, précipitations et élévation du niveau de la mer..... | 1 |
| 1.1.2 Phénomènes extrêmes | 6 |
| 1.2. Mécanismes | 13 |
| 1.3. Rétroactions et points de basculement | 14 |
| Chapitre 2. Effets des changements climatiques dans les transports..... | 19 |
| 2.1. Introduction | 19 |
| 2.2. Zones de littoral..... | 23 |
| 2.3. Crues fluviale , fortes précipitations, chutes de neige et vents violents..... | 30 |
| 2.4. Vagues de chaleur et sécheresse | 37 |
| 2.5. Mers subarctiques et pergélisol..... | 43 |
| 2.6. Conséquences (indirectes) des changements dans la demande de transports..... | 46 |
| Chapitre 3. Analyse du questionnaire | 51 |
| 3.1. Degré de sensibilisation et disponibilité de l'information sur les effets des changements climatiques..... | 51 |
| 3.2. Degré de préparation et politiques, mesures et initiatives existantes et qu'il est prévu de prendre en matière d'adaptation des transports | 54 |
| 3.3. Besoins d'informations, de statistiques et de financement , et travaux de recherche | 55 |
| 3.4. Mécanismes de collaboration à l'échelon national ou local, régional ou international ... | 57 |
| 3.5. Questions propres aux infrastructures routières et ferroviaires, et aux voies navigables intérieures..... | 59 |
| Chapitre 4. Mesures possibles d'adaptation aux changements climatiques..... | 61 |
| 4.1. Introduction | 61 |
| 4.2. Modalités des politiques d'adaptation..... | 63 |
| 4.3. Exemples de logiques et de mesures d'adaptation dans les transports..... | 66 |
| 4.3.1 Mesures techniques d'adaptation pour les routes | 67 |
| 4.3.1.1 Royaume-Uni | 68 |
| 4.3.1.2 États-Unis..... | 70 |
| 4.3.1.3 Canada..... | 77 |
| 4.3.1.4 France..... | 77 |
| 4.3.2 Mesures techniques d'adaptation pour les voies ferrées..... | 81 |
| 4.3.2.1 Royaume-Uni – Network Rail | 82 |
| 4.3.2.2 États-Unis..... | 88 |
| 4.3.2.3 Canada | 93 |

| | | |
|--|--|------------|
| 4.3.2.4 | Japon – Compagnie des chemins de fer de l’est du Japon (JR East Company)..... | 93 |
| 4.3.2.5 | France – SNCF | 95 |
| 4.3.3 | Mesures techniques d’adaptation des voies fluviale | 96 |
| 4.3.3.1 | Effets du climat sur le réseau fluvial et mesu es d’adaptation possibles..... | 97 |
| 4.3.3.2 | États-Unis..... | 100 |
| 4.3.3.3 | Canada | 100 |
| 4.3.3.4 | Pays-Bas..... | 101 |
| 4.3.4 | Mesures techniques d’adaptation des ports maritimes | 101 |
| 4.4. | Résumé et analyse..... | 105 |
| Chapitre 5. Conclusions et recommandations..... | | 109 |
| 5.1. | Introduction | 109 |
| 5.2. | Tendances, projections et effets des changements climatiques..... | 110 |
| 5.2.1 | Tendances et projections | 110 |
| 5.2.2 | Effets sur les modes de transport..... | 112 |
| 5.3. | Recommandations | 114 |
| Références | | 121 |
| ANNEXES | | 141 |
| Annexe I: Sélection d’études sur les effets des changements climatiques sur les transports..... | | 141 |
| I.1. | Étude des effets des changements climatiques sur le réseau routier écossais (Galbraith <i>et al.</i> , 2005)..... | 141 |
| I.2. | Effets des changements climatiques sur les politiques et les normes du réseau autoroutier 3CAP (Scott Wilson, 2009) | 143 |
| I.3. | Prendre en compte les effets des changements climatiques sur les chaussées routières (AIPCR, 2012)..... | 144 |
| I.4. | Les répercussions des phénomènes météorologiques, du climat et des changements climatiques sur la sécurité ferroviaire (RSSB, 2003) | 146 |
| I.5. | Tour d’horizon des effets des changements climatiques sur le secteur ferroviaire (Baker et al., 2010) | 148 |
| I.6. | Projet ARISCC d’adaptation de l’infrastructure ferroviaire aux changements climatiques (Nolte et al., 2011)..... | 149 |
| I.7. | Incidences des changements climatiques en particulier sur l’infrastructure routière et ferroviaire (CE, 2012a)..... | 151 |
| I.8. | Changements climatiques et navigation: transport par voie d’eau, ports et voies navigables (AIPCN, 2006) | 153 |
| I.9. | Risques climatiques et activité portuaire – Terminal Marítimo Muselles el Bosque, Carthagène, Colombie (Stenek et al., 2011) | 154 |
| I.10. | Les réseaux de transport résilients du futur (FUTURENET): Une évaluation de la sécurité des réseaux de transport face aux changements climatiques (Bouch et al., 2012)..... | 155 |
| I.11. | Initiative de l’Union européenne pour l’intégration des réseaux transeuropéens de transport (RTE-T) | 156 |
| I.12. | Changements climatiques, incidences et vulnérabilité dans l’Europe de 2012. Rapport établi à partir d’indicateurs (AEE, 2012)..... | 157 |

| | | |
|--------|---|-----|
| I.13. | Étude de la côte du golfe du Mexique aux États-Unis..... | 158 |
| I.13.1 | Étude de la côte du golfe du Mexique, Phase I (CCSP, 2008)..... | 158 |
| I.13.2 | Étude sur la côte du golfe du Mexique, Phase II (Ministère américain des transports, 2012)..... | 159 |
| I.14. | Méthode polonaise d'évaluation de la sensibilité aux changements climatiques (Barbara RYMSZA) | 161 |

Annexe II: Conférence internationale sur l'adaptation des réseaux de transport aux changements climatiques (juin 2012, Alexandroupolis, Grèce) 167

| | | |
|--------|---|-----|
| II.1. | Changements climatiques: vue d'ensemble du contexte scientifique et des incidences possibles sur le transport | 167 |
| II.2. | Sensibilisation à l'adaptation des réseaux de transport internationaux: le rôle du secrétariat de la CCNUCC (E. Resende, Programme d'adaptation, CCNUCC) | 168 |
| II.3. | L'expérience des aléas naturels et des mesures préventives dans les chemins de fer japonais (Y. Mizukami, Japan Railway East, JR East)..... | 170 |
| II.4. | Adaptation aux changements climatiques: incidences et cahier des charges pour le secteur ferroviaire (L. Lochman, Communauté européenne du rail et des compagnies d'infrastructures - CER)..... | 171 |
| II.5. | Mobilité et changements climatiques: quel sens pour un prestataire de mobilité durable? (A. Kaddouri, SNCF, contact Climat & Énergie, Direction du développement durable)..... | 172 |
| II.6. | Mesures d'adaptation et cahier des charges pour prévenir les incidences des changements climatiques sur les réseaux routiers – Le cas de l'autoroute Attica Tollway (D. Mandalozis, Attikes Diadromes SA) | 174 |
| II.7. | Incidences des changements climatiques et cahier des charges de l'adaptation du réseau routier (D. Tsamboulas, École nationale polytechnique d'Athènes - NTUA) | 176 |
| II.8. | Transport et changements climatiques aux États-Unis: la réponse aux enjeux de l'adaptation (J. Potter, ICF International)..... | 177 |
| II.9. | Adaptation des infrastructures fluviale (N. Siedl, Via Donau – Österreichische Wasserstraßen-Gesellschaft mbH) | 178 |
| II.10. | Les changements climatiques et les voies navigables: la question de la morphologie et de la subsidence (B. Turpjin, Ministère néerlandais des infrastructures et de l'environnement - Rijkswaterstaat)..... | 179 |
| II.11. | Changements climatiques et adaptation des voies navigables (C. Heyndrickx et T.Breemersch, Transport & Mobility Leuven)..... | 179 |
| II.12. | Passage des navires par le détroit du Bosphore et développement d'un corridor de transport multimodal pour relier la mer Égée et la mer Noire (Autorités portuaires d'Alexandroupolis et autorités portuaires de Kavala)..... | 180 |
| II.13. | Adaptation des réseaux de transport aux changements climatiques (L.B. Barbeau Mauritius Ports Authority)..... | 181 |
| II.14. | Changements climatiques et infrastructures portuaires: analyse qualitative des conséquences, planification et cahiers des charges (A. Becker, université de Stanford) .. | 182 |
| II.15. | Incidences des changements climatiques sur les transports dans les petits États insulaires en développement des Caraïbes (A.F. Velegrakis, Département des sciences de la mer, université de la mer Égée, Grèce) | 183 |

| | | |
|--------|--|-----|
| II.16. | Adaptation des infrastructures et des services de transport. Les travaux de la CESAP (P. O'Neill, Commission économique et sociale des Nations Unies pour l'Asie et le Pacifique , CESAP)..... | 185 |
| II.17. | Changements climatiques et adaptation des ports et de la logistique de transports: un kaléidoscope (Adolf Ng, université polytechnique de Hong Kong) | 186 |
| II.18. | Solutions innovantes concernant les effets des changements climatiques sur les réseaux de transport (R. Sfakianaki, Ministère de l'infrastructure et des réseaux de transport, République hellénique)..... | 187 |
| II.19. | Incidences des changements climatiques et possibilités d'adaptation des réseaux de transport en Grèce (N. Mitsakis, Centre de recherche technique – Institut hellénique des transports, CERTH-HIT)..... | 188 |
| II.20. | La France en action: Plan national d'adaptation au changement climatique (PNACC, 2011 – 2015) – Mesures sur les infrastructures et services de transport (André Leuxe – Direction générale des infrastructures, des transports et de la mer (DGITM) – Ministère français de l'écologie du développement durable, des transports et du logement)..... | 189 |
| II.21. | Conclusions et recommandations de la Conférence..... | 192 |

Annexe III: Contributions supplémentaires pour le Groupe d'experts chargé d'étudier les effets des changements climatiques et l'adaptation à ces changements dans les réseaux de transport internationaux 197

| | | |
|--------|--|-----|
| III.1. | Effets des changements climatiques et adaptation à ces derniers de l'infrastructure de transports routiers et ferroviaires (F. Nemry, H. Demirel, CCR/IPTS)..... | 197 |
| | Introduction..... | 197 |
| | Méthode..... | 197 |
| | Principaux résultats..... | 198 |
| | Incidences futures sur les infrastructures routières..... | 198 |
| | Vulnérabilité et adaptation..... | 198 |
| III.2. | Adaptation aux changements climatiques: impact et exigences pour le secteur ferroviaire (Libor Lochman, Directeur général de la CER)..... | 199 |
| | Contexte politique de l'Union européenne..... | 199 |
| | Conclusion..... | 201 |
| III.3. | Étude de cas SNCF..... | 202 |
| III.4. | Mesures d'atténuation des changements climatiques sur le fonctionnement du rail (John Dora CEng FICE FRMetS, John Dora Consulting Ltd)..... | 203 |
| | Contexte..... | 203 |
| | Les changements climatiques ne sont pas le seul changement..... | 204 |
| | Amélioration de la résilience et de la fiabilité..... | 204 |
| | Calendrier de l'investissement en vue de l'adaptation..... | 207 |
| | Conclusions..... | 207 |
| III.5. | Incidence des changements climatiques sur le transport fluvia..... | 208 |
| | Incidences sur l'hydrologie des cours d'eau..... | 208 |
| | Effets sur le transport fluvia..... | 209 |
| | Conclusions..... | 210 |
| | Références..... | 211 |

Annexe IV: Questionnaire 213

Annexe V: Résultats de l'enquête (questionnaire)..... 225

Liste des Figures

- Figure 1.** Évolution de la température moyenne de l'air dans le monde (en °C): (a) anomalies annuelles; (b) anomalies décennales moyennes. Légende: tracé noir, données HadCRUT3, du Hadley Centre (services météorologiques britanniques) et de l'université d'East Anglia (UEA); zone grise: intervalle de confiance de 9%; tracé rouge, MLOST, du centre de données nationales sur le climat de l'Administration américaine des océans et de l'atmosphère (NOAA) (période de référence: 1880–1899); tracé bleu, GISTemp du Goddard Institute de la NASA (période de référence: 1880–1899). (Source : AEE, 2012). 2
- Figure 2.** Changements observés dans les précipitations sur la période 1951-2010 (GIEC, 2013). 3
- Figure 3.** (a) Évolution du niveau mondial de la mer, 1860-2010 (Rahmstorf, 2011) mettant en évidence une accélération de la tendance. (b) Évolution du niveau de la mer en 1970-2008 par rapport à 1990. Le trait rouge épais correspond aux mesures effectuées par les marégraphes et lissées pour éliminer les variations interannuelles. Le trait bleu correspond aux observations des satellites. La courbe grisée correspond aux projections antérieures du GIEC (Richardson et al., 2009). 4
- Figure 4.** Projections récentes relatives à l'élévation du niveau de la mer à l'horizon 2100 par rapport aux prévisions du GIEC (2007a). Légende: colonne 1, GIEC (2007a), 0,18-0,59 m; colonne 2, Rahmstorf et al. (2007); colonne 3, Horton et al. (2008); colonne 4, Rohling et al. (2008); colonne 5, Vellinga et al. (2008); colonne 6, Pfeffer et al. (2008); colonne 7, Kopp et al. (2009); colonne 8, Vermeer et Rahmstorf (2009); colonne 9, Grinsted et al. (2010); colonne 10, Jevrejeva et al. (2010); colonne 11, Jevrejeva et al. (2012); colonne 12, Mori et al. (2013); colonne 13, GIEC (2013). La variabilité des projections est due à des hypothèses et des démarches parfois différentes. 5
- Figure 5.** Évolution du niveau de la mer dans différents sites européens d'implantation de stations marégraphiques (1970-2010) (mouvements de terrain locaux non pris en compte) (à partir de AEE (2012), voir aussi <http://www.psmsl.org/products/trends>). 6
- Figure 6.** Catastrophes naturelles dans les pays membres de l'AEE (1980-2011). On observe une tendance croissante aux tempêtes violentes, inondations, mouvements de masse ou glissements de terrain, vagues de chaleur, sécheresses et feux de forêt, le nombre de catastrophes naturelles induites par des événements géophysiques étant resté à peu près stable durant cette période. Ces événements ont causé des pertes s'élevant à 455 milliards de dollars, dont 126 milliards ont été pris en charge par les assurances (AEE, 2012). 7
- Figure 7.** Évolution prévue des précipitations moyennes dans les années 2090 (par rapport à la moyenne des années 1990) en Amérique du Nord, par degré d'intensité (précipitations faibles, modérées ou fortes, voir aussi GIEC, 2007a). Les précipitations faibles devraient diminuer et les fortes précipitations augmenter. Il convient de noter que les changements sont plus importants dans le scénario d'émissions élevées (Karl et al., 2009). 8
- Figure 8.** Images satellite (MODIS sur le satellite Terra de la NASA) des inondations dans l'est de l'Allemagne, début juin 2013. (a) Image captée le 05/05/2013 (avant la crue) ; (b) Image captée le 06/06/2013 (pendant la crue). Fin mai, début juin 2013, des pluies particulièrement fortes ont provoqué des crues importantes en Allemagne, en Autriche et en République tchèque. Ce jour-là, l'Elbe a atteint 8,76 mètres de haut, alors que son niveau normal est de 2 m. L'eau du fleuve apparaît en bleu foncé et en noir, et la végétation est de couleur vert vif. Les nuages sont bleu-vert pâle et projettent des ombres. (<http://earthobservatory.nasa.gov/NaturalHazards/view.php?id=81287>) 9

| | | |
|-------------------|--|----|
| Figure 9. | Risque (probabilité : 95 %) actuel de crues centennales dans la région eurasienne de la CEE. Calculs effectués à partir d'un modèle SIG reposant sur une série chronologique sur l'écoulement des cours d'eau. Résolution d'un modèle altimétrique numérique (MAN), 90 m. Les zones situées au-delà de 60 degrés de latitude nord ne sont pas intégralement couvertes, en raison des limites du modèle (GRID du PNUE et SIPC, 2008)..... | 9 |
| Figure 10. | Évolution relative des dommages annuels dus aux crues prévues en Europe, entre la période couverte par le scénario (2071–2100) et la période de référence (1961–1990) (http://ies.jrc.ec.europa.eu/)..... | 10 |
| Figure 11. | Distribution de la fréquence des anomalies thermiques d'été sur les terres émergées européennes par rapport à 1970-1999 (Coumou et Rahmstorf, 2012). | 11 |
| Figure 12. | Fréquence prévue des canicules (moyenne 2080-2099). Des simulations pour 2080-2099 montrent que des situations extrêmes rares (événements vicennaux) deviendront plus fréquentes en Amérique du Nord. Une vague de chaleur vicennale pourrait devenir biennale, voire annuelle d'ici à la fin du siècle, dans de nombreuses régions d'Amérique du Nord, dans le scénario d'émissions élevées (Karl et al., 2009)..... | 12 |
| Figure 13. | Période de récurrence prévue des sécheresses centennales dans les années 2070 (1961–1990), calculée par deux modèles climatiques, ECHAM4 et HadCM3 (SREX, 2012). | 12 |
| Figure 14. | Concentration de CO ₂ (en parties par million (ppm)) dans l'atmosphère ces 11 000 dernières années (Rahmstorf, 2011) et ces 50 dernières années (chiff es Mauna Loa, P. Tans (www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/) et R. Keeling (scrippsco2.ucsd.edu/), 2013). Les premières analyses effectuées sur les données les plus récentes semblent indiquer que les concentrations de CO ₂ ont encore augmenté, franchissant la barre de 400 ppm depuis 800 000 ans le 9 mai 2013 (http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends). Sont également représentées les concentrations de CH ₄ (en parties par milliard (ppb)) (http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/figures/atmospheric-concentration-of-ch4-ppb-1) et la concentration totale des six gaz à effet de serre répertoriés dans le protocole de Kyoto (ppm équivalent CO ₂), qui a augmenté d'environ 60 % par rapport à son niveau de l'ère préindustrielle (http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/figures/observed-trends-in-the-kyoto-gases-1). | 14 |
| Figure 15. | (a). Recul de la banquise en Arctique : étendue en septembre 1982 et en septembre 2007, et projections pour les fins d'été à venir (2010-2030, 2040-2060 et 2070-2090) (http://maps.grida.no/go/graphic/the-decrease-of-arctic-sea-ice-minimum-extent-in-1982-and-2007-and-climate-projections-norwegian). (b) Résultats et observations des modèles relatifs au recul de la banquise (Rahmstorf, 2011). | 15 |
| Figure 16. | Réseaux mondiaux de transports https://qed.princeton.edu/index.php/User:Student/World_Transportation_Patterns | 19 |
| Figure 17. | Densité des réseaux routiers (carte a) et ferroviaires (carte b) par millier d'habitants dans la région de la CEE (CEE-ONU, 2011)..... | 20 |
| Figure 18. | Retards (en minutes) dans les transports ferroviaires britanniques en raison de phénomènes météorologiques extrêmes (Rona, 2011). Légende: retards en été = bleu; retards en automne = rouge ; retards en hiver = jaune; retards au printemps = vert. | 21 |
| Figure 19. | Échanges internationaux (importations et exportations) dans la région de la CEE en pourcentage du PIB (CEE-ONU, 2011)..... | 21 |
| Figure 20. | Grandes lignes internationales de chemins de fer et de transport combiné dans la région eurasienne de la CEE (CEE-ONU, 2009). | 22 |
| Figure 21. | (a) Métro de New York (http://www.bbc.co.uk/news/world-us-canada-20135420). (b) Inondation dans une rue de New York (http://eandt.theiet.org/news/2012/nov/sandy-storm-warning.cfm) après le passage de l'ouragan Sandy (30 octobre 2012). | |

| | | |
|-------------------|--|----|
| | Selon les estimations, les pertes assurées seraient de l'ordre de 10 à 20 milliards de dollars et les pertes économiques totales de l'ordre de 30 à 50 milliards de dollars (EQECAT, 2012). | 23 |
| Figure 22. | (a) Les ondes de tempête, les vagues et les courants de l'ouragan Isabel (août 2003) ont creusé un chenal sur l'autoroute 12, à travers l'île de Hatteras (Caroline du Nord, États-Unis). L'océan Atlantique est à gauche de l'image, tandis que les débris de la chaussée sont visibles à droite (Stockdon et al., 2012). (b) Les ondes de tempête, les vagues et les courants de l'ouragan Sandy (octobre 2012) ont détruit une route surélevée à Mantoloking, dans le New Jersey (AP Photo/Doug Mills) (Doran et al., 2012). (c) Images lidar des élévations de l'île de Hatteras (Caroline du Nord) avant (à gauche) et après (au milieu) le passage du cyclone Isabel, mettant en évidence l'érosion et le chenal percé dans le banc de sable (voir aussi la photographie aérienne, à droite) (Stockdon et al., 2012). | 24 |
| Figure 23. | Routes risquant d'être touchées par une élévation du niveau de la mer d'environ 1,2 m, une valeur retenue dans des scénarios d'émissions moyennes et élevées dans cette partie du golfe du Mexique (États-Unis) au cours du siècle. En l'occurrence, plus de 3 800 kilomètres de grands axes routiers devraient être inondés (CCSP, 2008; Karl et al., 2009). | 25 |
| Figure 24. | Risque d'inondations et de dommages aux éléments d'infrastructure routière, ferroviaire, aéroportuaire et pétrolières au port de Mobile (golfe du Mexique) en cas d'onde de tempête survenant dans un scénario de cyclone Katrina modifié et pour une élévation moyenne du niveau de la mer de 0,75 m: (a) hauteur de l'onde de tempête (en mètres par rapport au sol actuellement au sec); (b) hauteur des vagues. L'étude a montré que les moyens de transport essentiels de Mobile ne seraient presque pas touchés par une élévation du niveau de la mer comprise entre 0,3 m et 0,75 m, étant donné que cela n'exposerait que 0 % à 2 % du matériel essentiel au bon fonctionnement de chaque moyen de transport; dans un scénario plus pessimiste (élévation de deux mètres), l'exposition du matériel essentiel au bon fonctionnement de chaque moyen de transport serait compris entre 2,5 % et 50 % (Ministère américain des transports, 2012a)..... | 26 |
| Figure 25. | Ports situés à moins de 50 km de la trajectoire d'une tempête tropicale (1960–2010). Statistiques sur les ports et les tempêtes: National Geospatial-Intelligence Agency (2011) et Knapp et al. (2010). (Becker et al., 2013). | 28 |
| Figure 26. | Dommages provoqués par l'inondation de routes. (a) Autoroute 8 (Munich-Salzburg) à Grabenstaett près de Traunstein, sud de l'Allemagne (début juin 2013, Matthias Schrader, AP); (b) Affaissement de la chaussée entre Lofer et Waidring, dans le Tyrol (Autriche) (3 juin 2013, Kerstin Joensson, AP); (c) nœud autoroutier inondé à Deggenfdorf; (d) effondrement d'un pont dans le comté de Cumbrie (Royaume-Uni) en novembre 2009 (http://news.bbc.co.uk/2/hi/uk_news/8369934.stm) | 30 |
| Figure 27. | Risques de dégâts liés aux crues en Europe (AEE, 2010). Les estimations ont été calculées dans l'hypothèse d'un événement centennal (par exemple crue centennale) dans les conditions climatiques actuelles et sans dispositif particulier de protection. Les bassins versants de moins de 500 km ² n'ont pas été retenus. | 31 |
| Figure 28. | Risque actuel de crues (probabilité de 95 %) pour les réseaux de transport en Ukraine et dans les pays d'Asie centrale membres de la CEE, correspondant aux crues centennales, à partir d'un modèle SIG reposant sur une série chronologique de débits fluviaux (projections de crues provenant de GRID (PNUE) et de la SIPC (2008)). | 32 |
| Figure 29. | Variations prévues du ruissellement médian sur la période 2041-2060 (par rapport à la période 1901-1970). Les zones hachurées correspondent à une concordance élevée entre projections et les zones lisses à des projections qui sont moins concordantes. Les résultats sont fondés sur des émissions situées entre les scénarios d'émissions élevées et d'émissions basses (Milly et al., 2008). | 33 |

| | | |
|-------------------|--|----|
| Figure 30. | Distribution (nombre et pourcentage prévus) des ponts d'autoroutes vulnérables aux débits de pointe dus aux changements climatiques (scénario d'émissions A1B, phénomène centennal, précipitations sur 24 heures pour la période 2046-2065 (Wright et al., 2012))..... | 34 |
| Figure 31. | Évolution prévue des chutes de neige annuelles en Europe (AEE, 2012) à partir de six modèles et pour le scénario d'émissions A1B. (a) Moyenne des jours de chutes de neige (1 cm) par an sur la période 1971-2000 et 2041-2070; (b) Moyenne des chutes de neige (10 cm) pour les mêmes périodes à venir et de référence. | 35 |
| Figure 32. | (a) Nombre moyen de jours par hiver (décembre-janvier-février) marqué par des bourrasques de plus de 17 m/s sur la période 1971-2000; (b) Moyenne des jours de bourrasque de même intensité sur la période 2041-2070 (Vajda et al., 2012). | 36 |
| Figure 33. | Nombre moyen de jours par an où la température maximale dépasse la température critique des voies et impose une limitation de vitesse à 30 km/h par rapport à la situation actuelle (scénario A1B) (Commission européenne, 2012a)..... | 38 |
| Figure 34. | Évolution de la température maximale de la chaussée sur sept jours et dans différentes zones climatiques d'Europe, dans l'hypothèse du scénario A1B (comparaison entre les périodes 2040-2070 et 1990-2010) (Commission européenne, 2012a). | 39 |
| Figure 35. | Prévision des risques d'incendie en bilan saisonnier des indices de risque (Seasonal Severity Rating (SSR) à partir de projections du modèle climatique régional RACMO2, lui-même basé sur le modèle ECHAM5 et le scénario A1B du SRES (AEE, 2012). Selon ces résultats, les changements climatiques pourraient considérablement accroître le risque d'incendie dans le sud-est et le sud-ouest de l'Europe, mais aussi dans la région de la mer Noire. | 40 |
| Figure 36. | Conséquences de la sécheresse de 2003 sur les voies navigables intérieures en France. Les voies fermées à la navigation apparaissent en rouge, celles où la navigation a été limitée le 30 août 2003 sont en jaune (Leuxe, 2011, source: VNF). | 41 |
| Figure 37. | Projections sur 30 ans du débit mensuel moyen à Lobith (Rhin) sur la période 2017-2100, selon différents modèles climatiques. Tous les modèles mettent en évidence une baisse importante de l'écoulement moyen en été (Ben van de Wetering, 2011). | 42 |
| Figure 38. | Répartition prévue (à l'horizon 2090) du pergélisol dans le nord de la région de la CEE par rapport au début du XXI ^e siècle (ACIA, 2005). | 44 |
| Figure 39. | Routes exposées au pergélisol en Alaska (U.S. Artic Research Commission, 2003). | 45 |
| Figure 40. | Simulation de l'évolution à long terme du rendement de la culture de pomme de terre en Europe (Supit et al., 2010). Légendes: bleu = baisse importante du rendement ; rouge = augmentation importante du rendement..... | 47 |
| Figure 41. | Calendrier des infrastructures de transport et des changements climatiques (CCSP, 2008). Compte tenu de la durée de construction et de vie des infrastructures, les effets du changement climatique doivent être pris en compte dès les premières étapes de la planification, de la conception et de la construction de ces infrastructures. | 51 |
| Figure 42. | Réponses obtenues sur les principaux publics à sensibiliser aux effets des changements climatiques sur les transports..... | 52 |
| Figure 43. | Réponses obtenues concernant les études sur certains facteurs météorologiques et climatologiques touchant (a) les infrastructures de transport; (b) l'exploitation et les services de transport. | 53 |
| Figure 44. | Classement des acteurs et des entités considérés importants pour l'étude, la recherche et la diffusion d'informations sur les effets des changements climatiques sur les transports. | 54 |
| Figure 45. | Mesures prises ou prévues pour renforcer la résilience des réseaux de transport telles qu'indiquées dans les réponses. | 55 |

| | | |
|----------------------|---|-----|
| Figure 46. | Modèles et outils informatiques (cités par certaines personnes interrogées) permettant de prévoir les effets du risque climatique sur les infrastructures de transport [question 28]..... | 56 |
| Figure 47. | Domaines prioritaires devant être approfondis, selon les réponses données. | 57 |
| Figure 48. | Mécanismes de collaboration considérés utiles dans l'adaptation des transports aux changements climatiques..... | 57 |
| Figure 49. | Modes de coopération internationale considérés utiles à la recherche de solutions face aux effets des changements climatiques et à la nécessité de s'y adapter. | 58 |
| Figure 50. | Effets des changements climatiques sur les infrastructures et les services de navigation intérieure. | 59 |
| Figure 51. | Décisions sur les coûts de construction d'infrastructures de transport (analyse effectuée par le secrétariat de la CEE)..... | 65 |
| Figure 52. | Modèle HAAFM de l'agence britannique des autoroutes (UK Highways Agency, 2009). | 69 |
| Figure 53. | Durée de vie des actifs (UK Highways Agency, 2011). | 70 |
| Figure 54. | Vulnérabilité du territoire français aux risques côtiers – cartographie des zones de faible élévation..... | 79 |
| Figure 55. | Linéaire d'infrastructures de transport dans les zones de faible élévation des régions françaises, en kilomètres..... | 80 |
| Figure 56. | (a) Protection contre l'affouillement; (b) Renforcement du talus; (c) Écran coupe-vent; (d) Auvent de protection contre les avalanches. | 94 |
| Figure 57. | Mesures d'adaptation pour la flot e de navigation intérieure (Heyndrickx et Breemersch 2012): a) Volets amovibles qui se replient sous la coque en cas d'utilisation de tout le tirant d'eau, pour la navigation en eau profonde (image du haut) et qui se déploie lorsque le bateau navigue en eaux peu profondes (image du bas); (b) vue verticale d'un bateau équipé de caissons latéraux de flottaison; (c) Coupe transversale d'un navire fluvial équipé d'éléments latéraux extractibles de flottaison; (d) vue rapprochée des éléments de flottaison | 99 |
| Figure 58. | La dégradation du lit des cours d'eau peut avoir des conséquences importantes sur la navigation, en particulier sur les ouvrages de consolidation du fonds. Les solutions techniques peuvent être (a) des vannes de fond ou (b) des radiers (Turpjin, 2012). Dans ces cas, il convient d'envisager des travaux de réaménagement ou de rééquipement..... | 99 |
| Figure 59. | Mesures d'ingénierie fluviale utilisées dans le projet pilote de Witzelsdorf (Siedl, 2012). Les anciens épis (en jaune) sont remplacés par des épis mieux conçus afin de modifier l'écoulement de l'eau et la dynamique de formation de sédiments..... | 100 |
| Figure 60. | Projets de protection et d'agrandissement des ports (AIP, 2010; Becker, 2012) | 103 |
| Figure 1. | Variation du nombre de jours avec une température $T_{\min} < 0^{\circ}\text{C}$ (médiane)..... | 163 |
| Figure 2. | Variation du nombre de jours avec une température $T_{\min} < -20^{\circ}\text{C}$ (90 ^e centile)..... | 163 |
| Figure III.1. | Éléments, processus et flux d'information pour une gestion intégrée des risques naturels. | 205 |
| Fig. III. 2. | Évolution du débit du Rhin jusqu'en 2050 environ (source: Deltares, 2007). Légendes: G = élévation modérée de la température; Gp = élévation modérée de la température et modification de la circulation du vent; W = élévation plus importante de la température; Wp = élévation plus importante de la température et modification de la circulation du vent..... | 209 |
| Figure III.3. | Débits à différentes stations de mesure de la Waal (source: Rijkswaterstaat, 2007)..... | 210 |



Pont ferroviaire de Putna Seaca (Roumanie) endommagé par des inondations en 2005 © Club Ferroviar

Liste des Tableaux

| | | |
|--------------------|---|----|
| Tableau 1. | Valeurs moyennes mondiales de la température de surface et du niveau de la mer sur la période 2081-2100 (fourchettes moyenne et probable) par rapport à la période 1986–2005, selon différents scénarios (d'après GIEC, 2013). Les prévisions sont calculées selon quatre scénarios de forçage radiatif (profils représentatifs de l'évolution de concentration (RCP)): RCP 8.5, 6184 Gt CO ₂ (cumul des émissions de CO ₂ sur 2012-2100); RCP 6.0 3890 Gt CO ₂ ; RCP 4.5, 2863 Gt CO ₂ ; RCP 2.6, 991 Gt CO ₂ . Les changements de la température moyenne de surface sont calculés à partir de l'ensemble de modèles CMIP5 (plages de 5 % à 95 % des modèles). Les estimations relatives à l'élévation du niveau de la mer reposent sur 21 modèles CMIP5 (plages de 5 % à 95 % des modèles). L'évolution rapide dans la dynamique des calottes glaciaires et le stockage anthropique de l'eau dans les terres émergées sont considérés comme ayant des distributions de probabilité uniformes et comme étant en grande partie indépendants du scénario, étant donné que l'état actuel des connaissances ne permet pas d'évaluer cette dépendance de façon qualitative..... | 2 |
| Tableau 2. | Points de basculement, conséquences préoccupantes, valeurs de seuil en matière d'impact et probabilité de réalisation pour les 50 prochaines années (voir aussi Lawrence et Slater, 2005; Zimov et al., 2006; Vecchi et al., 2006; Challinor et al., 2006; Scholze et al., 2006; Rahmstorf, 2007; Barnett et al., 2008; Kurz et al., 2008; Lenton, 2013; Lenton et al., 2008, 2009; Shanahan et al., 2009). | 16 |
| Tableau 3. | Effets des changements climatiques sur les ports maritimes (Crist, 2011). | 27 |
| Tableau 4 | Récapitulatif des effets possibles des changements climatiques sur les transports (liste non exhaustive)..... | 48 |
| Tableau 5. | Interactions possibles entre facteurs du changement climatique et infrastructures de transport (UK Royal Academy of Engineering, 2011). La probabilité de dommages aux infrastructures et d'autres effets des changements climatiques est considérée élevée (H = high), moyenne (M) ou faible (L = low). Il convient de noter que: (a) les effets de phénomènes récurrents ou cumulés sont différents de ceux liés à un phénomène isolé; (b) des conditions météorologiques défavorables constantes s'accompagneront probablement d'investissements modestes, tandis que des événements sporadiques, même s'ils sont plus graves, pourraient avoir l'effet inverse; (c) les effets des changements climatiques varient selon les zones géographiques et des infrastructures différentes présentent des degrés de résilience différents; il est plus facile de mettre en place des déviations en cas d'endommagement d'une route que de gérer les conséquences de dégâts survenus dans un aéroport; (d) les changements climatiques peuvent entraîner des modifications dans la végétation, qui peuvent à leur tour se répercuter sur les infrastructures; (e) les sollicitations saisonnières sur les infrastructures peuvent aussi créer un stress supplémentaire; (f) les changements climatiques pourraient entraîner des changements dans l'affectation des terres, ce qui pourrait à son tour nécessiter des modifications au niveau des infrastructures. | 66 |
| Tableau 6. | Risques climatiques identifiés par l'Agence et exemples concrets..... | 69 |
| Tableau 7. | Changements climatiques éventuels, effets sur les transports terrestres et choix d'adaptation (voir National Research Council, 2008)..... | 72 |
| Tableau 8. | Linéaire dans chaque zone de faible élévation et infrastructure routière et ferroviaire (en kilomètres) en France (Ne tient pas compte des ouvrages de protection existants. Calculs en référence aux niveaux marins centennaux actuels) | 80 |
| Tableau 9. | Aperçu des risques pesant sur les actifs ferroviaires (Network Rail, 2011). | 83 |
| Tableau 10. | Résumé des priorités au niveau des actifs et de l'exploitation. Les priorités feront l'objet d'un examen permanent (Network Rail, 2011). | 86 |

| | | |
|-----------------------|--|-----|
| Tableau 11. | Risques importants et solutions possibles (Dora, 2011; 2012 voir aussi annexe III)..... | 87 |
| Tableau 12. | Changements climatiques éventuels, effets sur les transports ferroviaires et solutions d'adaptation (National Research Council, 2008)..... | 89 |
| Tableau 13. | Effets des changements climatiques sur le transport ferroviaire (Kaddouri, 2012)..... | 95 |
| Tableau 14. | Mesures possibles d'adaptation à une élévation des températures et à des canicules (Kaddouri, 2012). | 96 |
| Tableau 15. | Effets des changements climatiques sur les principales voies navigables de l'Union européenne (Heyndrickx et Breemersch, 2012)..... | 97 |
| Tableau 16. | Mesures d'adaptation de la flotte et évaluation préalable (Heyndrickx et Breemersch, 2012)..... | 98 |
| Tableau 17. | Stratégies d'adaptation des ports australiens (d'après McEvoy et Mullett, 2013) | 104 |
| Tableau 1. | Catégories climatiques définies par convention ayant une influence notable sur le secteur du transport..... | 161 |
| Tableau 2. | Échelle de sensibilité du secteur des transports aux effets climatiques..... | 161 |
| Tableau 3. | Degré d'influence des CC sur le secteur des transports..... | 162 |
| Tableau 4. | Valeurs moyennes prévues des facteurs climatiques décrivant les changements climatiques en Pologne | 164 |
| Tableau 5. | Sensibilité des infrastructures de transport à l'influence du climat | 165 |
| Tableau III.1. | Le plan d'adaptation de la SNCF en bref | 203 |
| Tableau III.2. | Exemples de risques importants rencontrés sur le réseau ferré britannique, et solutions envisageables..... | 206 |

Résumé

Même si, depuis quelques années, les gouvernements et les organisations internationales prennent en considération les effets des changements climatiques sur diverses activités humaines, on ne s'est guère soucié de l'incidence de ces phénomènes sur l'infrastructure et le fonctionnement des réseaux de transport internationaux, ni des mesures d'adaptation à prévoir. Conscients de la nécessité de mener une action concertée, des experts de divers pays, organisations internationales et universités ont créé, sous les auspices de la Commission économique pour l'Europe, le Groupe d'experts chargé d'étudier les effets des changements climatiques et l'adaptation à ces changements dans les réseaux de transport internationaux. Le Groupe s'est réuni six fois et a organisé une conférence internationale sur cette question en juin 2012. Des informations provenant de la région de la CEE et au-delà ont été analysées et les conséquences éventuelles de la variabilité du climat et des changements climatiques pour les infrastructures et services de transports ont été mises en évidence. Il a été procédé à la collecte de renseignements (par le biais d'une enquête) sur a) le niveau actuel de sensibilisation et de préparation, b) les informations et outils disponibles, c) les politiques d'adaptation des transports existantes et celles qu'il est prévu de prendre, d) les mesures et les initiatives, e) les besoins en matière de recherche et de financement, ainsi que les mécanismes de collaboration aux niveaux national, régional et international. Les initiatives, études de cas et projets nationaux de recherche pertinents ont été passés en revue, et des données d'expérience sur les mesures d'adaptation propres à tel ou tel mode de transport ont été échangées, de même que des données sur les meilleures pratiques suivies en matière de politiques nationales relatives à la gestion des risques et au renforcement de la résilience. Les experts ont conclu qu'il importait de favoriser une sensibilisation accrue à la nécessité d'évaluer les effets des changements climatiques sur le secteur des transports ainsi qu'aux mesures d'adaptation.

Variabilité du climat et changements climatiques: tendances et projections

L'évolution climatique actuelle et les prévisions pour l'avenir laissent clairement présager une augmentation à long terme de la température moyenne ambiante. Les caractéristiques des précipitations changent également, mais de manière plus complexe. Ces tendances devraient se maintenir, voire s'intensifier à l'avenir. Une élévation importante du niveau moyen des mers compte au nombre des effets néfastes de la hausse de la température. Depuis 1860, le niveau des mers s'est élevé d'environ 0,2 m, et les informations satellitaires indiquent que cette élévation s'accélère progressivement depuis les années 1990. Dans son récent rapport (cinquième Rapport d'évaluation), le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC, 2013) a indiqué qu'il prévoyait des augmentations de température de 1,0 à 3,7 °C (selon le scénario envisagé) d'ici à la fin du XXI^e siècle. De telles hausses des températures pourraient également provoquer une montée non négligeable du niveau moyen des mers (de l'ordre de 0,26 à 0,82 m pendant cette même période selon les prévisions). D'autres études récentes prévoient des élévations encore plus importantes.

Des changements dans les conditions climatiques moyennes peuvent aussi entraîner des fluctuations dans la fréquence, l'intensité, l'étendue géographique, la durée et la périodicité des extrêmes météorologiques et climatiques, qui peuvent du même coup modifier les futures conditions climatiques. Les phénomènes extrêmes (tempêtes, ondes de tempête, inondations, sécheresses, canicules, etc.), ainsi que les changements qui surviennent au sein de systèmes climatiques donnés, tels que les moussons, peuvent avoir, à de plus petites échelles spatio-temporelles, des incidences plus graves sur les réseaux de transport que les

changements observés dans les variables moyennes. L'une des tendances les plus marquées semble être la fréquence et l'intensité croissantes des fortes précipitations. Les modèles climatiques prévoient que cette tendance se poursuivra et que les fortes précipitations qui surviennent actuellement tous les vingt ans environ devraient se produire à des intervalles compris entre quatre et quinze ans d'ici à 2100, selon les endroits. Les inondations dues aux crues constituent également un réel danger, en particulier en Europe centrale et orientale ainsi qu'en Asie centrale. Les données disponibles laissent entrevoir en outre une augmentation de la fréquence et de l'intensité des vagues de chaleur.

On considère que l'une des causes principales des hausses de température observées est l'augmentation des concentrations atmosphériques de gaz à effet de serre (gaz à effet de serre) qui absorbent la chaleur réfléchiée par la surface de la Terre et accroissent ainsi la chaleur emmagasinée par notre planète. Depuis la révolution industrielle, les concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère n'ont cessé d'augmenter et sont désormais supérieures à ce qu'elles ont jamais été depuis des millions d'années. Le réchauffement de la planète peut s'amplifier sous l'effet de rétroactions qui en accentuent l'effet, à savoir des phénomènes engendrés par les changements climatiques susceptibles de provoquer à leur tour un réchauffement supplémentaire, comme l'activation de réservoirs de carbone actuellement inertes (notamment les tourbières tropicales et les vastes quantités de CH₄ emmagasinées par le pergélisol de l'Arctique) et la réduction rapide de la surface occupée par les glaces de l'océan Arctique.

Conséquences pour les réseaux de transport

La demande de services de transport augmente au rythme de la croissance de l'économie mondiale, du commerce et de la population. Les transports étant une activité conditionnée par la demande, les modifications engendrées par les changements climatiques en ce qui concerne, par exemple, la répartition démographique, la production des produits de base (et leur répartition géographique), les flux touristiques, l'évolution du commerce et les modes de consommation peuvent également avoir des conséquences importantes.

La variabilité du climat et les changements climatiques (élévation moyenne du niveau des mers, hausse de la température de l'eau, intensité accrue des tempêtes et des ondes de tempête, modifications possibles du régime des vagues) peuvent avoir de graves incidences sur les infrastructures et services de transport côtiers, qu'il s'agisse des ports ou d'autres installations et réseaux de navigation côtière. Les ports, qui constituent des nœuds essentiels pour les réseaux de transport internationaux et qui relient les chaînes d'approvisionnement internationales, seront particulièrement touchés, en raison surtout de la longue durée de vie de leurs infrastructures, de leur emplacement exposé et de leur dépendance à l'égard du commerce, du transport maritime et des transports intérieurs, eux aussi vulnérables aux changements climatiques. Le fonctionnement quotidien des ports peut être directement touché par les ondes de tempête; les inondations du littoral auront des effets importants sur les infrastructures de transport côtier car elles les rendront inutilisables pendant la durée de l'inondation et occasionneront des dommages aux terminaux, installations de transport intermodales, centres logistiques, zones de stockage et cargaisons, perturbant ainsi les chaînes intermodales d'approvisionnement et les liaisons de transport.

Les changements des caractéristiques des précipitations peuvent entraîner des modifications du débit des cours d'eau qui sont susceptibles d'avoir une incidence sur les routes, les voies ferrées, les gares ferroviaires et routières, les installations portuaires et les aéroports. Les dommages directs survenant pendant un événement donné peuvent nécessiter des interventions d'urgence. Ces phénomènes peuvent également avoir des effets sur l'intégrité structurelle et l'entretien des routes, des voies ferrées, des ponts, des

tunnels, des systèmes d'évacuation de l'eau de pluie, des systèmes de télécommunications et des systèmes de gestion du trafic et entraîner ainsi la nécessité de procéder à des travaux d'entretien et de réparation plus fréquents. L'augmentation du nombre de fortes précipitations et d'inondations provoquera davantage d'accidents, de retards et de perturbations de la circulation attribuables aux conditions météorologiques dans des réseaux déjà engorgés. Les voies navigables pourront être exposées à la suspension de la navigation, à l'envasement, à des changements de morphologie du cours d'eau et à des dommages causés aux berges et aux aménagements de protection contre les inondations, tandis que les aéroports pourraient pâtir d'infrastructures endommagées et d'un nombre accru de retards et d'annulations.

Des vents extrêmement violents peuvent endommager les installations portuaires (grues et terminaux de chargement, par exemple) et les installations aéroportuaires, causer des interruptions du transport aérien et compliquer les activités routières et ferroviaires, détruire directement les récoltes et toucher indirectement le secteur des transports. Les changements de direction des vents et des vagues provoquées par le vent peuvent avoir des répercussions sur le fonctionnement et la sécurité des ports maritimes. Les épisodes de canicule peuvent également produire des effets sur les services et infrastructures de transport en provoquant des feux de friches et de mauvaises récoltes, en posant des problèmes d'approvisionnement en eau, de stockage des aliments et aux systèmes énergétiques, et en accroissant les besoins en matière de réfrigération. Ils peuvent également déformer ou endommager les chaussées et perturber la circulation routière, déformer les voies ferrées et assécher les remblais, provoquant d'importants retards liés aux limitations de vitesse. Les installations, les pistes et le fonctionnement des aéroports seront également touchés, tout comme les transports par voies navigables intérieures. Le rétrécissement de la calotte glaciaire de l'océan Arctique permettra peut-être l'ouverture de nouvelles voies maritimes, mais il aura aussi pour effet de modifier l'offre et la demande de services de transports régionaux ainsi que d'augmenter considérablement les coûts des liaisons entre les ports de l'Arctique et les principaux réseaux nationaux et internationaux de transport intérieur. Le réchauffement de l'Arctique pourrait également se répercuter sur les cycles de gel et de dégel, endommager les fondations des bâtiments, provoquer des soulèvements par le gel des routes et des voies ferrées et porter atteinte à l'intégrité des ponts et autres ouvrages d'art.

Recommandations

Pour éviter des dépenses considérables à l'avenir, les responsables de l'élaboration des politiques en matière de transports et les parties prenantes devraient se pencher d'urgence sur la question des changements climatiques. Bien comprendre les effets possibles des changements climatiques, ainsi que les risques et les facteurs de vulnérabilité connexes, constitue un premier pas indispensable pour être en mesure de concevoir et de mettre en place des infrastructures de transport résilientes et les systèmes de gestion correspondants. Il est à relever que dans les pays en développement qui ont une économie peu diversifiée, le secteur des transports sera particulièrement exposé, non seulement à des phénomènes extrêmes de grande ampleur et catastrophiques, mais aussi à des tensions de basse intensité liées à la hausse prévue des températures moyennes et à l'élévation du niveau moyen des mers, ainsi qu'aux inondations ou aux sécheresses, devenues plus fréquentes.

Les mesures d'adaptation visent à réduire les facteurs de vulnérabilité et à accroître la résilience des systèmes aux effets des changements climatiques. Dans le secteur des transports, on entend par résilience non seulement la résistance mécanique et la durabilité d'une infrastructure, qui lui permettent de supporter des effets néfastes sans que ses fonctions essentielles soient touchées, mais aussi son aptitude à retrouver son fonctionnement normal rapidement et à moindre coût. Aussi, les effets des changements climatiques doivent être pris en compte lors de la planification, la conception, la construction et l'exploitation, et plus

généralement dans les politiques économiques et les politiques de développement qui intéressent ce secteur. L'élaboration de stratégies d'adaptation efficace passe par une action des pouvoirs publics, des efforts d'investissement et une collaboration en matière de recherche. Des études de vulnérabilité bien ciblées, des études empiriques et l'évaluation des risques prévus et des coûts connexes sont considérées comme une première étape nécessaire pour combler les lacunes dans nos connaissances et pour définir des domaines d'intervention prioritaires.

Les recommandations générales ci-après sont basées sur l'expérience acquise à ce jour et sur les effets confirmés scientifiquement et prévisibles des changements climatiques. L'un des préalables de l'action des pouvoirs publics visant à concevoir et formuler des stratégies efficaces d'adaptation aux changements climatiques devrait être une bonne connaissance des facteurs de vulnérabilité du secteur des transports à la variabilité du climat et aux changements climatiques et une cartographie systématique de ces facteurs fondée sur la nature et l'ampleur des changements, le degré de fragilité des systèmes de transport et la nécessaire capacité d'adaptation. Il est recommandé que:

- (i) Les gouvernements, en collaboration avec les propriétaires et exploitants d'infrastructures de transport et les organisations internationales, dressent des inventaires des nœuds de transport essentiels et vulnérables;
- (ii) La variabilité du climat et les changements climatiques soient pris en compte dans les plans à long terme d'amélioration des infrastructures, dans la conception des installations, dans les travaux d'investissement, dans les pratiques d'entretien, dans les activités, dans les pratiques d'ingénierie et dans les plans d'intervention d'urgence;
- (iii) Les infrastructures et services de transport étant réglementés, on procède aux adaptations d'ordre institutionnel et réglementaire qui pourraient être nécessaires;
- (iv) Les planificateurs et concepteurs d'infrastructures de transport, ainsi que les gestionnaires de ces infrastructures et les constructeurs de véhicules et de matériel roulant, tiennent compte, dès le stade de la planification, des projections en matière de changements climatiques et des effets éventuels de ces changements.

Stratégies d'adaptation:

- (i) Les mesures d'adaptation devraient s'inscrire dans des cadres intégrés de gestion des risques naturels; de tels cadres devraient permettre non seulement d'agir en amont pour remédier aux problèmes et perturbations d'origine météorologique actuels, mais aussi de concevoir et d'élaborer des mesures à moyen et à long terme d'adaptation aux changements climatiques. S'appuyer sur les systèmes de gestion existants qui prennent déjà en compte les conséquences des conditions météorologiques peut aider à concevoir un cadre d'adaptation qui fonctionne;
- (ii) Des bases de données nationales et internationales intégrées et bien structurées comportant des données numérisées sur les réseaux, les points névralgiques exposés aux perturbations, les incidents, les plans de gestion et d'entretien et les pratiques en matière de gestion des actifs pourraient former le cœur d'un système efficace de gestion des risques naturels destiné au secteur des transports;
- (iii) Les effets éventuels des changements climatiques devraient être envisagés dès le début de la planification et inclus dans les évaluations des risques et des facteurs de vulnérabilité; la conception des futurs projets et la planification de l'entretien doivent tenir compte des considérations liées aux changements climatiques.

Bien que le présent rapport traite de l'adaptation du secteur des transports aux changements climatiques, il convient de ne jamais perdre de vue les questions liées à l'atténuation de ces changements :

- (i) L'adaptation n'a pas pour objet de se substituer à la réduction des gaz à effet de serre. La surveillance mondiale des émissions est jugée nécessaire pour atténuer les changements climatiques;
- (ii) De nombreuses décisions capitales concernant tant l'adaptation aux changements climatiques que leur atténuation seront influencées par des analyses coûts-avantages. À l'heure actuelle, les analyses de ce type pâissent de certaines incertitudes; réduire ces incertitudes, lorsque cela est possible, devrait constituer une priorité urgente de la recherche intégrée;
- (iii) Il faudrait étudier plus avant les possibilités de créer des synergies avec la réduction des émissions de gaz à effet de serre et d'autres objectifs environnementaux.

La présente étude a mis en évidence d'importantes lacunes dans l'information et les connaissances, qu'il convient de combler par des recherches appropriées. Les recommandations suivantes sont formulées:

- (i) Pour étudier les effets des changements climatiques et l'adaptation à ces effets il importe de mobiliser un vaste éventail de disciplines, dont le droit, les sciences naturelles et sociales, l'ingénierie et l'économie;
- (ii) Des recherches ciblées devraient être consacrées aux différents effets des changements climatiques. Ces recherches pourraient être complétées par des études de cas sur les conséquences économiques, sociales et environnementales que pourraient avoir les solutions possibles en matière d'adaptation, ainsi que sur leurs coûts et leurs avantages. Par exemple, le risque des inondations dues aux crues pour les réseaux routiers et ferroviaires pourrait faire l'objet d'études détaillées qui modéliseraient des risques extrêmes d'inondation dans la région de la CEE selon différents scénarios de changements climatiques afin de repérer les «points chauds» en matière d'inondations;
- (iii) Il est possible de procéder à des évaluations initiales des facteurs de vulnérabilité du secteur des transports sans connaître en détail les futurs changements climatiques; de telles évaluations peuvent se fonder sur l'analyse de la vulnérabilité passée à la variabilité du climat et sur la capacité actuelle des systèmes d'absorber les perturbations et de s'adapter à des conditions changeantes;
- (iv) En raison de l'interconnexion et de l'interdépendance des économies dans un système d'échanges mondialisé, les besoins particuliers des pays en développement, notamment des petits États insulaires en développement, devraient être pris en considération;
- (v) Il importe de favoriser la coopération entre la CEE et d'autres organisations et institutions internationales compétentes, en particulier la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques et le Cadre mondial pour les services climatologiques (CMSC) de l'Organisation météorologique mondiale, en vue d'améliorer la communication entre les professionnels des transports, les climatologues et d'autres experts scientifiques concernés, et de créer, si possible, un centre d'échange d'informations sur les changements climatiques intéressant les transports. Compte tenu du caractère mondial des changements climatiques et de leurs conséquences pour le secteur des transports, et vu qu'il importe de tenir compte des problèmes posés par les changements climatiques dans les travaux du Comité des transports intérieurs et de ses organes subsidiaires sur les normes et règles internationales relatives aux transports, la CEE doit prendre l'initiative de se mettre en contact avec le Comité consultatif des partenaires du CMSC. Il y aurait également lieu d'échanger des informations sur les meilleures pratiques suivies pour remédier aux effets possibles de la variabilité du climat et des changements climatiques sur le secteur des transports.



Objet et structure du rapport

Les enregistrements de la température terrestre au cours des dix dernières années font apparaître une élévation globale de la température (réchauffement de la planète) qui est imputée à l'effet de serre. Bien que des efforts aient été entrepris dans le monde entier pour réduire les émissions de gaz à effet de serre (gaz à effet de serre), certaines données scientifiques donnent à penser que le réchauffement ne peut être inversé, mais seulement ralenti. Ce phénomène a des répercussions sur le climat qui devraient s'aggraver dans les décennies à venir, quels que soient les efforts réalisés pour réduire les émissions de gaz à effet de serre. Cette élévation de la température aura des conséquences sur tous les aspects de l'environnement, notamment par l'apparition de phénomènes extrêmes (températures, précipitations et inondations, mais aussi montée du niveau de la mer). Ces changements climatiques risquent de modifier les modes de vie, les déplacements, le transport de marchandises et l'activité économique. De toute évidence, il est donc urgent non seulement de s'attaquer aux causes des changements climatiques, mais aussi d'apprendre à en gérer les conséquences.

Le présent rapport a été établi pour aider le Groupe d'experts chargé d'étudier les effets des changements climatiques et l'adaptation à ces changements dans les réseaux de transport internationaux conformément à son programme de travail et à ses principaux objectifs (ECE/TRANS/WP.5/GE.3/2011/1).

Il se divise en cinq grands chapitres. Le chapitre 1 donne un bref aperçu du contexte scientifique dans lequel s'inscrivent les changements climatiques et leurs effets tant à l'échelle mondiale que dans les pays de la CEE. Le chapitre 2 décrit certaines des conséquences possibles des diverses manifestations des changements climatiques sur les réseaux de transport, l'accent étant mis plus particulièrement sur les questions intéressant les infrastructures des transports dans la région de la CEE et sur la prise en compte des différents modes de transport. Le chapitre 3 analyse les résultats de l'enquête réalisée auprès des pays membres de la CEE et de certaines organisations internationales en 2012. Le chapitre 4 expose brièvement les mesures d'adaptation disponibles. Enfin, le chapitre 5 récapitule les conclusions et les recommandations du Groupe d'experts.

Quatre annexes complètent le document. L'annexe I donne une vue d'ensemble de certaines études particulièrement pertinentes sur différents modes de transport. L'annexe II résume les travaux présentés à la Conférence internationale de la CEE sur l'adaptation des réseaux de transport aux changements climatiques (25 et 26 juin 2012, Alexandroupolis (Grèce)) et les contributions des experts. À l'annexe III est reproduit le questionnaire envoyé aux gouvernements et aux organisations, tandis que l'annexe IV présente les réponses obtenues.

Il est à noter que le présent rapport n'est pas exhaustif et ne doit pas être considéré comme un inventaire complet des problèmes qui se posent. Il correspond plutôt à une première étape, faisant le bilan des informations dont on dispose (données et analyse) sur les incidences des changements climatiques sur les infrastructures internationales de transport, dans la région de la CEE et au-delà, notamment le type, la portée et la répartition de ces incidences dans des domaines variés et des modes de transport différents. Il contient en outre une analyse des réponses des 27 États membres et 7 organisations au questionnaire conçu par le Groupe d'experts. Cette analyse permet de se rendre compte, pour la première fois, de la façon dont sont considérées les incidences des changements climatiques et de la variabilité du climat sur les transports¹.

¹ Le présent projet de rapport contient des informations valables jusqu'en septembre 2012. On y trouvera aussi les observations relatives aux projets antérieurs communiquées à la CEE par des experts internationaux.



Chapitre 1. Changements climatiques: fondements physiques

1.1. Phénoménologie des changements climatiques

1.1.1 Température, précipitations et élévation du niveau de la mer

Le climat est régi par les apports et les sorties de chaleur et par la dynamique de sa conservation dans les différents éléments constitutifs du système terrestre, c'est-à-dire les océans, les terres émergées et l'atmosphère (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), 2007a). La chaleur s'accumule essentiellement dans les océans. Par conséquent, toute modification de la température des océans est un indicateur important du changement climatique. Ces dernières années, le réchauffement des océans a été largement mis en évidence (Domingues et al., 2008), la progression étant estimée à $0,64 \text{ W/m}^2$ sur la période 1993-2008 (Lyman et al., 2010). Ce chiffre ne tient pas compte de la variabilité dans le temps due par exemple aux importantes modulations climatiques et aux cycles solaires (Richardson et al., 2009).

En ce qui concerne la température de l'atmosphère, la tendance à l'élévation est nette à long terme (figure 1), conformément aux prévisions précédentes (GIEC, 2001; 2007); dans l'océan, c'est dans les eaux de surface que le réchauffement est le plus marqué, la hausse de la température étant de l'ordre de $0,11 \text{ }^\circ\text{C}$ par décennie sur les premiers 75 mètres de profondeur sur la période 1971–2010 (GIEC, 2013). Une élévation comprise entre $1,0 \text{ }^\circ\text{C}$ et $3,7 \text{ }^\circ\text{C}$ (estimations moyennes, voir tableau 1) de la température de l'air est prévue à la fin du XXI^e siècle, en fonction des hypothèses. Forcée par une série de scénarios possibles en matière de concentration de gaz à effet de serre (GIEC, 2013), l'estimation centrale (point médian) du réchauffement est de $1,0 \text{ }^\circ\text{C}$ à $2,0 \text{ }^\circ\text{C}$ 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), on prévoit une élévation comprise entre $1,0 \text{ }^\circ\text{C}$ et $3,7 \text{ }^\circ\text{C}$. Toutefois, la fourchette des projections s'élargit, passant à une valeur comprise entre $0,3 \text{ }^\circ\text{C}$ et $4,8 \text{ }^\circ\text{C}$ lorsque l'on inclut l'incertitude du modèle dans les calculs.

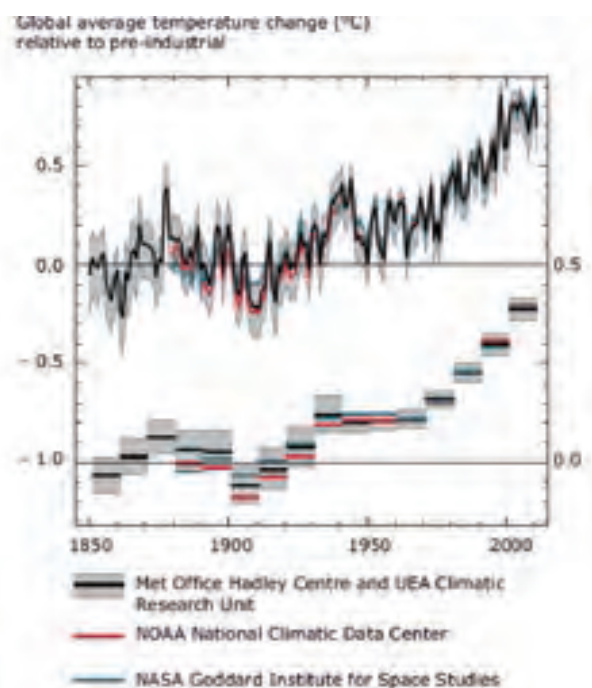


Figure 1. Évolution de la température moyenne de l'air dans le monde (en °C): (a) anomalies annuelles; (b) anomalies décennales moyennes. Légende: tracé noir, données HadCRUT3, du Hadley Centre (services météorologiques britanniques) et de l'université d'East Anglia (UEA); zone grise: intervalle de confiance de 95%; tracé rouge, MLOST, du centre de données nationales sur le climat de l'Administration américaine des océans et de l'atmosphère (NOAA) (période de référence: 1880-1899); tracé bleu, GISSTemp du Goddard Institute de la NASA (période de référence: 1880-1899). (Source : AEE, 2012).

Tableau 1. Valeurs moyennes mondiales de la température de surface et du niveau de la mer sur la période 2081-2100 (fourchettes moyenne et probable) par rapport à la période 1986-2005, selon différents scénarios (d'après GIEC, 2013). Les prévisions sont calculées selon quatre scénarios de forçage radiatif (profils représentatifs de l'évolution de concentration (RCP))²: 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 de modèles CMIP5 (plages de 5 % à 95 % des modèles). Les estimations relatives à l'élévation du niveau de la mer reposent sur 21 modèles CMIP5 (plages de 5 % à 95 % des modèles). L'évolution rapide dans la dynamique des calottes glaciaires et le stockage anthropique de l'eau dans les terres émergées sont considérés comme ayant des distributions de probabilité uniformes et comme étant en grande partie indépendants du scénario, étant donné que l'état actuel des connaissances ne permet pas d'évaluer cette dépendance de façon qualitative³.

| Scénario | Température | | Augmentation du niveau de la mer | |
|----------|--------------|--------------------------|----------------------------------|---------------------------|
| | Moyenne (°C) | Fourchette probable (°C) | Moyenne (m) | Augmentation 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 |

² Les récentes prévisions du cinquième Rapport d'évaluation du GIEC (RE5) (2013) s'appuient sur des scénarios de profils d'évolution représentatifs des concentrations (RCP) et non sur les scénarios SRES du GIEC. Les concentrations en équivalent CO₂ ont été fixées aux valeurs suivantes (Moss et al., 2010): RCP 8.5, 1 370 équivalent CO₂ en 2100; RCP 6.0 850 équivalent CO₂ en 2100; RCP 4.5, 650 équivalent CO₂ en 2100; RCP 2.6, pic à 490 équivalent CO₂ avant 2100.

³ Selon ces scénarios, le niveau de la mer ne cessera pas de monter après 2100 mais continuera se s'élever pendant des siècles; en valeur médiane, cette élévation sera de 1,84 m et de 5,49 m pour le scénario de forçage le plus bas et le plus élevé, respectivement (RCP 8,5) à l'horizon 2500 (Jevrejeva et al., 2012).

Le climat ne change pas de façon uniforme. En effet, les températures augmentent plus vite près des pôles qu'à l'Équateur. Les précipitations évoluent de façon bien plus complexe, certaines régions en recevant davantage, et d'autres moins (figure 2). Ces tendances devraient s'accélérer à l'avenir, comme dans l'est de la Méditerranée, où les pluies devraient diminuer de 25 % au maximum durant la décennie 2020-2029 par rapport à la décennie 1990-1999 (GIEC, 2007a). La couverture neigeuse dans l'hémisphère nord a également tendance à diminuer. Sur la période 1970-2010, ce recul a été estimé à environ 0,8 million km² par décennie (pour les mois de mars et d'avril), soit entre 7 % et 11 % par rapport aux valeurs d'avant 1970 pour les mêmes mois (Brown et Robinson, 2011). Toutefois, ces tendances ne sont pas uniformes dans toutes les régions, la couverture neigeuse se réduisant de façon constante dans les Alpes et en Scandinavie à basse altitude, mais augmentant à haute altitude, tandis que l'on ne constate aucune tendance cohérente dans d'autres régions montagneuses (comme les Carpates, les Pyrénées ou le Caucase (AEE, 2012)).

Enfin, des études récentes (SREX, 2012) prévoient (degré de fiabilité moyen) une diminution de la durée et de l'intensité des épisodes de sécheresse en Europe du Sud et dans le bassin méditerranéen, l'Europe centrale et certaines régions d'Amérique du Nord.

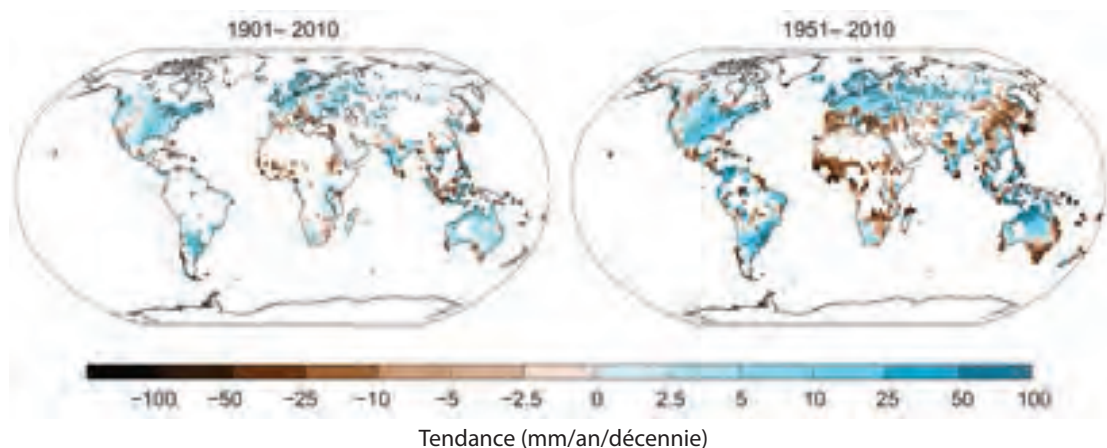


Figure 2. Changements observés dans les précipitations sur la période 1951-2010 (GIEC, 2013).

Les hausses de température s'accompagnent aussi d'une nette élévation du niveau moyen de la mer. Cette élévation à l'échelle mondiale est due aux paramètres suivants: (a) expansion thermique des océans c'est-à-dire augmentation du volume des océans due à des effets stériques, (b) isostasie glaciaire, c'est-à-dire augmentation de la masse océanique due à la fonte de la glace au Groenland et dans l'Antarctique, mais aussi des glaciers et des calottes glaciaires⁴; (c) ajustement glacio-isostatique; (d) changements dans les réserves d'eau terrestres (Hanna et al., 2013). Depuis 1860, le niveau de la mer a augmenté d'environ 0,20 m, mais à un rythme de plus en plus rapide, en particulier depuis les années 1990; des information satellitaires (Church et White, 2011) montrent que le niveau de la mer augmente à un rythme proche de la fourchette haute des prévisions précédentes du GIEC (environ 3,1 mm par an, voir aussi figure 3).

⁴ Une perte de glace continentale de 360 Gt (360 x 10⁹ tonnes ou 360 km³ d'eau) se traduit par une élévation moyenne du niveau de la mer d'environ 1 mm; actuellement, la perte de glace est d'environ 500 Gt par an (Cronin, 2012).

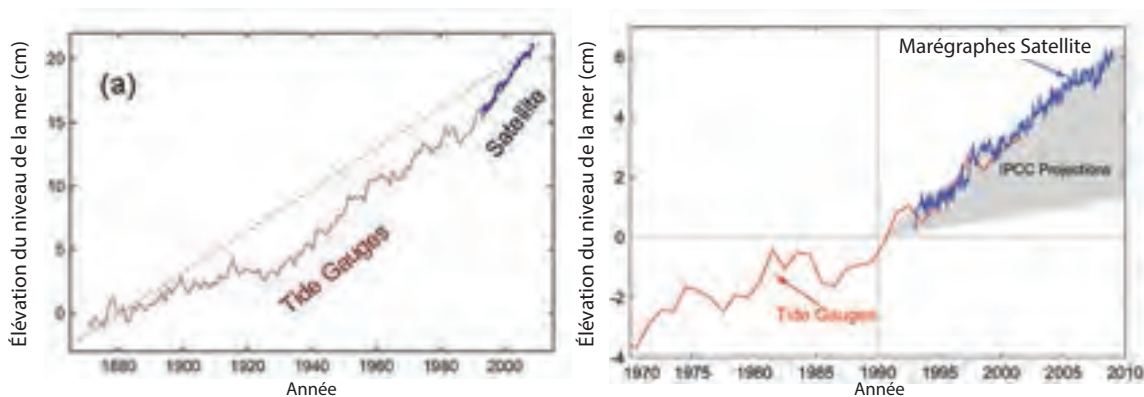


Figure 3. (a) Évolution du niveau mondial de la mer, 1860-2010 (Rahmstorf, 2011) mettant en évidence une accélération de la tendance. (b) Évolution du niveau de la mer en 1970-2008 par rapport à 1990. Le trait rouge épais correspond aux mesures effectuées par les marégraphes et lissées pour éliminer les variations interannuelles. Le trait bleu correspond aux observations des satellites. La courbe grisée correspond aux projections antérieures du GIEC (Richardson et al., 2009).

On pense que l'accroissement de la pente de la courbe, qui correspond à l'élévation du niveau des mers ces dernières décennies, est principalement due à la fonte croissante de la glace du Groenland et de l'Antarctique, qui semble s'accroître (Velicogna, 2009; Rignot et al., 2011; voir aussi Hanna et al., 2013). Toutefois, les processus à l'œuvre dans la couche de glace ne sont pas encore suffisamment connus pour que l'on puisse décrire précisément le comportement de cette couche. Par conséquent, les projections sur l'élévation du niveau de la mer jusqu'à la fin du XXI^e siècle restent aléatoires, compte tenu des modèles utilisés (Richardson et al., 2009). Une autre méthode repose par exemple sur la relation observée entre la hausse de la température moyenne mondiale et l'élévation du niveau de la mer sur les 120 dernières années, en partant du principe que cette relation se maintiendra à l'avenir (Rahmstorf, 2007; Rahmstorf et al., 2007). D'autres estimations récentes tablent sur une élévation du niveau de la mer beaucoup plus importante (de trois à cinq fois) que ce qui était prévu par le GIEC en 2007 (figure 4)⁵. Le niveau de la mer n'arrêtera pas de monter en 2100 (Jevrejeva et al., 2012), puisque les variations de la chaleur contenue dans les océans pourraient entraîner une expansion thermique qui durerait au moins plusieurs siècles, tandis que la fonte de glace en cours dans l'Antarctique et au Groenland se poursuivra sur une longue période.

L'évolution et les variations du niveau moyen de la mer et du climat régional ont entraîné des modifications mondiales des tendances pour les très hautes élévations du niveau de la mer à la fin du XX^e siècle (GIEC, 2007a). Toutefois, ces élévations peuvent varier considérablement, en particulier le long des côtes. En s'appuyant sur des mesures effectuées par 258 marégraphes sur l'ensemble de la planète, Menendez et Woodworth (2010) ont confirmé les résultats d'études précédentes qui avaient constaté que ces très hautes élévations avaient tendance à être plus fréquentes depuis les années 1970, suivant de ce fait l'élévation croissante du niveau moyen de la mer (Woodworth et Blackman, 2004; Lowe et Gregory, 2006; Marcos et al., 2009; Haigh et al., 2010). D'autres études récentes font état de variations importantes entre régions. En Europe, par exemple, le niveau de la mer a augmenté le long de la plupart des côtes ces quarante dernières années environ, sauf au nord de la Baltique (figure 5).

⁵ Le GIEC a récemment actualisé ses projections sur l'élévation du niveau de la mer en 2100 à 0,26-0,82 m (tableau 1 et figure 4).

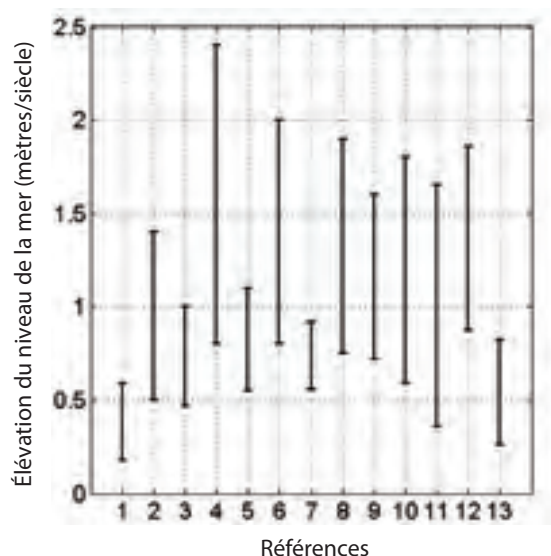


Figure 4. Projections récentes relatives à l'élévation du niveau de la mer à l'horizon 2100 par rapport aux prévisions du GIEC (2007a). Légende: colonne 1, GIEC (2007a), 0,18-0,59 m; colonne 2, Rahmstorf et al. (2007); colonne 3, Horton et al. (2008); colonne 4, Rohling et al. (2008); colonne 5, Vellinga et al. (2008); colonne 6, Pfeffer et al. (2008); colonne 7, Kopp et al. (2009); colonne 8, Vermeer et Rahmstorf (2009); colonne 9, Grinsted et al. (2010); colonne 10, Jevrejeva et al. (2010); colonne 11, Jevrejeva et al. (2012); colonne 12, Mori et al. (2013); colonne 13, GIEC (2013). La variabilité des projections est due à des hypothèses et des démarches parfois différentes.

Il convient de noter qu'en raison des importantes variations spatiales constatées concernant l'élévation du niveau de la mer, les effets prévus sur les littoraux doivent tenir compte des tendances régionales. En plus des processus à l'œuvre au niveau planétaire (voir plus haut), certains facteurs régionaux peuvent aussi influencer les changements constatés au niveau des côtes, comme la circulation des océans (circulation méridienne) et la fonte des glaces, l'ajustement isostatique et la sédimentation. L'étude du paléoclimat, les mesures instrumentales et les modèles ont montré que des facteurs mondiaux et régionaux pouvaient provoquer une hausse relativement rapide du niveau de la mer qui pourrait dépasser la moyenne mondiale actuelle d'environ 3 mm par an le long de certaines côtes (Cronin, 2012).

Au Royaume-Uni, l'élévation du niveau de la mer (hors modifications du niveau des terres émergées) devrait être de 0,12 à 0,76 m au XXI^e siècle, selon les projections et le scénario d'émissions retenu; des hausses plus importantes sont prévues en cas de fonte supplémentaire de la banquise (Lowe et al., 2009). Pour la côte de la mer du Nord aux Pays-Bas, Katsman et al. (2011) ont estimé que l'élévation du niveau de la mer serait comprise entre 0,40 et 1,05 m pour une hypothèse haute, mais plausible, de concentration des émissions. Par ailleurs, en s'appuyant sur 12 modèles du climat mondial et à partir de trois scénarios d'émissions, Marcos et Tsimplis (2008) ont calculé qu'au XXI^e siècle, la hausse des températures se traduirait par une élévation du niveau de la mer de 0,03 à 0,61 m en Méditerranée; cette hausse s'accompagnerait d'une élévation liée à la salinité comprise entre 0,22 et 0,31 m (voir aussi AEE, 2012).

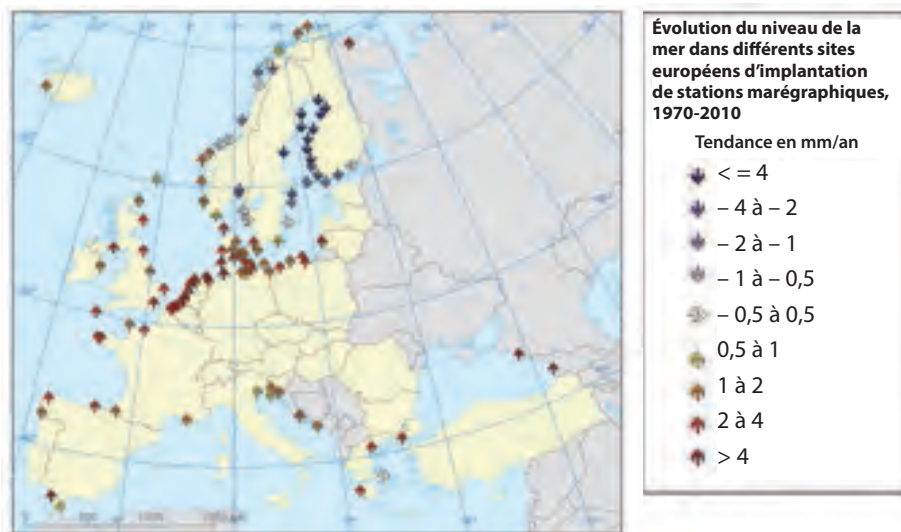


Figure 5. Évolution du niveau de la mer dans différents sites européens d'implantation de stations marégraphiques (1970-2010) (mouvements de terrain locaux non pris en compte) (à partir de AEE (2012), voir aussi <http://www.psmsl.org/products/trends>).

1.1.2 Phénomènes extrêmes

Des changements dans les conditions climatiques moyennes peuvent aussi modifier la fréquence, l'intensité, l'étendue géographique, la durée et la périodicité des phénomènes météorologiques et climatiques extrêmes, et donner lieu à des épisodes sans précédent. Ces phénomènes extrêmes peuvent à leur tour modifier la répartition des conditions climatiques à venir; par conséquent, les conditions futures moyennes de certaines variables climatiques devraient se trouver dans des valeurs extrêmes des conditions observées actuellement (SREX, 2012).

Les phénomènes extrêmes, comme les tempêtes, les inondations, les sécheresses et les vagues de chaleur, ainsi que les changements qui surviennent au sein de systèmes climatiques donnés, tels que les moussons (Richardson et al., 2009) peuvent provoquer des catastrophes naturelles ou avoir des répercussions plus graves à une échelle spatio-temporelle plus réduite (GIEC, 2007a) (figure 6) que des changements dans les variables moyennes. En outre, les sociétés sont rarement préparées à affronter des événements météorologiques extrêmes de façon efficace, car elles ont pris l'habitude de s'appuyer sur des régimes climatiques prévisibles à long terme.

Les événements extrêmes ont des conséquences qu'il est parfois difficile de prévoir. Ils peuvent aussi être très variables, comme le sont par exemple des changements brusques et provisoires de température, des reculs rapides de la glace des mers et des lacs, des précipitations anormalement fortes, des orages intenses, des ondes de tempête, des sécheresses prolongées, des vagues de chaleur et des feux incontrôlés, un dégagement soudain d'eau produit par la fonte des glaciers et l'affaissement du pergélisol⁶, autant de phénomènes qui ont des répercussions considérables (Post et al., 2009). Il semble que certains phénomènes extrêmes, comme les orages dans les zones tropicales et tempérées, deviennent encore plus extrêmes en raison du réchauffement climatique (Webster et al., 2005; Emanuel, 2005; Allan et Soden, 2008; Ruggiero et al., 2010). Ainsi, même une augmentation modeste (de 5 m/s) de la vitesse du vent de surface des cyclones tropicaux

⁶ Le pergélisol est un sol gelé en permanence qui se compose de sédiments et de terre dont la température est inférieure ou égale à 0 °C sur plus de deux ans. Le pergélisol est courant dans l'Arctique et dans les hautes altitudes alpines (Dobinski, 2011; Boeckli, et al., 2012).

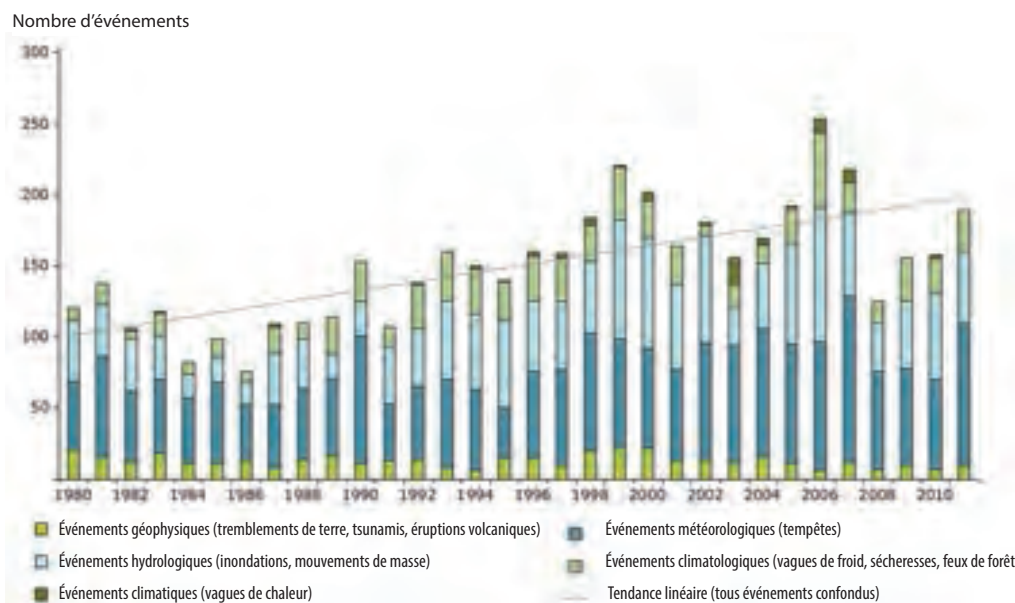


Figure 6. Catastrophes naturelles dans les pays membres de l’AEE (1980-2011). On observe une tendance croissante aux tempêtes violentes, inondations, mouvements de masse ou glissements de terrain, vagues de chaleur, sécheresses et feux de forêt, le nombre de catastrophes naturelles induites par des événements géophysiques étant resté à peu près stable durant cette période. Ces événements ont causé des pertes s’élevant à 455 milliards de dollars, dont 126 milliards ont été pris en charge par les assurances (AEE, 2012).

due à une élévation de 1 °C de la température de l’océan pourrait considérablement renforcer la survenue des cyclones les plus intenses et les plus destructeurs (de catégorie 5) (Steffen, 2009). Ces phénomènes extrêmes pourraient avoir des conséquences graves, notamment pour les populations et les infrastructures côtières, car ils augmentent le risque d’ondes de tempête entraînant une modification des niveaux extrêmes de la mer⁷ et provoquant une montée des vagues (Stockdon et al., 2012) qui sont à leur tour à l’origine d’inondations du littoral, surtout lorsqu’à ces phénomènes s’ajoute l’élévation prévue du niveau moyen de la mer (McKee Smith et al., 2010).

En outre, l’augmentation de l’amplitude et de la fréquence des vagues géantes ou une modification de leur configuration (Callaghan et al., 2008; Ruggiero, 2013; Bertin et al., 2013) entraîne aussi, ne serait-ce que provisoirement, une érosion ou une inondation du littoral, surtout lorsque ces phénomènes se produisent dans un contexte d’élévation du niveau de la mer (Tsimplis et Shaw, 2010; Xu et Huang, 2013; Losada et al., 2013). En Europe, 200 millions de personnes vivent au bord de la mer et les primes d’assurance qui couvrent les inondations côtières risquent d’augmenter au cours du siècle, au moins sur le littoral de la mer du Nord (Gaslikova et al., 2011).

Les ondes de tempête menacent tout particulièrement les zones côtières très développées, en particulier les parties basses de deltas comme ceux du Rhin, du Danube ou du Mississippi, qui sont considérés comme des points chauds de l’érosion et de la vulnérabilité côtières (GIEC, 2007b) en raison de l’élévation importante du niveau moyen de la mer. Une étude de 40 grands deltas, représentatifs de toutes les grandes zones climatiques, a mis en évidence une élévation relative moyenne du niveau de la mer comprise entre 0,5

⁷ Les ondes de tempête sont des perturbations provisoires du niveau de la mer par rapport à leur niveau dû aux marées astronomiques, provoquées par des changements de la pression atmosphérique et du vent; les ondes de tempête, qui dépendent de la topographie régionale ou locale, augmentent le niveau de la marée et le risque d’inondation du littoral en raison des hauteurs extrêmes d’eau (Horsburgh et Wilson, 2007).

et 12,5 mm/an (Erickson et al., 2006). Dans ces zones, la diminution des sédiments fluviaux peut aussi être un facteur important d'érosion du littoral (Velegrakis et al., 2008; Ranasinghe et al., 2013). Les études sur les tendances en matière de niveaux extrêmes de la mer le long des côtes et les ondes de tempêtes enregistrés par des marégraphes (Woodworth et Blackman, 2004; Menendez et Woodworth, 2010; Haigh et al., 2010; Marcos et al., 2011) ont montré que l'élévation moyenne du niveau de la mer a tendance à provoquer des montées des eaux extrêmes. On peut affirmer avec certitude que le littoral actuellement exposé à l'érosion ou aux inondations continuera de l'être à l'avenir, en raison de l'élévation du niveau de la mer, toutes choses étant égales par ailleurs (SREX, 2012).

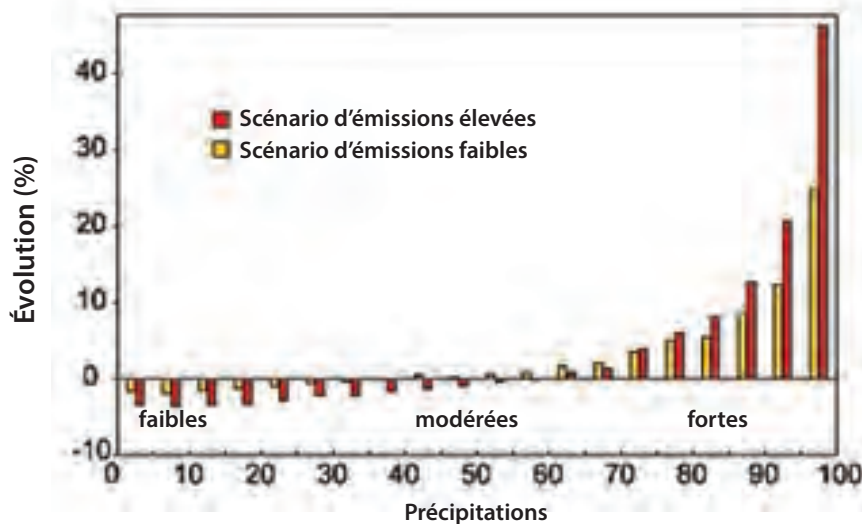


Figure 7. Évolution prévue des précipitations moyennes dans les années 2090 (par rapport à la moyenne des années 1990) en Amérique du Nord, par degré d'intensité (précipitations faibles, modérées ou fortes, voir aussi GIEC, 2007a). Les précipitations faibles devraient diminuer et les fortes précipitations augmenter. Il convient de noter que les changements sont plus importants dans le scénario d'émissions élevées (Karl et al., 2009).

L'une des tendances les plus marquées semble être la fréquence et l'intensité croissantes des fortes précipitations, qui sont à l'origine de la hausse générale des précipitations ces 50 dernières années. Les modèles climatiques prévoient que cette tendance se poursuivra au cours du siècle. Ainsi, Karl et al. (2009) calculent que les fortes précipitations qui se produisent actuellement tous les vingt ans environ devraient survenir à des intervalles compris entre quatre et quinze ans d'ici à 2010, selon les endroits, tandis que les faibles précipitations seront amenées à devenir moins fréquentes (voir figure 7). Cette fréquence pourrait augmenter dans de nombreuses régions au XXI^e siècle, en particulier dans les hautes latitudes et en zone tropicale, et dans les latitudes moyennes septentrionales en hiver. Il a été établi avec un degré de certitude moyen que les précipitations fortes devraient également augmenter, y compris dans les régions où les pluies devraient diminuer, globalement (SREX, 2012).

Les crues sont un déversement massif d'eau dû à des facteurs physiques et socio-économiques. Les facteurs physiques sont étroitement liés au cycle hydrologique, lui-même influencé actuellement par des changements au niveau des températures et des précipitations, mais aussi par la fonte des glaciers et de la neige (GIEC, 2007a). Les facteurs socio-économiques sont par exemple des changements dans l'affectation des terres, certains régimes de gestion des cours d'eau et la construction dans les plaines inondables, qui réduisent la capacité de ces dernières à absorber l'eau des crues. Les aménagements humains ayant considérablement modifié l'écoulement naturel de l'eau, il est difficile de s'assurer de l'exactitude des tendances induites par les changements climatiques au niveau des variables hydrologiques (AEE, 2010). Dans la région de la CEE, le risque de crue est constant (figure 8).

Dans les pays d'Europe et d'Asie, le risque de crues (centennales) est élevé, en particulier en Europe centrale et orientale, en Asie centrale et dans les bassins versants nord-sud de Sibérie (figure 9). Toutefois, on prévoit mieux la nature et les conséquences des phénomènes hydrologiques extrêmes à l'échelon régional ou local, la plupart des études existantes étant consacrées à l'apparition et aux conséquences des crues dues notamment à une hausse des pluies torrentielles. En Europe, on a constaté une augmentation générale des débits annuels d'eau dans le nord et une baisse dans le sud du continent (AEE, 2010; 2012) ; cette tendance devrait se maintenir à l'avenir, étant donné qu'elle accompagne des changements prévus des régimes de précipitation qui déterminent l'intensité et la fréquence des crues alimentées par la pluie et peut-être des crues soudaines (Feyen et al., 2006, 2010).

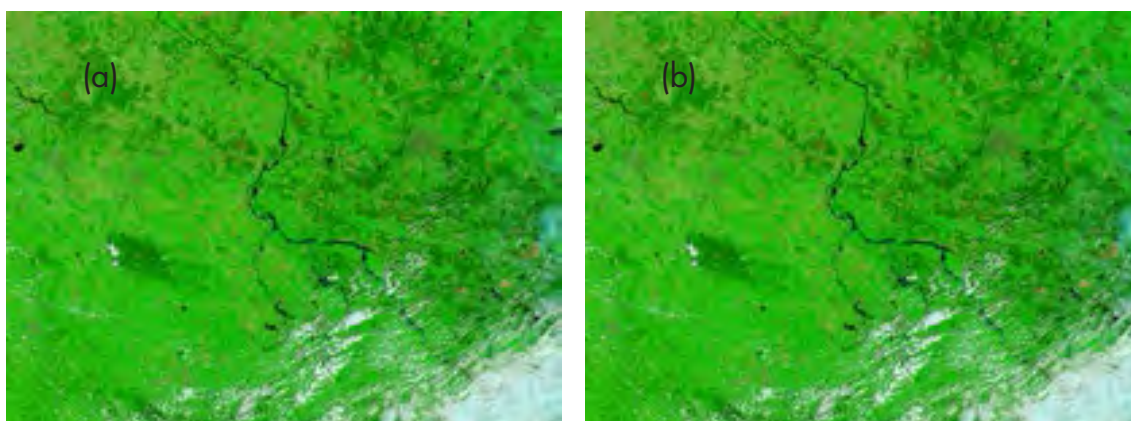


Figure 8. Images satellite (MODIS sur le satellite Terra de la NASA) des inondations dans l'est de l'Allemagne, début juin 2013. (a) Image captée le 05/05/2013 (avant la crue) ; (b) Image captée le 06/06/2013 (pendant la crue). Fin mai, début juin 2013, des pluies particulièrement fortes ont provoqué des crues importantes en Allemagne, en Autriche et en République tchèque. Ce jour-là, l'Elbe a atteint 8,76 mètres de haut, alors que son niveau normal est de 2 m. L'eau du fleuve apparaît en bleu foncé et en noir, et la végétation est de couleur vert vif. Les nuages sont bleu-vert pâle et projettent des ombres. (<http://earthobservatory.nasa.gov/NaturalHazards/view.php?id=81287>)

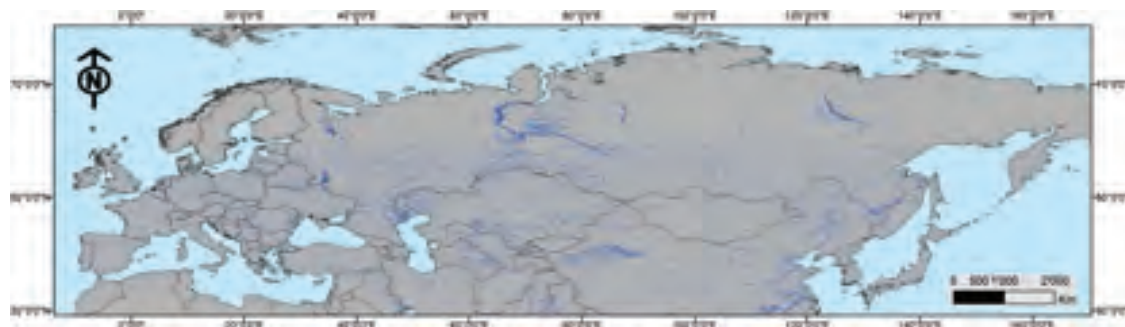


Figure 9. Risque (probabilité : 95 %) actuel de crues centennales dans la région eurasienne de la CEE. Calculs effectués à partir d'un modèle SIG reposant sur une série chronologique sur l'écoulement des cours d'eau. Résolution d'un modèle altimétrique numérique (MAN), 90 m. Les zones situées au-delà de 60 degrés de latitude nord ne sont pas intégralement couvertes, en raison des limites du modèle (GRID du PNUE et SIPC, 2008).

Les glissements de talus et de terrain (Kawagoe et Kazama, 2009) devraient également se multiplier dans les régions montagneuses (Beniston, 2003) étant donné que ces phénomènes sont liés à de fortes précipitations dont la fréquence et l'intensité devraient progresser (figure 7). Par conséquent, les dégâts dus aux crues, par exemple en Europe (figure 10), devraient considérablement augmenter d'ici à la fin du siècle et être plus fréquents dans le nord que dans le sud du continent.

On peut penser que la fréquence et l'intensité des vagues de chaleur, qui sont des périodes de temps anormalement chaud allant de quelques jours à quelques semaines, vont augmenter. La vague de chaleur de 2003 en Europe (Stott et al., 2004), dont on a démontré que c'est à cela que ressembleraient les températures estivales de la fin du XXI^e siècle, selon le scénario A2 du GIEC et les simulations effectuées au moyen de modèles climatiques régionaux (Beniston et Diaz, 2004), s'est traduite par des températures record. Les températures maximales absolues de l'été 2003 ont en effet dépassé le record précédent établi vers la fin des années 1940 et le début des années 1950 dans de nombreuses régions d'Europe. Par ailleurs, les températures moyennes de cet été là ont été supérieures de cinq écarts-type aux températures moyennes estivales à long terme. Le record de 2003 a toutefois été battu en 2010 (figure 11). D'une façon générale, on constate une multiplication par trois des pics de chaleur mensuels observés depuis les années 1920 par rapport à ce que l'on pourrait attendre dans un contexte de stabilité climatique (Coumou et Rahmstorf, 2012).

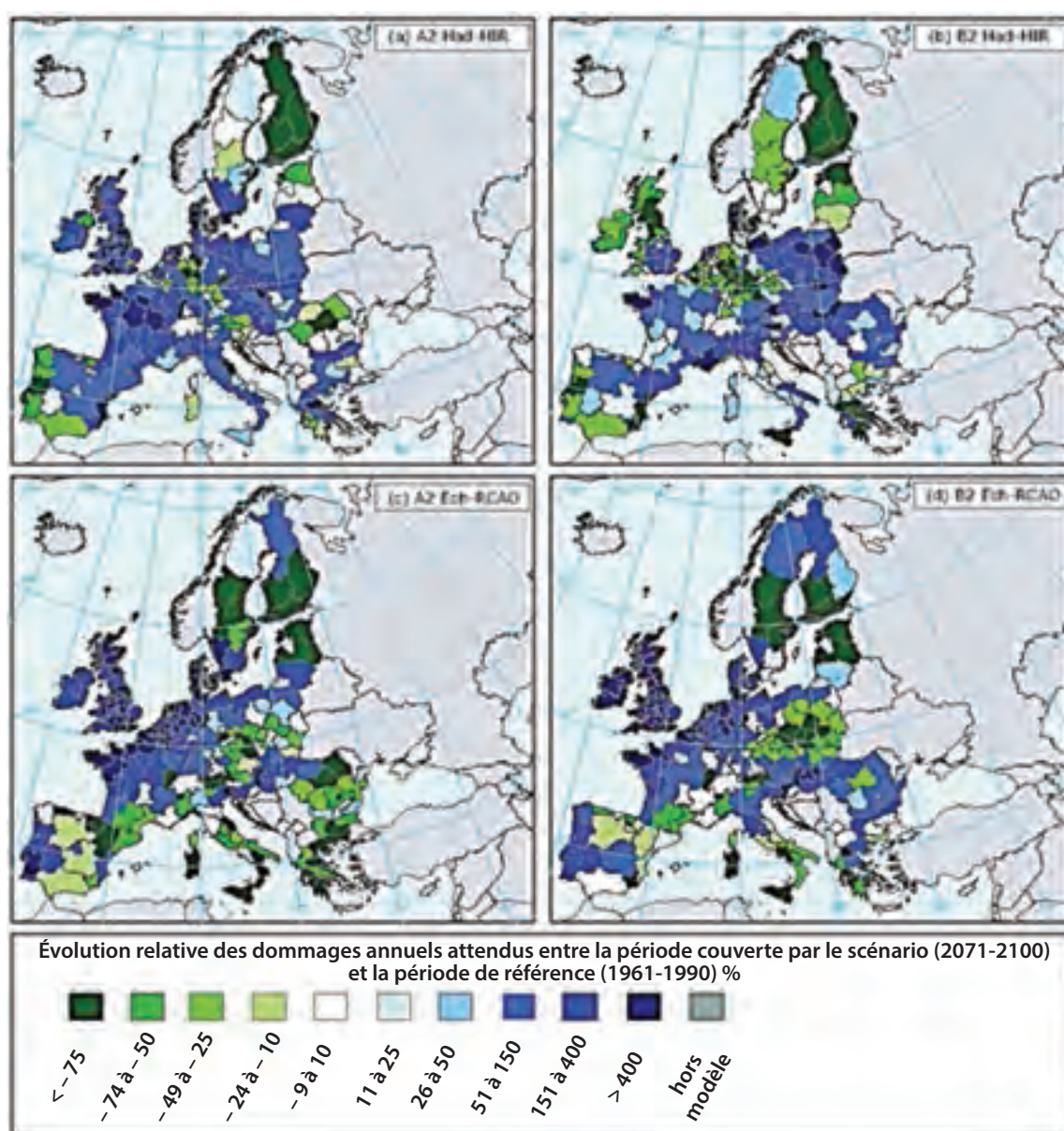


Figure 10. Évolution relative des dommages annuels dus aux crues prévues en Europe, entre la période couverte par le scénario (2071-2100) et la période de référence (1961-1990) (<http://ies.jrc.ec.europa.eu/>).

Depuis les années 1950, le nombre de journées et de nuits anormalement froides a très probablement diminué, tandis que le nombre de journées et de nuits anormalement chaudes a augmenté, à l'échelle de la planète (sur les terres émergées pour lesquelles on détient suffisamment de données). Ainsi, la plupart des régions d'Amérique du Nord semblent avoir connu davantage de journées et des nuits anormalement chaudes, moins de journées et de nuits anormalement froides et des journées de gel plus rares.

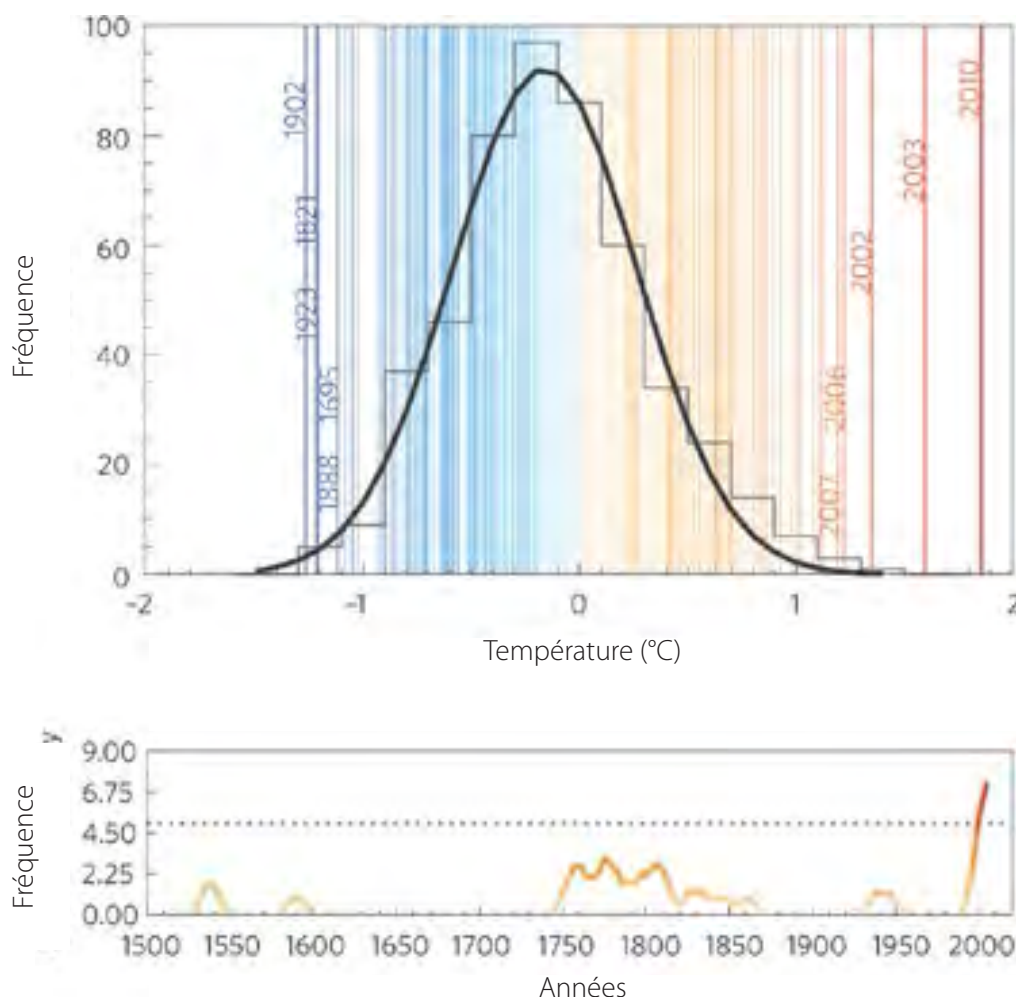


Figure 11. Distribution de la fréquence des anomalies thermiques d'été sur les terres émergées européennes par rapport à 1970-1999 (Coumou et Rahmstorf, 2012).

Par ailleurs, les vagues de chaleur, qui se caractérisent par la persistance de températures anormalement élevées, ont également eu tendance à augmenter (Kunkel et al., 2008). Cette tendance devrait s'accroître au XXI^e siècle (figure 12). Au niveau de la planète, étant donné que les températures moyennes continuent à augmenter, les modèles prévoient, avec un degré de certitude important, une augmentation de la fréquence et de l'ampleur des journées et des nuits chaudes et une diminution des journées et des nuits froides (SREX, 2012; GIEC, 2013).

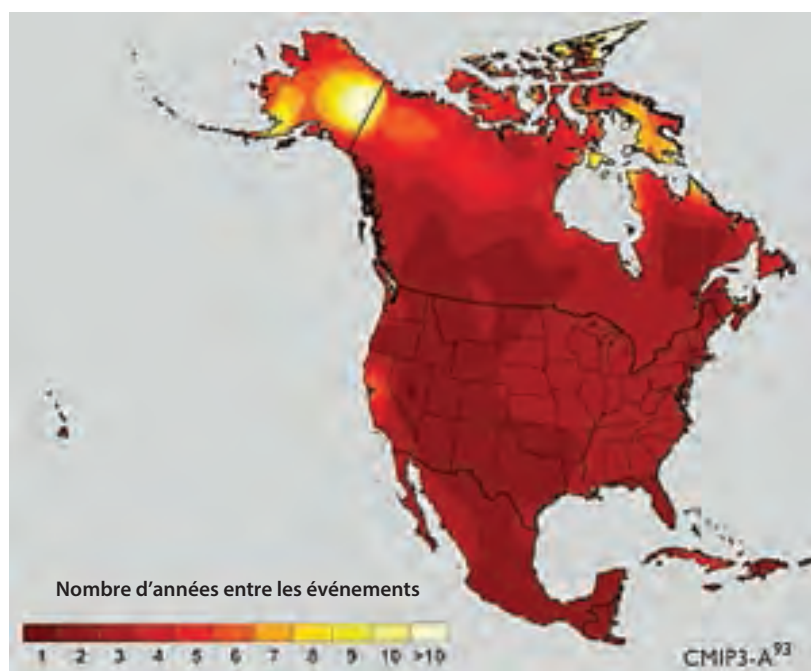


Figure 12. Fréquence prévue des canicules (moyenne 2080-2099). Des simulations pour 2080-2099 montrent que des situations extrêmes rares (événements vicennaux) deviendront plus fréquentes en Amérique du Nord. Une vague de chaleur vicennale pourrait devenir biennale, voire annuelle d'ici à la fin du siècle, dans de nombreuses régions d'Amérique du Nord, dans le scénario d'émissions élevées (Karl et al., 2009).

Les vagues de chaleur sont souvent liées à de graves sécheresses (comme en 2003, par exemple). En règle générale, les sécheresses s'aggravent dans certaines régions (SREX, 2012), une tendance qui devrait se maintenir (voire se renforcer) au XXI^e siècle (figure 13).

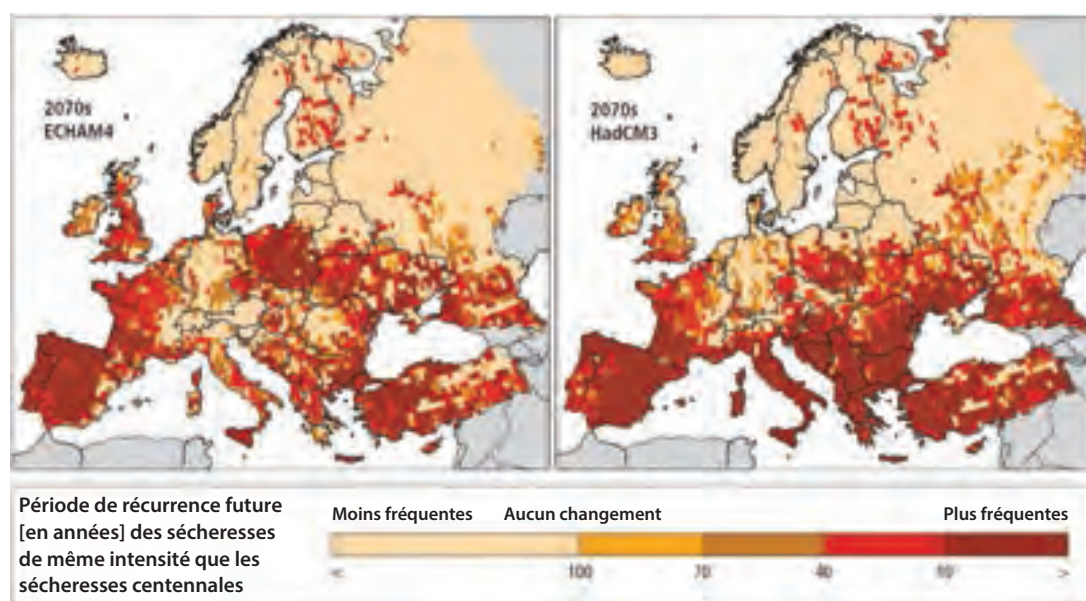


Figure 13. Période de récurrence prévue des sécheresses centennales dans les années 2070 (1961-1990), calculée par deux modèles climatiques, ECHAM4 et HadCM3 (SREX, 2012).

1.2. Mécanismes

Les concentrations toujours plus importantes de gaz à effet de serre dans l'atmosphère sont considérées comme l'une des causes principales de l'augmentation observée de la chaleur à la surface de la planète (figure 14). Ces gaz augmentent l'«effet de serre», un processus physique bien documenté du système terrestre que l'on connaît depuis le XIXe siècle (Canadell et al., 2007). Les gaz à effet de serre de l'atmosphère - vapeur d'eau, dioxyde de carbone (CO_2), méthane (CH_4) et oxyde de diazote (N_2O) - absorbent la chaleur renvoyée par la surface de la Terre et contribuent donc à son stockage dans les océans, les terres émergées et dans l'air. Sans effet de serre, les températures moyennes sur la Terre seraient d'environ $-19\text{ }^\circ\text{C}$ (soit environ $34\text{ }^\circ\text{C}$ de moins que leur niveau actuel). Toutes les planètes qui contiennent des gaz qui absorbent la chaleur sont soumises à l'effet de serre. Ainsi, la température extrême à la surface de Vénus (environ $440\text{ }^\circ\text{C}$) s'explique par une concentration très élevée de gaz à effet de serre dans son atmosphère.

Tout changement dans la concentration de ces gaz dans l'atmosphère se répercute sur l'effet de serre. La vapeur d'eau est un gaz à effet de serre abondant et c'est celui qui contribue le plus à l'effet de serre «naturel». Les activités humaines n'ont pas encore apporté la preuve de leur contribution directe aux flux mondiaux nets de vapeur d'eau en provenance ou à destination de l'atmosphère (Richardson et al., 2009), bien que localement, elles aient pu avoir une influence, par exemple à cause de la déforestation et des grands aménagements d'irrigation.

Quoi qu'il en soit, étant donné que la capacité de l'atmosphère à retenir la vapeur d'eau dépend fortement de la température, la quantité de vapeur d'eau présente dans l'atmosphère est régulée par la température de la Terre et, par conséquent, elle augmente à mesure que la planète se réchauffe. À l'instar d'autres gaz à effet de serre dont la concentration augmente, la vapeur d'eau suit et amplifie aussi les changements de la température mondiale qui sont dus à d'autres causes (Richardson et al., 2009). Il semble que les concentrations de CO_2 , de CH_4 et d'autres gaz à effet de serre dans l'atmosphère aient beaucoup augmenté ces dernières décennies (figure 14), probablement en raison des activités humaines. Les relevés des carottes glaciaires et des sédiments montrent que la concentration de ces gaz dans l'atmosphère est désormais plus élevée qu'elle ne l'a été pendant des plusieurs millions d'années (Solomon et al., 2009; Caldeira, 2009). Par ailleurs, de plus en plus d'éléments laissent à penser qu'il existe un lien entre concentration de ces gaz et climat. Ainsi, la covariation de la concentration de CO_2 et de la température dans les relevés de carotte glaciaires de l'Antarctique atteste d'un lien étroit entre CO_2 et climat durant les ères glaciaires du Pléistocène. Toutefois, le rôle exact et l'importance relative des concentrations de CO_2 dans l'apparition de tels changements climatiques à l'échelle de la planète ne sont pas clairs (Shakun et al., 2012).

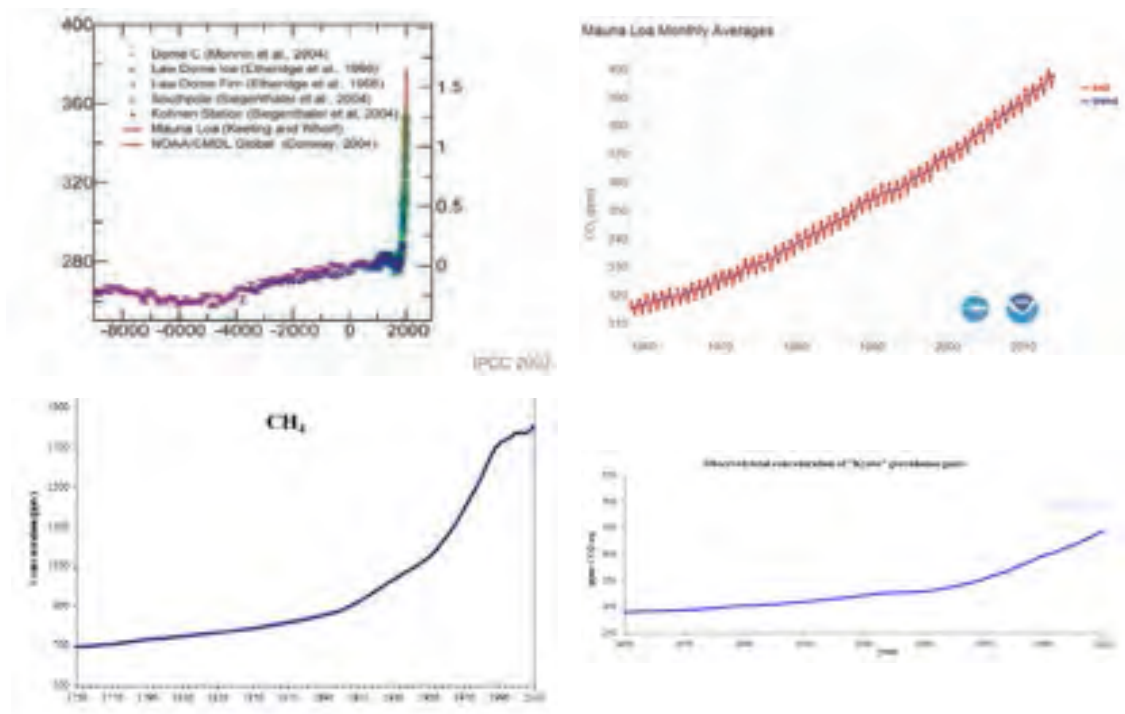


Figure 14. Concentration de CO₂ (en parties par million (ppm)) dans l'atmosphère ces 11 000 dernières années (Rahmstorf, 2011) et ces 50 dernières années (chiffres Mauna Loa, P. Tans (www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/) et R. Keeling (scrippsco2.ucsd.edu/), 2013). Les premières analyses effectuées sur les données les plus récentes semblent indiquer que les concentrations de CO₂ ont encore augmenté, franchissant la barre de 400 ppm depuis 800 000 ans le 9 mai 2013 (<http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/>). Sont également représentées les concentrations de CH₄ (en parties par milliard (ppb)) (<http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/figures/atmospheric-concentration-of-ch4>) et la concentration totale des six gaz à effet de serre répertoriés dans le protocole de Kyoto (ppm équivalent CO₂), qui a augmenté d'environ 60 % par rapport à son niveau de l'ère préindustrielle (<http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/figures/observed-trends-in-the-kyoto-gases-1>).

1.3. Rétroactions et points de basculement

Le réchauffement climatique, qui est dû à un accroissement de la concentration de gaz à effet de serre, peut être amplifié par des rétroactions de renforcement, c'est-à-dire par des phénomènes engendrés par les changements climatiques qui accentuent encore le réchauffement. En plus de la rétroaction liée à la vapeur d'eau décrite plus haut, un autre effet important est lié aux divers «puits de carbone», c'est-à-dire à des réactions qui éliminent le CO₂ atmosphérique. Plus de la moitié du CO₂ émis dans l'atmosphère par les activités humaines est absorbé par des «puits» terrestres. Sans ces systèmes, la concentration de CO₂ atmosphérique due à l'activité humaine depuis 1800 serait passée de 280 ppm, son niveau de l'ère préindustrielle, à pratiquement 500 ppm, soit bien plus que ce que l'on observe actuellement (Richardson et al., 2009).

Toutefois, la fraction des émissions absorbées par ces puits semble avoir diminué ces 50 dernières années en raison de divers phénomènes (acidification des océans, changements dans la circulation océanique, contraintes liées à la température et aux nutriments pour l'absorption du CO₂ par le sol), certains éléments laissant à penser que cette fraction sera appelée à diminuer dans les décennies à venir (Canadell et al., 2007). Si cette fragilisation des puits de carbone se poursuit, une fraction plus importante des émissions

restera dans l'atmosphère, ce qui nécessitera des actions plus importantes de réduction pour atteindre certains objectifs. En outre, certains réservoirs de carbone auparavant inertes peuvent être mobilisés par une hausse des températures et rejeter du CO_2 ou du CH_4 (un gaz à effet de serre bien plus puissant) dans l'atmosphère. Les réservoirs concernés sont les tourbières tropicales, sensibles aux opérations de défrichage et de drainage, mais aussi les vastes réservoirs de CH_4 du pergélisol arctique (Dobinkski, 2011) qui sont sensibles au réchauffement climatique (Zimov et al., 2006).

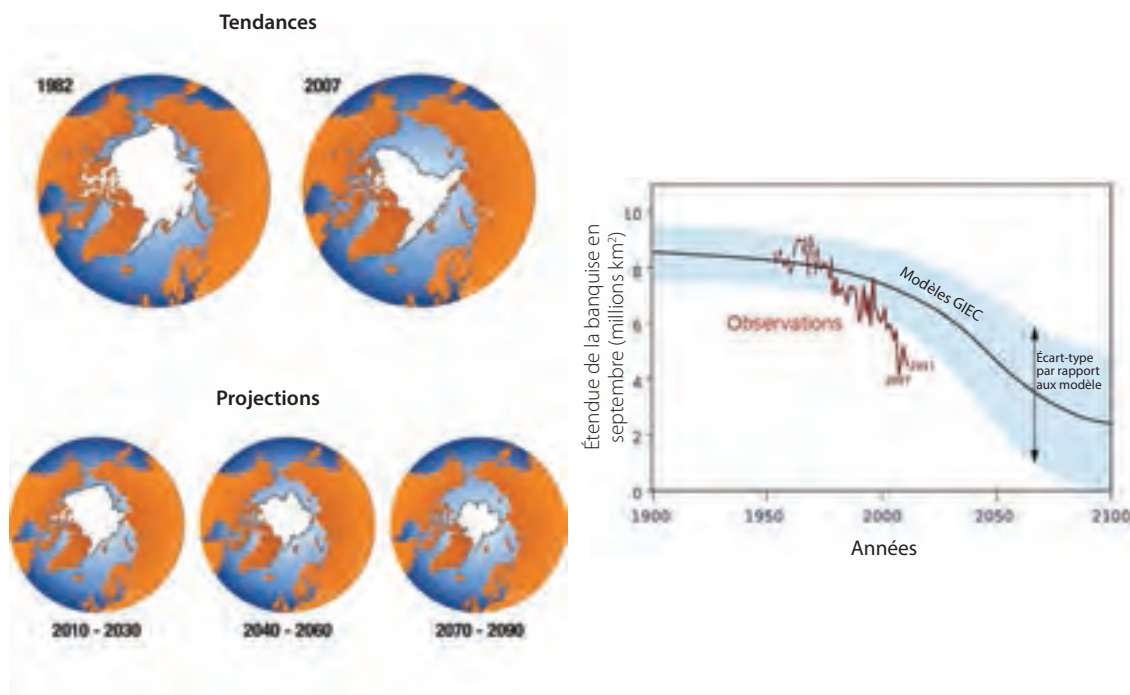


Figure 15. (a). Recul de la banquise en Arctique : étendue en septembre 1982 et en septembre 2007, et projections pour les fins d'été à venir (2010-2030, 2040-2060 et 2070-2090) (<http://maps.grida.no/go/graphic/the-decrease-of-arctic-sea-ice-minimum-extent-in-1982-and-2007-and-climate-projections-norwegian>). (b) Résultats et observations des modèles relatifs au recul de la banquise (Rahmstorf, 2011).

La diminution rapide de la banquise en Arctique, en particulier en été (Richardson et al., 2009) représente une évolution importante. La banquise a en effet reculé de l'ordre de 3 % à 4 % tous les dix ans ces trente dernières années, la progression étant encore plus rapide en septembre (plus de 11 % par décennie). Il s'avère que la déperdition de glace en Arctique ces dernières années est bien plus importante que ce qui avait été prédit par la plupart des modèles climatiques (figure 15), peut-être du fait que les modèles actuels ne parviennent pas à rendre compte de son épaisseur précise (Wang et al., 2012). La banquise devrait continuer à diminuer en été, voire à disparaître à la fin de la fonte d'été, bien que l'épaisseur de glace puisse rester importante en hiver (AEE, 2012).

Tableau 2. Points de basculement, conséquences préoccupantes, valeurs de seuil en matière d'impact et probabilité de réalisation pour les 50 prochaines années (voir aussi Lawrence et Slater, 2005; Zimov et al., 2006; Vecchi et al., 2006; Challinor et al., 2006; Scholze et al., 2006; Rahmstorf, 2007; Barnett et al., 2008; Kurz et al., 2008; Lenton, 2013; Lenton et al., 2008, 2009; Shanahan et al., 2009).

| Point(s) de basculement | Principales préoccupations | Valeurs seuil d'impact (Probabilité de réalisation dans les 50 prochaines années) |
|---|--|--|
| Fonte de la banquise arctique | Amplification du réchauffement régional et mondial, rétroactions de l'albédo de la glace, ouverture de nouvelles voies maritimes (plus directes) | 0,5 °C à 2 °C au-dessus de la moyenne de 1980–1999 - Oui - |
| Disparition d'une partie des glaces du Groenland et de l'Antarctique occidental | Élévation globale possible du niveau de la mer d'environ 0,5 m d'ici à 2050 | 1 °C à 5 °C au-dessus de la moyenne de 1980–1999 - Oui - |
| Fonte des glaciers continentaux (glaciers alpins par exemple) | Augmentation des crues et des inondations tout d'abord, puis diminution du débit des cours d'eau (pouvant atteindre 30 % sur les 50 prochaines années en Inde); effets sur la navigation fluviale intérieure (notamment) | 1 °C à 3 °C au-dessus de la moyenne de 1980–1999 - Oui - |
| Pergélisol et réservoirs de carbone | Amplification du réchauffement; les rétroactions allant dans le sens d'un emballement sont peut-être exagérées | Pour la Sibérie orientale, 9 °C au-dessus de la moyenne de 1980–1999 - En partie - |
| Forêt boréale | Augmentation des feux de forêt, destruction des réseaux de transport s'y trouvant, problèmes de transport aérien | 3 °C à 5 °C au-dessus de la moyenne de 1980–1999 - En partie - |
| Circulation thermohaline atlantique | Diminution entraînant des changements du niveau de la mer au niveau régional (en particulier dans l'Atlantique Nord) et se répercutant sur certains éléments hydrologiques | 3 °C à 5 °C au-dessus de la moyenne de 1980–1999 - Possible - |
| Phénomène El Niño/Oscillation australe (ENSO) | Effets sur d'autres variables du climat; des phénomènes ENSO plus marqués affecteront de nombreuses régions | 3 °C à 6 °C au-dessus de la moyenne de 1980–1999 - Possible - |
| Mousson d'Afrique occidentale | Reverdissement possible du Sahel et de certaines régions du Sahara. Dans l'hypothèse la plus optimiste, le changement de régime de cette mousson pourrait être très bénéfique | 3 °C à 5 °C au-dessus de la moyenne de 1980–1999 - Effets bénéfiques possibles |
| Mousson d'été en Inde | Interférence avec le cycle des moussons et la fréquence des sécheresses, diminution possible de la mousson; un réchauffement pourrait entraîner des moussons plus marquées et plus variables dans l'année | Liée principalement à un forçage des aérosols - Oui - |
| Forêt tropicale d'Amazonie | Sécheresse, feux de forêt, conséquences sur la production d'électricité hydraulique, la production agricole, les activités de services afférentes et la navigation fluviale, et sur l'un des principaux puits de carbone | Sécheresses plus fréquentes si élévation de la température de 1 °C, dépérissement des cimes à 2 °C au-dessus de la moyenne de 1980–1999 - Oui - |
| Sud-ouest de l'Amérique du Nord | Sécheresses, feux de friche plus nombreux, répercussions sur les ressources en eau | Phénomène en cours -Oui- |

En plus d'avoir des effets directs sur les côtes de l'Arctique, comme une érosion accrue du littoral (Lantuit et Pollard, 2008), le recul de la banquise peut se répercuter de façon bien plus importante sur le climat, la glace reflétant l'essentiel du rayonnement incident du soleil dans l'atmosphère, contrairement à l'eau des océans (ACIA, 2005). Par conséquent, un océan dont la banquise aurait disparu par suite du réchauffement climatique et qui absorbe donc davantage la chaleur, crée une «rétroaction» climatique qui favorise encore le réchauffement. Le recul de la banquise peut donc se répercuter sur les courants marins, la couverture nuageuse, l'humidité et les échanges thermiques à la surface de la mer (GIEC, 2007a).

Une autre considération importante liée à l'ampleur des changements climatiques concerne les points de basculement, c'est-à-dire le moment à partir duquel le changement n'est plus linéaire et réversible, mais brutal et de grande ampleur (et irréversible à l'échelle du temps humain) et où il a des effets considérables sur les collectivités et les infrastructures (Lenton et al., 2008; Lenton, 2013). Actuellement, la politique d'atténuation des changements climatiques (CCNUCC) a surtout porté sur «*[les moyens d'] empêcher[r] toute perturbation anthropique dangereuse du système climatique*». Bien qu'aucun consensus scientifique n'ait été trouvé pour dissocier les changements climatiques dangereux du changement acceptable, on peut estimer qu'une élévation de la température moyenne de la planète limitée à 2 °C au-dessus de son niveau préindustriel est un bon point de départ pour les responsables de l'élaboration des politiques (voir aussi la Conférence de Bali de 2007 et le Sommet du G8 en juillet 2009 G8) (Lenton et al., 2009). Toutefois, si ces objectifs ne sont pas atteints et que les températures dépassent certains seuils, certaines situations pourraient basculer et avoir de graves effets (tableau 2).



Gara de Nord, Bucarest, fortes chutes de neige et blizzard, janvier 2008 © Club Ferroviar

Chapitre 2. Effets des changements climatiques dans les transports

2.1. Introduction

Les effets des changements climatiques et les événements climatiques extrêmes ont des effets divers sur l'infrastructure et les services de transport. Ces effets varient considérablement en fonction du mode de transport, de l'élément climatique en cause, de la situation et des fragilités locales ou régionales, notamment celles liées à l'environnement naturel, mais aussi d'une vaste gamme de facteurs socio-économiques qui ne sont pas précisément décrits dans le présent rapport.

Le secteur des transports remplit de nombreuses fonctions économiques et sociales. Cela étant, vu que l'infrastructure et les services de transport dépendent des conditions météorologiques, il est important de mieux comprendre comment ils peuvent être touchés par le climat actuel et à venir et sa dynamique. Bien que le secteur des transports soit considéré comme étant particulièrement exposé aux changements climatiques (Eddowes et al., 2003; GIEC, 2007b; Karl et al., 2009; Ministère américain des transports, 2012a), les études détaillées sur les conséquences et les impacts, les stratégies d'adaptation et les coûts et les avantages sont relativement rares dans ce secteur par comparaison avec d'autres secteurs comme l'énergie et l'agriculture, (AEE, 2010).

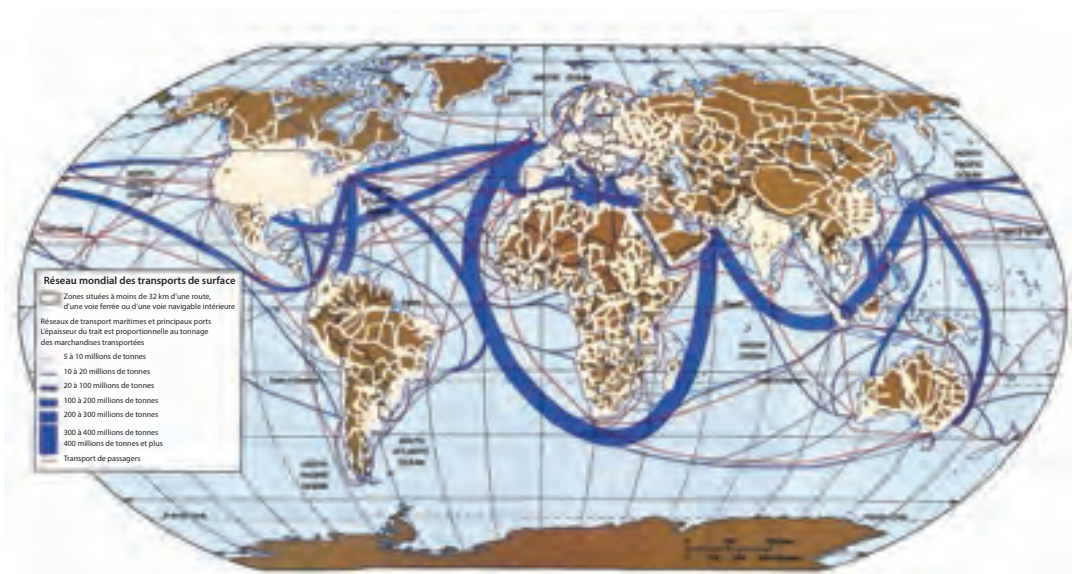


Figure 16. Réseaux mondiaux de transports
https://qed.princeton.edu/index.php/User:Student/World_Transportation_Patterns

Les transports sont devenus un secteur d'activité très important dans le monde (figure 16), nécessitant des réseaux opérationnels et efficaces. Cependant, ils risquent de subir les effets des changements climatiques de plein fouet. Il faut donc prévoir des mesures d'adaptation bien ciblées (Lochman, 2012), reposant sur des recherches détaillées et pertinentes. Imputer aux changements climatiques des dégâts opérationnels ou d'infrastructure n'est pas une tâche aisée, d'autant que les informations sur les dégâts pouvant être attribués aux phénomènes climatiques se limitent surtout à des événements extrêmes et ponctuels (AEE,

2012). Quoiqu'il en soit, l'information sur les risques actuels et à venir que les dérèglements climatiques présentent pour les transports s'est récemment améliorée à la suite de différents travaux de recherche réalisés dans ce domaine (annexes I, II et III).

Les effets du changement climatique représentés ci-dessous concernent avant tout la région de la CEE (figure 17), qui se caractérise par une vaste superficie et une grande diversité de régimes climatiques. L'élévation du niveau de la mer, les ondes de tempête et les vagues risquent d'avoir un impact considérable sur le littoral, entraînant notamment des inondations passagères ou permanentes d'aéroports, de routes, de voies ferrées et de tunnels. Les crues dues à une intensification des fortes précipitations et des pluies torrentielles, ainsi qu'à d'autres phénomènes extrêmes liés à ceux-ci (comme des glissements de terrain, voir Kawagoe et Kazama (2009)) augmenteront le risque de perturbations ou de retards dans les transports aériens, ferroviaires et routiers (figure 18).

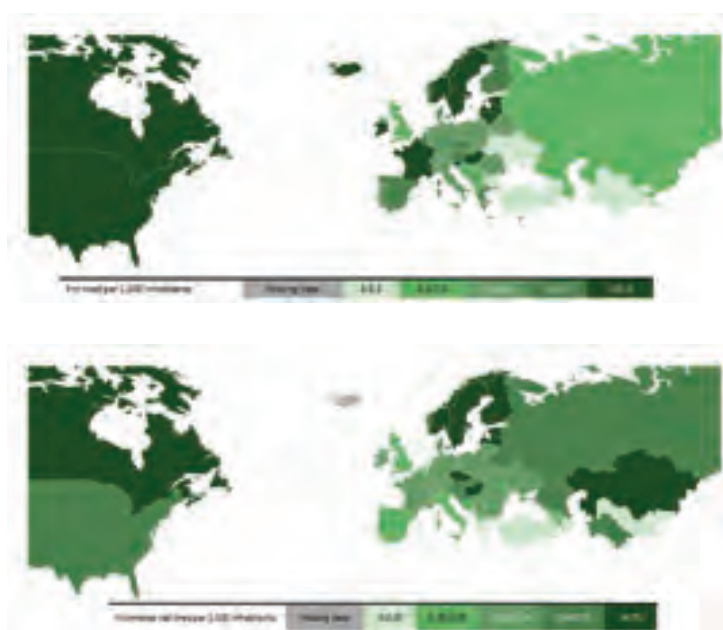


Figure 17. Densité des réseaux routiers (carte a) et ferroviaires (carte b) par millier d'habitants dans la région de la CEE (CEE-ONU, 2011).

Les vagues de chaleur limiteront l'utilisation des chaussées routières et des voies ferrées et les endommageront (AIPCR, 2012), tandis que l'intensité toujours plus forte des tempêtes ou des ouragans tropicaux pourrait accroître les évacuations, endommager les infrastructures et entraîner des interruptions des transports. Le réchauffement de l'Arctique continuera de faire reculer la banquise, allongeant la saison du transport maritime dans cette zone, mais augmentant aussi l'érosion en raison de vagues plus fortes sur le littoral des pays membres du nord de la CEE (Lantuit et Pollard, 2008). Le dégel du pergélisol en Alaska, au Canada et dans le nord de la Fédération de Russie endommagera aussi les infrastructures, tandis que les routes de glace ne seront plus praticables sur des périodes aussi longues qu'auparavant.

La densité importante des réseaux routier et ferroviaire, mais aussi la présence de grands ports et aéroports soulignent l'importance des réseaux de transport dans la région de la CEE (figure 17). La mondialisation ayant multiplié les échanges commerciaux et les transports aussi bien au sein de la CEE qu'en provenance ou à destination de cette région (figure 16 et 19), des réseaux de transport internationaux efficaces, intégrés et résilients sont essentiels à la poursuite du développement économique, en particulier dans les pays d'Eurasie (figure 20).

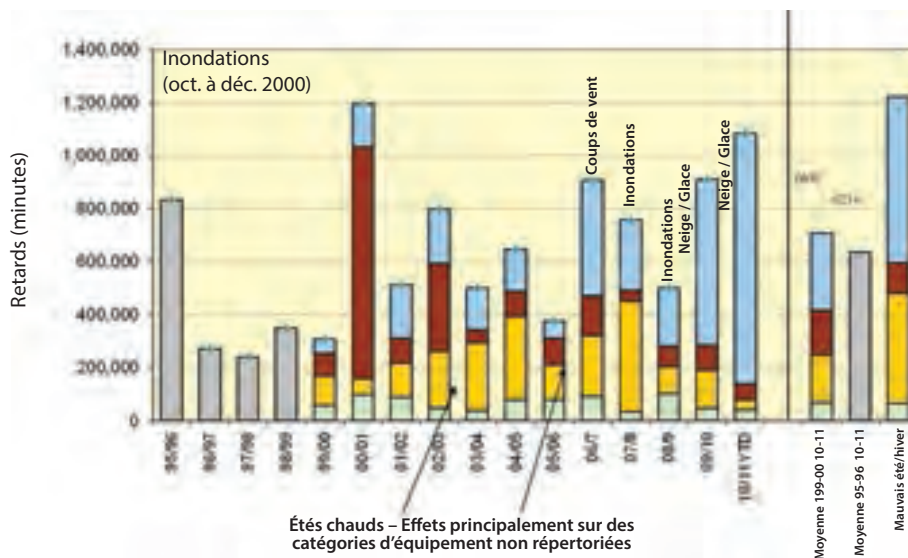


Figure 18. Retards (en minutes) dans les transports ferroviaires britanniques en raison de phénomènes météorologiques extrêmes (Rona, 2011). Légende: retards en été = bleu; retards en automne = rouge ; retards en hiver = jaune; retards au printemps = vert.

En ce qui concerne la sensibilité des réseaux de transport à la variabilité et aux changements climatiques, une étude récente (Ministère américain des transports, 2012a) montre que: (a) les moyens de transports semblent plus sensibles à des phénomènes extrêmes comme des ondes de tempêtes, de fortes précipitations, des vagues de chaleur et des vents importants qu'à des changements progressifs des variables climatiques moyennes; (b) les services (entretien, acheminement du trafic et sécurité) sont plus sensibles aux facteurs de stress climatique que le matériel car les services peuvent être retardés ou annulés pour des phénomènes moins importants que ceux qui endommagent les infrastructures; (c) les moyens de transport sont sensibles à des facteurs de stress dont l'incidence est relativement rare par rapport aux événements liés à une variabilité ordinaire du climat. Ainsi, durant le passage de l'ouragan Katrina aux États-Unis en 2005, la superstructure des ponts du golfe du Mexique s'est révélée sensible aux impacts directs des vagues dus à l'élévation sans précédent du niveau de la mer, suite à l'onde de tempête.



Figure 19. Échanges internationaux (importations et exportations) dans la région de la CEE en pourcentage du PIB (CEE-ONU, 2011).

Des études récentes semblent indiquer que la vulnérabilité du secteur des transports varie en fonction de la région. Le transport ferroviaire semble particulièrement sensible aux phénomènes extrêmes, le coût le plus élevé (en pourcentage) risquant d'être pour le continent européen; le Royaume-Uni, l'Europe centrale et la France, mais aussi l'Europe de l'Est et la Scandinavie devraient être les régions les plus touchées (AEE, 2012).



Figure 20. Grandes lignes internationales de chemins de fer et de transport combiné dans la région eurasiennne de la CEE (CEE-ONU, 2009).

Les projets WEATHER (<http://www.weather-project.eu>) et EWENT (<http://www.weather-project.eu/weather/inhalte/research-network/ewent.php>), deux projets récents relevant du septième programme-cadre de la Communauté européenne, ont porté sur les effets des changements climatiques et des phénomènes extrêmes sur les systèmes de transport en Europe. Le projet WEATHER a répertorié les risques, les incidences économiques et les stratégies d'adaptation de tous les modes de transport. Le projet EWENT était une étude détaillée de modèles climatiques à long terme. Les deux projets ont mis en lumière le manque de données statistiques fiables permettant d'évaluer la vulnérabilité des modes de transport. Dans le projet WEATHER, les coûts pris en charge par le secteur des transports (dommages, réparations et entretien de l'infrastructure, dommages aux véhicules, augmentation des frais d'exploitation) ont été estimés, pour la période 1998-2010, à 2,5 milliards d'euros par an, les coûts indirects liés aux perturbations ayant été estimés à un milliard d'euros par an. Selon ces deux études, le rail serait le mode de transport le plus touché, avec des points névralgiques en Europe de l'Est et en Scandinavie, tandis que les effets sur les chaussées routières se répartiraient plus également, toujours selon ces mêmes études. Le projet EWENT a évalué les coûts annuels moyens des phénomènes météorologiques extrêmes sur la période actuelle et à venir (2041–2070). Dans la période de référence (1998-2010), ces coûts ont été estimés à plus de 15 milliards d'euros, principalement à cause des accidents de la route. Selon les résultats de l'étude EWENT, les mesures prises suite à ces événements seront différentes selon la région considérée. En Europe du Nord et de l'Est, les vagues de froid deviendront moins fréquentes d'ici à 2050, tandis que les vagues de chaleur dureront plus longtemps en Méditerranée. Le transport routier devrait subir des conséquences positives et négatives, tandis que les répercussions seront surtout négatives pour le rail. Les transports aériens devraient également pâtir des changements climatiques dans toute l'Europe.

2.2. Zones de littoral

La variabilité et les changements climatiques se répercutent de différentes façons sur les transports dans les zones de littoral, notamment en raison de l'élévation du niveau de la mer, de la hausse des températures, de l'intensification des cyclones et des ondes de tempête, et des changements possibles dans le régime des vagues. En effet, de tels changements peuvent avoir des répercussions importantes sur les ports (Becker et al., 2013), mais aussi sur d'autres centres et réseaux de transport côtiers. Aux tendances sur le niveau de la mer relatif et intrinsèque à proximité des côtes (en raison par exemple de mouvements tectoniques, voir Vott, 2007) s'ajoute l'impact dû à une élévation du niveau de la mer, aux ondes de tempêtes et aux vagues, et aux précipitation ou aux écoulements extrêmes de fréquence et d'intensité croissantes (Wang et al., 2008; Allan et Soden, 2008; Ruggiero et al., 2010). En outre, la multiplication récente des aménagements du littoral rend d'autant plus difficile la préparation de ces zones aux changements climatiques (Nicholls et al., 2007; Lenton et al., 2009).



Figure 21. (a) Métro de New York (<http://www.bbc.co.uk/news/world-us-canada-20135420>). (b) Inondation dans une rue de New York (<http://eandt.theiet.org/news/2012/nov/sandy-storm-warning.cfm>) après le passage de l'ouragan Sandy (30 octobre 2012). Selon les estimations, les pertes assurées seraient de l'ordre de 10 à 20 milliards de dollars et les pertes économiques totales de l'ordre de 30 à 50 milliards de dollars (EQECAT, 2012).

Cependant, bien qu'il faille calculer l'exposition aux conséquences négatives des changements climatiques à l'échelle de la décennie (Viles et Goudie, 2003), la plupart des informations et des modèles dont on dispose correspondent à des observations à long terme (à l'échelle du siècle ou du millénaire) (Nott et al, 2009), à l'échelle d'une année (Greenwood et Orford, 2008) ou se limitent au phénomène lui-même (Callaghan et al., 2008). Plusieurs tentatives ont été faites pour créer des bases de données mondiales sur les risques pour le littoral (Vafeidis et al., 2008), mais aussi des méthodes ou des outils d'évaluation de la vulnérabilité du littoral à l'élévation du niveau de la mer et aux phénomènes extrêmes (Hinkel et Klein, 2009; Ramieri et al., 2011; Peduzzi et al., 2013; Ranasinghe et al., 2013). Toutefois, dans ce domaine, les travaux sont loin d'être terminés (Nicholls et al., 2007; McLeod et al., 2010).

Même si l'inondation du littoral en raison de l'élévation du niveau de la mer à longue échéance (figu es 3 et 4) posera certainement un problème important pour les populations vivant sur les côtes, mais aussi pour les activités, les infrastructures et les équipements dans les zones côtières peu élevées (McGranahan et al., 2007), les conséquences les plus graves seront liées à de fortes hausses du niveau de la mer dues à des cyclones tropicaux ou à des tempêtes extratropicales (Ebersole et al., 2010; Stockdon et al., 2012), en particulier pour les deltas, les petites îles et les grands centres urbains côtiers (Dasgupta et al., 2009) (figu es 21 et 22)⁸.

⁸ L'ouragan Sandy de 2012 a provoqué une véritable catastrophe dans les transports publics (bus, métro, trains de banlieue). Le 30 octobre 2012, c'est-à-dire le lendemain du passage du cyclone, plus de la moitié des usagers étaient

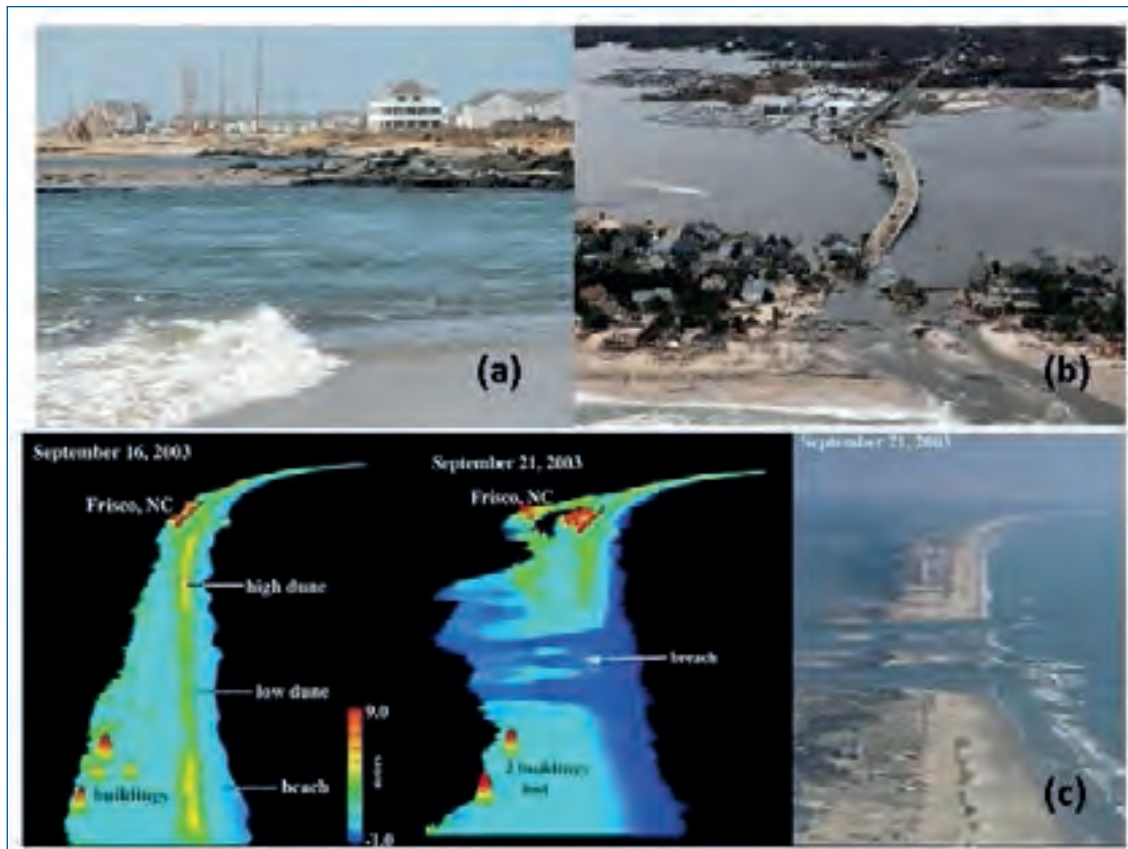


Figure 22. (a) Les ondes de tempête, les vagues et les courants de l'ouragan Isabel (août 2003) ont creusé un chenal sur l'autoroute 12, à travers l'île de Hatteras (Caroline du Nord, États-Unis). L'océan Atlantique est à gauche de l'image, tandis que les débris de la chaussée sont visibles à droite (Stockdon et al., 2012). (b) Les ondes de tempête, les vagues et les courants de l'ouragan Sandy (octobre 2012) ont détruit une route surélevée à Mantoloking, dans le New Jersey (AP Photo/Doug Mills) (Doran et al., 2012). (c) Images lidar des élévations de l'île de Hatteras (Caroline du Nord) avant (à gauche) et après (au milieu) le passage du cyclone Isabel, mettant en évidence l'érosion et le chenal percé dans le banc de sable (voir aussi la photographie aérienne, à droite) (Stockdon et al., 2012).

Ainsi, l'analyse statistique du niveau de la mer sur le littoral américain sur la période 1900-2010 a révélé que les ondes de tempête provoquées par des cyclones tropicaux étaient comprises entre 2,7 m pour une période de récurrence deux ans, et 8,2 m pour les phénomènes centennaux dans le golfe du Mexique (Needham et al., 2012). Les ports peuvent aussi être menacés par la hauteur des vagues et donc être fermés. En effet, selon l'état des vagues, les grands navires risquent de ne plus pouvoir accoster à cause par exemple de la pénétration dans les ports d'ondes de longue période engendrées par des vagues de houle qui se propagent en groupes (Rossouw et Theron, 2012). L'étendue et la distribution de l'exposition dans chaque zone ou centre urbain dépendent des caractéristiques naturelles (présence de zones humides côtières qui peuvent atténuer l'onde de tempête, voir Wamsley et al., 2010) et de changements anthropiques tels que les schémas hydrauliques et l'aménagement des terres (Le et al., 2007). Il convient aussi de noter que les ports et d'autres infrastructures de transport ne se trouvent pas forcément sur des côtes découvertes, mais dans des estuaires. Par conséquent, les changements climatiques ont des conséquences particulièrement importantes dans ce type d'environnement.

privés de transports en commun, le métro de la ville de New York ayant été fermé. Durant quelques jours, la circulation a été totalement bloquée dans la ville de New York. De l'eau de mer s'est introduite dans de nombreuses infrastructures essentielles, notamment dans le tunnel Hugh L. Carey (Brooklyn-Battery), tandis que huit tunnels utilisés par le métro new-yorkais étaient inondés et que l'eau provoquait des dégâts dans divers autres systèmes de transport régional (HSRTF, 2013).

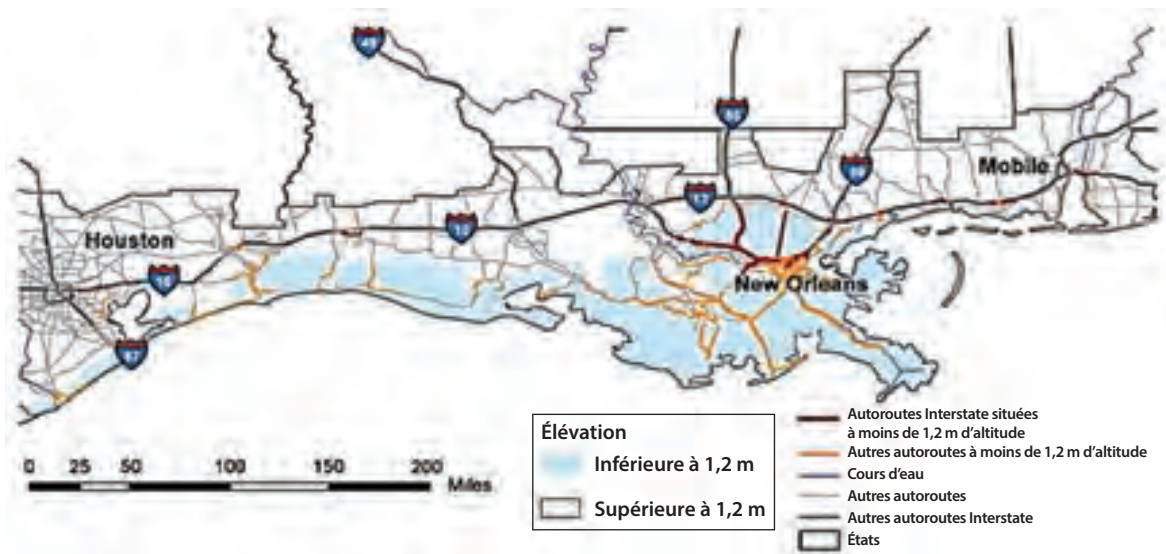


Figure 23. Routes risquant d'être touchées par une élévation du niveau de la mer d'environ 1,2 m, une valeur retenue dans des scénarios d'émissions moyennes et élevées dans cette partie du golfe du Mexique (États-Unis) au cours du siècle. En l'occurrence, plus de 3 800 kilomètres de grands axes routiers devraient être inondés (CCSP, 2008; Karl et al., 2009).

Dans les estuaires, l'élévation du niveau de la mer se traduit généralement par une transgression vers l'intérieur des terres (Pethick, 2001), ce qui modifie (augmente) le niveau de l'eau et a d'autres conséquences (Shennan et al., 2003). Par conséquent, l'élévation du niveau de la mer accroît le risque d'inondation des ports situés dans les estuaires, en particulier si elle se combine à des débits fluviaux élevés et à des ondes de tempête (Karim et Mimura, 2008). L'élévation du niveau de la mer risque également de se répercuter sur les régimes locaux des marées. Une étude récente (Pickering et al., 2012) reposant sur le modèle DCSM opérationnel validé (DCSM98a, cf. Verlaan et al. (2005)) d'évaluation des effets d'une élévation du niveau de la mer sur les marées du plateau continental de l'Europe du Nord-Ouest a montré que dans l'hypothèse d'une élévation de deux mètres, l'amplitude de la composante prédominante de marée M2 et l'amplitude des marées de printemps changeront considérablement (augmentant de plusieurs dizaines de centimètres); avec une diminution dans les zones de résonance du canal de Bristol et de la baie de Saint-Malo et une augmentation dans la baie d'Helgoland et la mer des Wadden, ces changements dans les marées auront probablement des conséquences importantes sur les futures mesures d'adaptation pour les ports en côte découverte et en estuaire, comme la conception d'ouvrages de protection contre les inondations et les stratégies de dragage. Il a été démontré que les changements engendrés par l'homme pouvaient avoir un impact négatif plus grave que l'élévation du niveau de la mer elle-même à cause de leurs effets sur la morphologie et la dynamique des estuaires (Chust et al., 2009; Reeve et Karunaratna, 2009).

Les cyclones tropicaux, leurs ondes de tempête et les inondations par les vagues peuvent provoquer des dégâts considérables, de l'ordre de plusieurs dizaines de milliards de dollars, aux aménagements côtiers (figures 21 et 22) et révéler des facteurs de vulnérabilité inhérents à la conception et à la construction des infrastructures (Arumala, 2012). En ce qui concerne les incidences économiques des changements climatiques sur le littoral, une étude de Nicholls et al. (2008) a mesuré l'exposition des personnes et des biens de 136 villes portuaires de plus d'un million d'habitants (en 2005). Selon cette étude, dans les années 2070, plus de 120 millions d'habitants seront exposés à des phénomènes extrêmes dans ces villes portuaires si des dispositifs de protection adaptés ne sont pas

mis en place. Lenton et al. (2009), qui ont ajouté des points de basculement à leur analyse (voir partie 1.3), estiment que d'ici à 2050, compte tenu de l'exposition de ces grandes villes, la valeur des infrastructures mises en péril dans les 136 métropoles portuaires en question avoisinera 28 000 milliards de dollars.

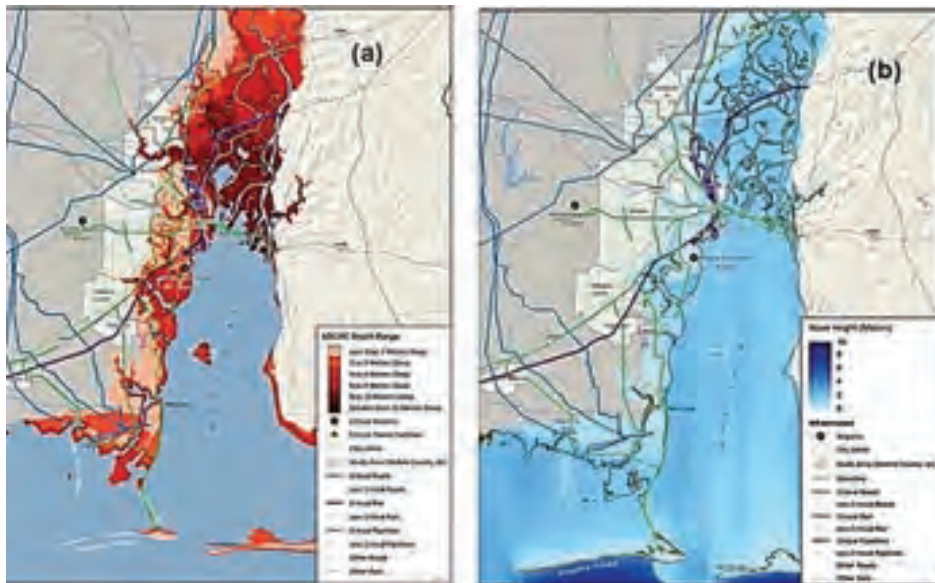


Figure 24. Risque d'inondations et de dommages aux éléments d'infrastructure routière, ferroviaire, aéroportuaire et pétrolières au port de Mobile (golfe du Mexique) en cas d'onde de tempête survenant dans un scénario de cyclone Katrina modifié et pour une élévation moyenne du niveau de la mer de 0,75 m: (a) hauteur de l'onde de tempête (en mètres par rapport au sol actuellement au sec); (b) hauteur des vagues. L'étude a montré que les moyens de transport essentiels de Mobile ne seraient presque pas touchés par une élévation du niveau de la mer comprise entre 0,3 m et 0,75 m, étant donné que cela n'exposerait que 0 % à 2 % du matériel essentiel au bon fonctionnement de chaque moyen de transport; dans un scénario plus pessimiste (élévation de deux mètres), l'exposition du matériel essentiel au bon fonctionnement de chaque moyen de transport serait compris entre 2,5 % et 50 % (Ministère américain des transports, 2012a).

Les transports seront touchés par des températures et des précipitations extrêmes, des ondes de tempête et l'élévation du niveau de la mer. L'inondation des côtes par des ondes de tempête (figures 21, 22, 23 et 24) peut avoir des conséquences très graves pour les réseaux de transport en les rendant inutilisables pendant la durée de l'événement (de plusieurs heures à plusieurs jours) et en causant des dommages considérables aux terminaux, aux installations intermodales, aux centres logistiques, mais aussi aux zones de stockage et aux marchandises, perturbant ainsi sur de longues périodes les chaînes intermodales d'approvisionnement et les liaisons de transport. Les conséquences d'une inondation des infrastructures d'importance cruciale par des ondes de tempêtes sont bien plus graves que celles d'une élévation moyenne à long terme du niveau de la mer (Ministère américain des transports, 2012a).

Les ports, qui constituent des nœuds essentiels pour les réseaux de transport internationaux et qui relient les chaînes d'approvisionnement internationales, seront particulièrement touchés (voir tableau 3) en raison principalement : a) de la longue durée de vie de leurs infrastructures essentielles (de nombreux ports ont été conçus pour fonctionner sous un climat bien plus clément), b) de leur emplacement exposé (figure 25) et c) de leur dépendance à l'égard du commerce, de la navigation maritime et des transports intérieurs, qui sont également vulnérables sur le plan climatique (compte tenu notamment de l'évolution de la demande de transport, CNUCED 2011). Le développement des ports

dépend de divers paramètres comme la disponibilité d'un havre protégé ou en eau profonde et la possibilité de connexions multimodales. Certains ports se trouvent sur des emplacements très exposés aux phénomènes extrêmes, comme les ondes de tempête dues à des cyclones tropicaux ou les vents forts (figure 25) ainsi qu'à l'élévation moyenne du niveau de la mer (CCSP, 2008), qui peuvent provoquer des pertes économiques s'établissant à plusieurs milliards de dollars (Haveman et Shatz 2006).

Tableau 3. Effets des changements climatiques sur les ports maritimes (Crist, 2011).

| Activité risquant d'être touchée | Effets |
|---|---|
| Navigation et accostage | <ul style="list-style-type: none"> a. Élévation du niveau de la mer : diminution des dragages, aménagement des quais, hauteur des tabliers de ponts. b. Ondes de tempête et vents forts : impossibilité d'accoster, engorgements. c. Augmentation des précipitations: envasement nécessitant des dragages accrus. d. Baisse des précipitations: restrictions à la navigation intérieure. e. Banquise: modification de l'accès aux ports. |
| Manutention des marchandises | <ul style="list-style-type: none"> a. Fréquence et intensité croissantes des tempêtes: dégâts, fonctionnement restreint des grues et problèmes de chargement de marchandises en vrac ou liquide en raison du vent et de la foudre. |
| Stockage | <ul style="list-style-type: none"> a. Ondes de tempête et hausse des précipitations: inondations des plateformes et des installations de stockage sur le littoral et le long des fleuves, dégâts, pertes matérielles au niveau des infrastructures, gaspillage de marchandises. c. Hausse de la température: endommagement des structures, augmentation du coût de l'énergie. |
| Déplacements des véhicules dans l'enceinte du port | <ul style="list-style-type: none"> a. Ondes de tempête, hausse des précipitations et mauvaise évacuation de l'eau de pluie: immobilisation des véhicules en raison de l'inondation des installations portuaires. b. Immobilisation de certaines parties des ports en raison d'inondations chroniques ou permanentes. |
| Dommage aux infrastructures, aux bâtiments et au matériel | <ul style="list-style-type: none"> a. Inondations et dégâts dus au vent : risque pour les bâtiments et le matériel. b. L'élévation du niveau de la mer et les ondes de tempête peuvent endommager les infrastructures de protection. c. Les ondes de tempête et l'affouillement dû aux crues peuvent fragiliser les fondations des ponts, des quais et des jetées. d. Une hausse des températures peut entraîner des problèmes sur les pièces métalliques de l'équipement et des infrastructures. |
| Réseaux de transport intérieurs | <ul style="list-style-type: none"> a. Réseaux de transport intérieurs essentiels au bon fonctionnement des ports: des pannes sur des liaisons intérieures essentielles peuvent bloquer le fonctionnement du port. |

L'infrastructure matérielle et les activités portuaires semblent particulièrement exposées aux changements climatiques. L'évaluation des risques induits par les changements climatiques pour un port donné doit passer par l'analyse de toutes les incidences théoriques des changements climatiques, des facteurs de vulnérabilité et des seuils critiques, ainsi que de tous les facteurs contribuant au bon fonctionnement du port. Une étude de cas détaillée du port *Muselles el Bosque Cartagena* (Colombie) (Stenek et al. (2011), voir aussi annexe I) a montré que les changements climatiques pouvaient: (i) modifier le volume ou les itinéraires de la navigation maritime; (ii) accroître les inondations et compromettre ainsi le bon fonctionnement des ports et le stockage des marchandises; (iii) réduire la navigabilité des chenaux d'accès; (d) avoir d'autres conséquences sur l'activité. Toutefois, les ports capables de résister aux perturbations dues à certains événements météorologiques et climatiques pourraient en tirer des avantages commerciaux. L'étude *Muselles el Bosque* a montré que les effets des changements climatiques sont plus ou moins importants en fonction de la localisation, du type et des fonctions du port.

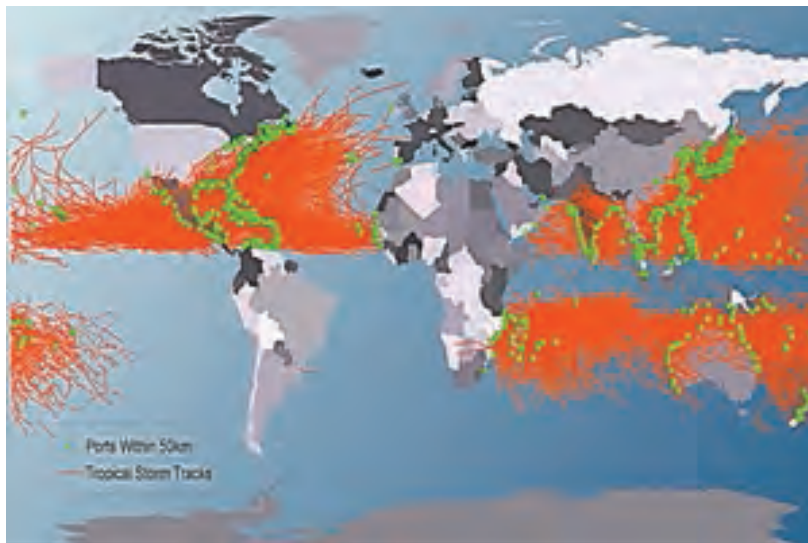


Figure 25. Ports situés à moins de 50 km de la trajectoire d'une tempête tropicale (1960–2010). Statistiques sur les ports et les tempêtes: National Geospatial-Intelligence Agency (2011) et Knapp et al. (2010). (Becker et al., 2013).

Un questionnaire envoyé aux membres de l'AIP/AAPA (voir AIP/AAPA, 2010 et Becker, 2012 annexe II) a montré que si les incidences des changements climatiques sur les ports étaient généralement bien comprises, leurs conséquences spécifiques ne l'étaient pas toujours. Dans les réponses au questionnaire, les effets des phénomènes extrêmes (tempêtes) ont été répartis en catégories: (i) dommages directs; (ii) présence de débris dans la zone portuaire; (iii) conséquences sur l'activité; (iv) conséquences locales et régionales à l'extérieur du port; (v) endommagement des systèmes intermodaux et des chaînes d'approvisionnement; (vi) dégradation de l'environnement. Dans cette étude, 125 stratégies qui pourraient accroître la résilience des ports ont été citées.

D'autres infrastructures de transports sont également très sensibles aux inondations du littoral. Ainsi, une étude récente de Robertson et al. (2011) a montré que la plupart des ponts en béton du golfe du Mexique avaient été gravement endommagés par l'onde de tempête et les vagues de l'ouragan Katrina en 2005. Aucun système n'avait été prévu pour éviter le soulèvement du tablier des ponts ou empêcher de façon efficace le mouvement latéral des piliers face à la considérable poussée hydrodynamique de l'ouragan. Il est urgent de revoir la conception des ouvrages afin d'améliorer les nouvelles constructions ou d'aménager les infrastructures existantes de transports menacées par l'inondation des côtes.

L'une des études les plus détaillées sur les effets des changements climatiques sur les transports a été réalisée dans le golfe du Mexique (voir aussi annexe I). Selon cette étude, une élévation relative du niveau de la mer d'environ 1,2 m (figure 23) pourrait inonder de façon permanente plus de 3 800 kilomètres de routes, plus de 70 % des installations portuaires existantes, 9 % des voies de chemin de fer et trois aéroports. Dans le cas d'une onde de tempête de 5,5 m (c'est-à-dire d'une hauteur inférieure à celle de l'ouragan Katrina), plus de 50 % des autoroutes et des routes nationales, 98 % des installations portuaires, 33 % des voies de chemin de fer et 22 aéroports pourraient être touchés dans le golfe du Mexique (CCSP, 2008). Ces résultats sont à rapprocher d'une autre conclusion de la même étude, selon laquelle les liaisons des systèmes intermodaux – comprenant les mouvements de marchandises en provenance et à destination des ports – pourraient être gravement

perturbées en cas d'inondation ne serait-ce que de tronçons réduits de la chaussée (Savonis et al., 2008). Une étude plus récente sur l'exposition des infrastructures essentielles du golfe du Mexique (Choate et al, 2012; Ministère américain des transports, 2012a) a abouti aux conclusions suivantes: (a) les installations portuaires essentielles sont les plus sensibles aux phénomènes météorologiques extrêmes et aux ondes de tempête, tout comme les lignes ferroviaires côtières indispensables; (b) les inondations d'infrastructures essentielles aux transports seront bien plus importantes si elles sont dues à une onde de tempête plutôt qu'à l'élévation à long terme du niveau de la mer, ce second phénomène amplifiant le premier (figure 24); (c) les oléoducs sont les moins exposés, proportionnellement (3 % à 16 % de linéaire), mais l'exposition varie (de 16 % à 62 % de linéaire de chaussée) pour les routes essentielles, en fonction du scénario.

Des études françaises (ONERC, 2009; Pecherin et al., 2010) montrent également que les changements climatiques auraient des incidences considérables sur l'infrastructure des transports côtiers. Il a été estimé qu'une élévation d'un mètre du niveau de la mer au-dessus du niveau d'inondation d'une tempête centennale (dans l'hypothèse 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) aurait un coût (hors dépenses de fonctionnement et de desserte) pour les routes principales (et non les autoroutes) pouvant atteindre 2 milliards d'euros pour la France métropolitaine. Il a également été constaté que cette élévation du niveau de la mer pourrait inonder le linéaire de 2,9 % des autoroutes, 1,7 % des routes nationales et 6,3 % des voies de chemin de fer. Une autre étude récente (Commission européenne, 2012a) a fourni une première estimation des risques liés à une hausse du niveau 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.

Compte tenu des difficultés croissantes que risquent de connaître les ports australiens du fait des changements climatiques, ces changements et leurs effets futurs sur les infrastructures portuaires ont été analysés dans une étude récente (McEnvoy et al., 2013), qui a fait appel à une méthode d'évaluation intégrée basée sur des approches quantitatives, qualitatives et participatives. Il a été constaté que les travaux d'experts et les connaissances de l'administration portuaire et d'autres acteurs pouvaient grandement contribuer à l'évaluation des risques. Cette dernière s'est faite selon six grands axes: (i) analyse des ports en tant que systèmes; (ii) prise en compte des observations climatiques et météorologiques; (iii) projections climatiques; (iv) comparaison entre informations climatiques et besoins de la recherche (évaluation des risques et planification de l'adaptation pour les infrastructures et les fonctions); (v) compilation de données climatiques pour les ports étudiés; (vi) mise en contexte de facteurs non climatiques déterminants. L'étude a révélé qu'il était extrêmement difficile de remédier aux incertitudes liées aux données climatiques.

D'une façon générale, on prévoit que les modifications dues aux changements climatiques auront des conséquences importantes sur les infrastructures (ports, centres de transport côtiers, etc.) et les services côtiers (SREX, 2012). Il pourrait en résulter de vastes répercussions sur les échanges internationaux, étant donné que plus de 80 % du commerce mondial de marchandises (en volume) se fait par voie maritime (CNUCED, 2011). Tous les modes de transport côtiers sont considérés comme vulnérables, mais l'exposition et l'impact varieront par exemple suivant les régions, les modes de transport, la localisation, la hauteur et l'état des infrastructures de transport (SREX, 2012).

2.3. Crues fluviales, fortes précipitations, chutes de neige et vents violents

Des changements dans les précipitations peuvent modifier l'écoulement des cours d'eau. Ces modifications sont susceptibles d'avoir des effets importants sur les chaussées (figure 26), mais aussi sur les voies de chemin de fer, les ports, les aéroports et les gares routières et ferroviaires. Les dommages directs peuvent se produire durant l'épisode pluvieux lui-même ou après celui-ci et nécessiter une intervention d'urgence. Cela peut également créer des problèmes au niveau de l'intégrité structurelle et de l'entretien des routes, des ponts, des systèmes d'évacuation de l'eau de pluie et des tunnels, qui nécessiteront des travaux de réfection et de reconstruction plus fréquents (Ministère américain des transports, 2012a).



Figure 26. Dommages provoqués par l'inondation de routes. (a) Autoroute 8 (Munich-Salzburg) à Grabenstaett près de Traunstein, sud de l'Allemagne (début juin 2013, Matthias Schrader, AP); (b) Affaissement de la chaussée entre Lofer et Waidring, dans le Tyrol (Autriche) (3 juin 2013, Kerstin Joensson, AP); (c) nœud autoroutier inondé à Deggenförf; (d) effondrement d'un pont dans le comté de Cumbrie (Royaume-Uni) en novembre 2009 (http://news.bbc.co.uk/2/hi/uk_news/8369934.stm).

Les changements climatiques et les modes d'aménagement – plus de 10 millions de personnes et des infrastructures estimées à 165 milliards de dollars se trouvent dans des zones exposées à de très fortes crues le long du Rhin (AEE, 2010) – ont nettement aggravé les risques de crues ordinaires ou soudaines⁹ (figures 8, 9 et 10, partie 1.1.2). Ainsi, sur la période 1998-2002, l'Europe a connu plus de 100 inondations importantes (notamment les crues catastrophiques du Danube et de l'Elbe, en 2002) qui ont fait des centaines de morts, entraîné le déplacement d'environ 500 000 personnes et des pertes économiques assurées dépassant 25 milliards d'euros (AEE, 2004). De nouvelles crues catastrophiques survenues les

⁹ On peut définir le risque de crue comme étant le résultat d'une probabilité de crue, associée à une exposition d'infrastructures et de populations et à une vulnérabilité calculée à partir des informations sur l'affectation des terres et de l'évaluation des inondations dues aux crues.

années suivantes ont incité l'Union européenne à adopter la directive relative à l'évaluation et à la gestion des risques d'inondation (2007/60/CE) (Commission européenne, 2007). La figure 27 montre les dommages prévus, dus aux inondations induites par les changements climatiques en l'absence de toute mesure d'adaptation ou de réduction des risques de catastrophe (Feyen et al., 2010; AEE, 2010).

Selon les résultats de l'étude PESETA (Ciscar et al., 2009), les sinistres liés aux crues risquent de se multiplier dans la plupart des régions d'Europe occidentale et centrale. Pour les 27 pays membres de l'UE, les dommages annuels prévus, estimés actuellement à 6,4 milliards d'euros, devraient atteindre 14 à 21,5 milliards d'euros (en prix constants de 2006) d'ici à la fin du XXI^e siècle, en fonction du scénario, tandis que le nombre de personnes touchées par les crues augmenterait également pour s'établir entre 250 000 et 400 000. Les augmentations les plus notables des pertes dues aux crues sont prévues en Europe occidentale (Allemagne, Belgique, Danemark, France, Irlande, Luxembourg, Pays-Bas et Royaume-Uni), ainsi qu'en Hongrie et en Slovaquie (Feyen et al., 2010). Parallèlement, le débit et les crues des cours d'eau devraient diminuer dans le nord-est de l'Europe centrale (figu e 10).

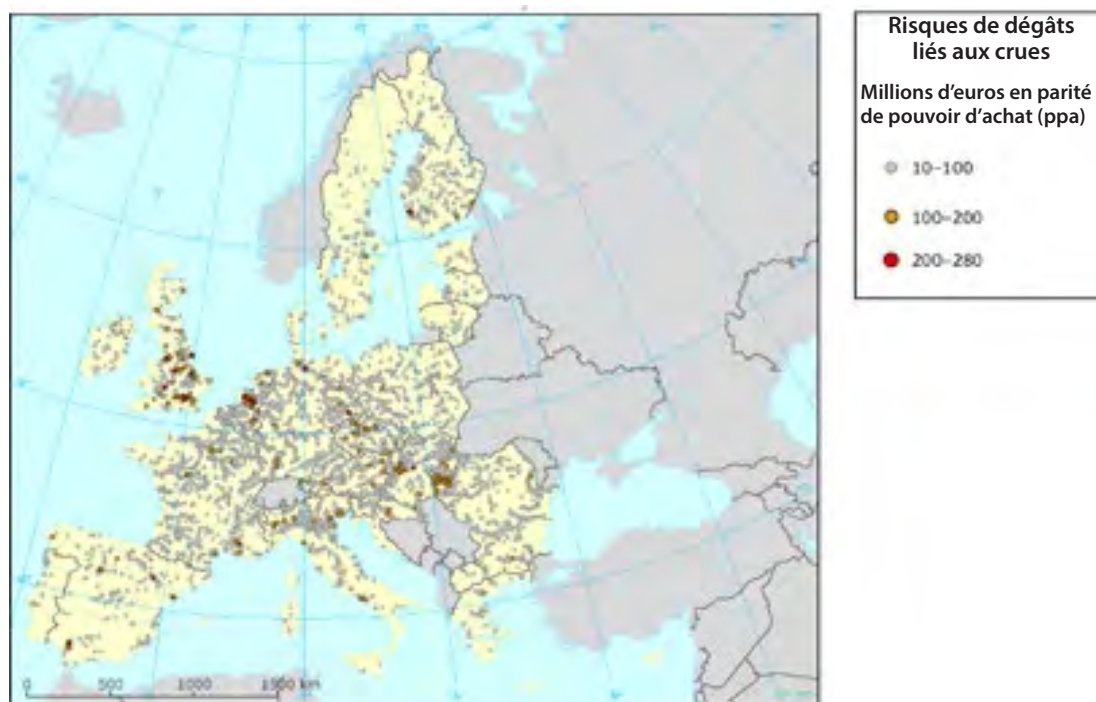


Figure 27. Risques de dégâts liés aux crues en Europe (AEE, 2010). Les estimations ont été calculées dans l'hypothèse d'un événement centennal (par exemple crue centennale) dans les conditions climatiques actuelles et sans dispositif particulier de protection. Les bassins versants de moins de 500 km² n'ont pas été retenus.

Une évaluation de la situation dans la Fédération de Russie à partir des variations climatiques annuelles (Alcamo et al., 2007) donne à penser que ce pays devrait certes connaître une hausse globale des déversements d'eau, mais que le sud-ouest sera exposé à des épisodes de ruissellement faibles plus fréquents. Il convient de noter que, dans cette région, les crues risquent d'être particulièrement catastrophiques pour les réseaux de transport car les principaux axes routiers et ferroviaires se trouvent dans des plaines inondables ou les traversent (figu e 28).

Par ailleurs, des précipitations plus fréquentes, mais aussi fortes et intenses, peuvent provoquer immédiatement des dégâts, saper l'intégrité de la chaussée, perturber l'entretien des routes, des ponts, des systèmes d'évacuation de l'eau de pluie et des tunnels, et entraîner des retards dans le transport aérien (Ministère américain des transports, 2012a). Aux États-Unis, Milly et al (2008) estiment que d'ici 2050, le ruissellement va augmenter dans le nord-est et diminuer dans le sud-ouest du pays (figure 29). Les pluies diluviennes ont déjà considérablement augmenté, les précipitations les plus fortes (1 %) ayant progressé de 20 % en termes de fréquence, tandis que, globalement, les épisodes de pluie n'ont augmenté que de 7 % au cours du siècle dernier (Kunkel et al., 2008). Des précipitations intenses de ce type, qui devraient aussi se multiplier à l'avenir (voir figure 7) risquent par conséquent d'accroître la fréquence et l'intensité des crues catastrophiques dans les principales plaines inondables.

Dans les pays membres du sud de la région eurasienne de la CEE, les crues représentent d'ores et déjà un risque pour les réseaux de transport (les figures 9 et 28 en montrent les effets). Les crues catastrophiques sont susceptibles de toucher tous les modes de transport, comme le montre l'expérience que l'on en fait actuellement. Ainsi, les crues de 2008 dans le Middle West (États-Unis) ont entraîné la rupture ou le débordement de digues dans plusieurs États et des inondations sur des superficies importantes, rendant inutilisables de nombreux ponts routiers et ferroviaires, mais aussi de longs tronçons d'autoroutes, de voies ferrées et de voies navigables (Karl et al., 2009).

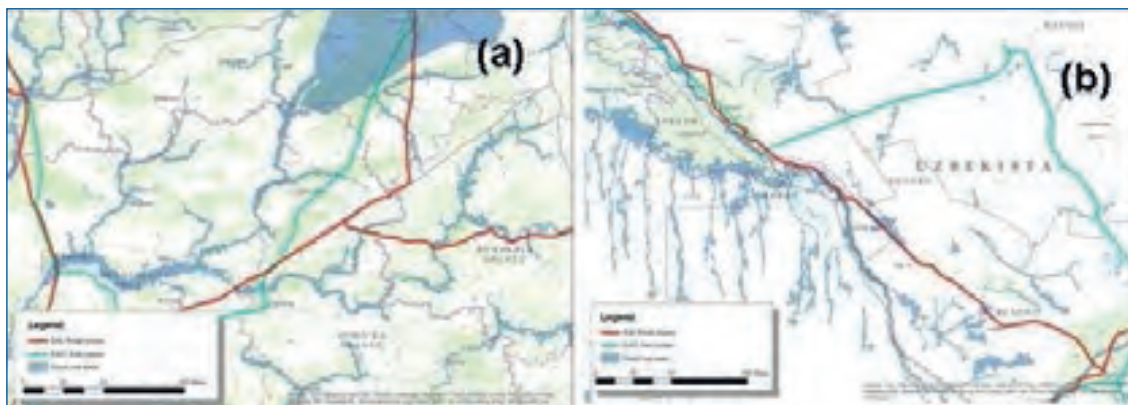


Figure 28. Risque actuel de crues (probabilité de 95 %) pour les réseaux de transport en Ukraine et dans les pays d'Asie centrale membres de la CEE, correspondant aux crues centennales, à partir d'un modèle SIG reposant sur une série chronologique de débits fluviaux (projections de crues provenant de GRID (PNUE) et de la SIPC (2008)).

On s'inquiète en particulier du fait que l'augmentation prévue des précipitations hivernales risque d'entraîner un mauvais fonctionnement des réseaux d'évacuation des eaux de pluie (Galbraith et al., 2005). Il a été recommandé: (i) de modifier en conséquence les paramètres de ruissellement appliqués au calcul des systèmes de drainage des eaux de surface; (ii) de revoir les paramètres de ruissellement appliqués à la conception des buses et des ponts; (iii) d'identifier les sites connus pour la fréquence des inondations de routes et d'évaluer les solutions possibles en fonction de leurs coûts et de leurs avantages, en donnant la priorité aux zones fréquemment inondées; (iv) de dégager à titre préventif les débris des réseaux d'évacuation des eaux de surface et des cours d'eau dans les zones plus exposées au risque d'inondation; (v) d'entreprendre de plus amples travaux de recherche pour mieux estimer les écoulements des bassins versants de façon à fournir des indications

sur la conception d'ouvrages à partir d'une analyse des risques. Une étude réalisée récemment par le Royaume-Uni (Ministère de l'environnement (DEFRA), 2012) semble également indiquer que les infrastructures de transport britanniques seraient touchées à la fois par des phénomènes climatiques extrêmes et par un changement progressif et à long terme du climat. Les réseaux routiers et ferroviaires seraient exposés à d'importants risques d'inondation et d'affouillement au niveau des ponts.

La multiplication des fortes précipitations et des crues augmentera le nombre d'accidents liés à l'endommagement des véhicules et des routes ainsi qu'à une piètre visibilité, les retards et les perturbations de la circulation sur des réseaux déjà engorgés (Potter et al., 2008). Une étude récente reliant changements climatiques et sécurité routière (Hambly et al., 2012) semble indiquer que la modification prévue du régime des précipitations se traduira par des collisions plus nombreuses dans l'agglomération de Vancouver (Canada) d'ici au milieu des années 2050.

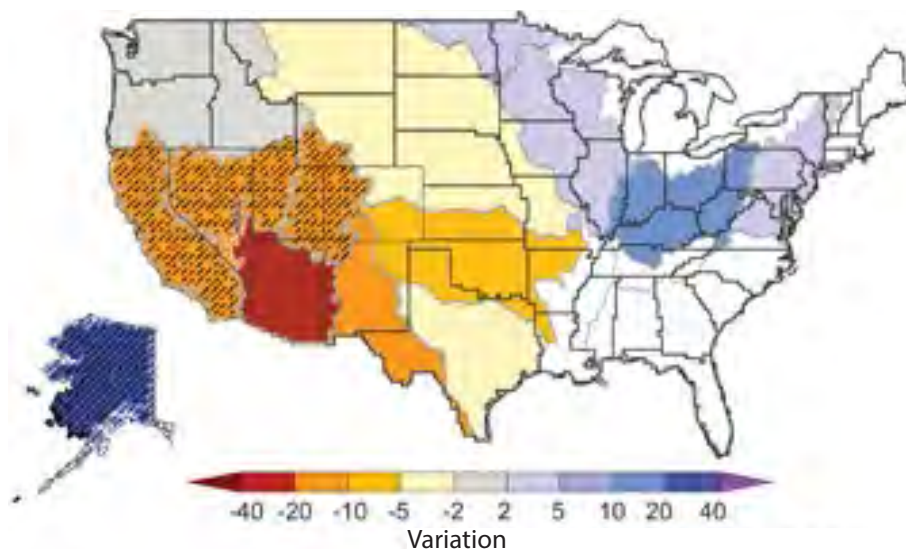


Figure 29. Variations prévues du ruissellement médian sur la période 2041-2060 (par rapport à la période 1901-1970). Les zones hachurées correspondent à une concordance élevée entre projections et les zones lisses à des projections qui sont moins concordantes. Les résultats sont fondés sur des émissions situées entre les scénarios d'émissions élevées et d'émissions basses (Milly et al., 2008).

Les régions où les crues sont déjà courantes seront confrontées à un problème plus grave et plus fréquent. Les eaux de crue stagnantes pourraient considérablement endommager le réseau routier. Les dommages engendrés par la longue immersion de la chaussée en Louisiane ont été par exemple estimés à 50 millions de dollars pour plus de 300 kilomètres d'autoroute. Les installations portuaires seront également sensibles aux inondations de courte durée dues aux précipitations tandis que l'envasement suscité par les précipitations extrêmes pourrait réduire la profondeur des canaux de navigation et accroître considérablement les coûts de dragage (Karl et al., 2009). Les voies navigables intérieures peuvent être touchées par une suspension de la navigation, l'envasement et des changements de la morphologie des cours d'eau, ainsi que par une détérioration des berges et des dispositifs de protection contre les crues (Siedl, 2012). Une augmentation des retards et des annulations de vols, due à l'inondation des aéroports, est également possible, tout comme des effets sur l'intégrité des pistes et d'autres infrastructures aéroportuaires (National Research Council, 2008).

Une étude récente (Wright et al., 2012) a évalué les effets possibles des crues dues aux changements climatiques sur les ponts des États-Unis, qui sont une composante essentielle du système national de transports. Une hypothèse uniforme a été appliquée à l'augmentation des débits de pointe qui fragiliseraient les ponts. Des statistiques des précipitations quotidiennes établies à l'aide de quatre modèles (climatiques) MCG et de trois scénarios d'émissions de gaz à effet de serre (A2, A1B et B1) ont servi à définir une série de changements possibles dans les précipitations et les inondations d'eau douce. Ces statistiques ont ensuite été croisées avec des informations provenant de l'inventaire des ponts des États-Unis (America Bridge Inventory) afin de mesurer la vulnérabilité des ponts à l'affouillement. L'augmentation projetée du débit à des intervalles de récurrence centennale a servi à recenser les ponts présentant un risque important (fi . 30). Selon les résultats, environ 129 000 ouvrages laissent aujourd'hui à désirer, de 48 000 à 96 000 seront menacés d'ici à 2055 par des hausses de débit centennales et entre 66 000 et 117 000 ponts seront concernés d'ici à 2090. Les coûts d'adaptation de ces ouvrages ont été estimés à un montant compris entre 140 et 250 milliards de dollars au XXI^e siècle. Le scénario A2 se traduisait par des coûts supérieurs de 40 % environ à ceux du scénario B1 et supérieurs de 15 % environ aux coûts du scénario A1B. Les estimations pour l'Europe des 27 (Commission européenne, 2012a) semblent plus basses, le coût prévu de protection contre l'affouillement étant de l'ordre de 0,38 à 0,54 milliard d'euros par an, dont 80 % pour les routes et 20 % pour les voies ferrées. De telles disparités dans les estimations sont peut-être dues au nombre différent de ponts entre l'Union européenne et les États-Unis ou à des hypothèses ou des méthodes différentes.

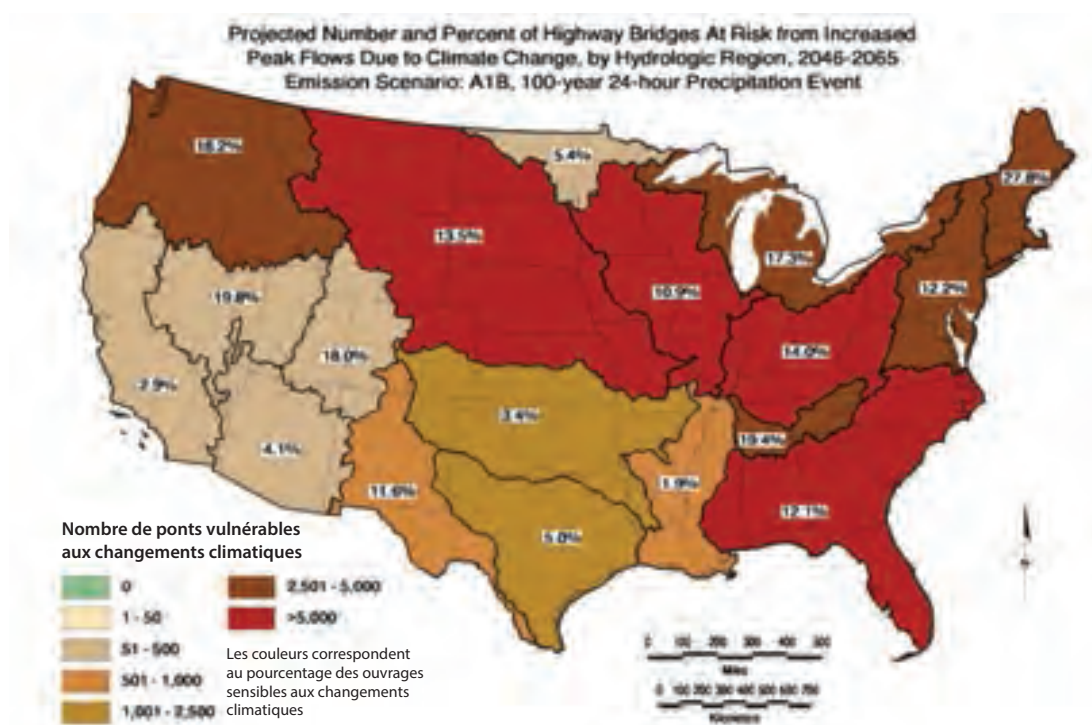


Figure 30. Distribution (nombre et pourcentage prévus) des ponts d'autoroutes vulnérables aux débits de pointe dus aux changements climatiques (scénario d'émissions A1B, phénomène centennal, précipitations sur 24 heures pour la période 2046-2065 (Wright et al., 2012)).

Certaines études sur les effets des changements climatiques sur le réseau ferroviaire britannique (RSSB, 2010) donnent également à penser que les infrastructures seront gravement touchées, 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, ou de problèmes liés à la sécurité du personnel et à l'accès à la flotte et aux dépôts d'entretien. Les coûts de très fortes précipitations, des inondations et d'autres phénomènes extrêmes, qui sont d'ores et déjà estimés à 50 millions de livres sterling par an, pourraient atteindre 500 millions de livres par an d'ici aux années 2040 (Rona, 2011; 2012). Les réseaux routiers risquent également d'être gravement touchés par les hausses prévues de fortes précipitations et d'inondations, ces dernières ayant 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 de chaussées perméables et de liants à base de polymères modifié (Willway et al., 2008).

Selon les estimations, le coût des inondations pour le réseau de transport britannique serait considérable et continuera d'augmenter si les inondations se répètent du fait de l'augmentation des fortes précipitations dues aux changements climatiques (Hooper et Chapman, 2012). Le coût des perturbations de la circulation routière dues aux inondations a été estimé à 123 000 euros au minimum par heure de retard sur chaque grand axe routier (Arkell et Darch, 2006). Si les inondations augmentent à l'avenir à la suite d'une hausse des fortes précipitations, il faut s'attendre à un renchérissement appréciable de ces coûts (Hooper et Chapman, 2012).

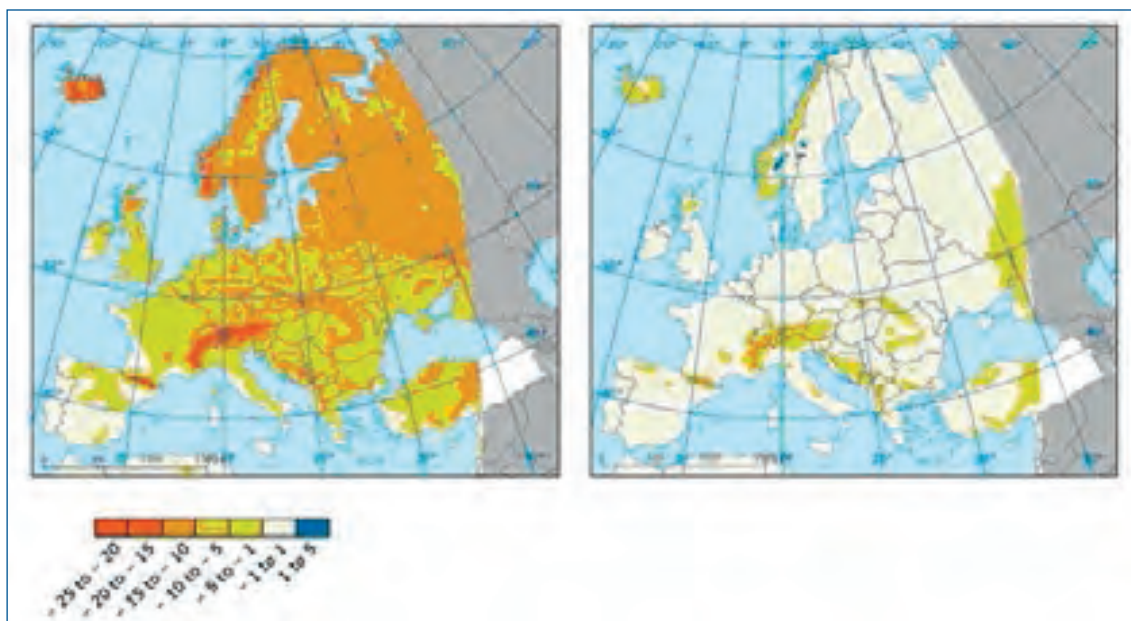


Figure 31. Évolution prévue des chutes de neige annuelles en Europe (AEE, 2012) à partir de six modèles et pour le scénario d'émissions A1B. (a) Moyenne des jours de chutes de neige (1 cm) par an sur la période 1971-2000 et 2041-2070; (b) Moyenne des chutes de neige (10 cm) pour les mêmes périodes à venir et de référence.

La couverture neigeuse saisonnière risque de continuer à diminuer dans le monde. Pour l'Europe, la figure 31 montre les projections d'évolution des jours de chute de neige par an dans le cadre d'un ensemble de modèles multiples. La moyenne de ces modèles fait ressortir une diminution des jours de chutes de neige de plus d'un centimètre en Europe, tandis que les jours où elles dépassent 10 cm augmentent sur des portions importantes du territoire dans le nord de l'Europe et diminuent dans la plupart des autres régions. Toutefois, des incertitudes considérables demeurent dans ces projections, compte tenu des différences importantes entre les limites haute et basse des projections des modèles (AEE, 2012).

Parce que l'enneigement est sensible tant à l'épaisseur de neige fraîche qu'à la température, une augmentation des chutes de neige ne se traduira pas forcément par une couche de neige plus épaisse. Selon une étude récente (Kjellström et al., 2011), le nombre de jours d'enneigement en Europe septentrionale (55 – 70 °N, 4.5 – 30 °E) devrait diminuer et ne pas dépasser 40 à 70 jours sur la période 2071–2100 par rapport à la période de référence (1961–1990), les projections dépendant du scénario d'émissions et du modèle. Malgré la diminution prévue de l'équivalent en eau de la neige dans l'hémisphère nord, les simulations ont aussi mis en évidence des hivers marqués par d'importantes chutes de neige, un phénomène qui deviendra toutefois toujours plus exceptionnel à mesure que l'on s'approchera de la fin du XXI^e siècle. En Europe, une réduction importante de la masse neigeuse risque de se produire en Suisse, dans les Alpes italiennes, dans les Pyrénées, les Balkans et les montagnes turques (López-Moreno et al., 2009; Soncini et Bocchiola, 2011). Dans ces régions, de tels changements pourraient avoir des conséquences très importantes, les eaux de fonte contribuant à hauteur de 60 % à 70 % de l'écoulement annuel des cours d'eau (AEE, 2012).

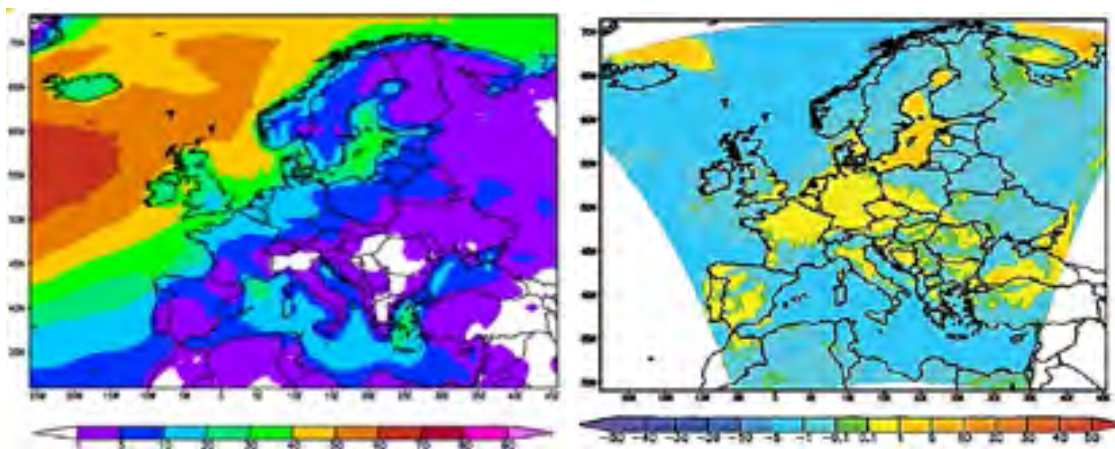


Figure 32. (a) Nombre moyen de jours par hiver (décembre-janvier-février) marqué par des bourrasques de plus de 17 m/s sur la période 1971-2000; (b) Moyenne des jours de bourrasque de même intensité sur la période 2041-2070 (Vajda et al., 2012).

Enfin, les vents violents souvent mais pas exclusivement, liés aux tempêtes tropicales, devraient être plus catastrophiques à l'avenir (Emanuel, 2005; Rahmstorf, 2012). De tels phénomènes peuvent provoquer une submersion des ouvrages de protection, mais aussi des inondations des voies ferrées des zones côtières et des estuaires (RSSB, 2010), endommager certains équipements portuaires comme les grues et les terminaux de chargement, perturber le fonctionnement des plates-formes de forage en mer, des raffineries et des oléoducs, coucher ou détruire les récoltes, et se répercuter indirectement sur le secteur des transports par des interruptions plus fréquentes des vols, l'endommagement des équipements aéroportuaires tels que les terminaux, l'équipement de navigation, les

clôtures de périmètre et la signalisation, abîmer les infrastructures routières et ferroviaires à cause des débris entraînés par le vent et perturber le fonctionnement des routes et des voies ferrées (Karl et al., 2009, Kamburow, 2011). En outre, des modifications de la configuration des vents et de la direction des vagues de vent (Callaghan et al., 2008) peuvent aussi avoir des répercussions importantes par exemple sur le fonctionnement et la sécurité des ports, mais aussi sur l'intégrité des infrastructures routières et ferroviaires côtières. Toutefois, il est notoirement difficile de prévoir la configuration des vents avec certitude. Ainsi, selon des modélisations récentes, les extrêmes de vent ne devraient guère ou pas augmenter en Europe (figure 32), des écarts étant toutefois importants entre les modèles utilisés (Vajda et al., 2012).

2.4. Vagues de chaleur et sécheresse

Les vagues de chaleur, c'est-à-dire des périodes prolongées (de l'ordre de quelques jours ou de quelques semaines) de temps anormalement chaud, peuvent avoir des conséquences graves, voire très graves, sur les services et les infrastructures de transport (Hooper et Chapman, 2012). Ainsi, la vague de chaleur de 2003 en Europe (qui s'est accompagnée d'un déficit de précipitations atteignant 300 mm dans de nombreuses régions d'Europe occidentale et centrale (Trenberth et al., 2007)) a considérablement réduit l'humidité du sol en raison de l'évaporation et l'évapotranspiration intensives de surface, et a créé de fortes rétroactions (Beniston et Diaz, 2004). La chaleur et la sécheresse ont provoqué de nombreux feux de forêt et entraîné de mauvaises récoltes; les pertes économiques (non assurées) pour le secteur agricole européen ont été estimées à 13 milliards d'euros, entraînant des pertes elles aussi très importantes dans les transports. En revanche, la fonte très importante du glacier alpin qui en a découlé a évité au Danube et au Rhin d'atteindre des bas débits qui auraient été eux aussi catastrophiques (Fink et al., 2004). La vague de chaleur et la sécheresse de 2003 en Europe se sont répercutées sur les établissements humains et les services économiques de façons très diverses, créant des tensions sur l'approvisionnement en eau, le stockage de la nourriture et les systèmes énergétiques. De nombreux grands fleuves (comme le Pô, le Rhin ou la Loire) affichaient un niveau d'étiage record, entraînant des problèmes de navigation intérieure, d'irrigation et de refroidissement des centrales électriques (Beniston et Díaz, 2004), alors que la ponctualité des chemins de fer français diminuait, s'établissant à 77 %, contre 87 % l'année précédente. Suite à cet épisode, la France a mis en œuvre un plan de prévention de la canicule, qui a apparemment bien fonctionné lors de la canicule suivante, en 2006 (Pascal, 2008). Dans le sud-est de l'Angleterre, le bitume a fondu durant l'été 2003. Les routes secondaires sont devenues glissantes, des gravillons remontant à la surface à cause de la chaleur (Standley et al., 2009). En outre, le réseau ferré britannique a subi d'importants retards (165 000 minutes de retard entre le 14 mai et le 18 septembre, contre 30 000 minutes seulement sur la même période, en 2004) (Hunt et al., 2006).

Bien que la vague de chaleur de 2003 n'ait pas provoqué de dommages généralisés, qui auraient pu remettre en question l'intégrité et la résilience des voies routières et d'autres ouvrages d'art, la plupart des problèmes étant très localisés et liés au retrait des sols argileux (ONERC, 2009), si les vagues de chaleur deviennent plus fréquentes, leurs conséquences pourraient aussi être plus graves. Des périodes longues et répétées de fortes chaleurs estivales (température de l'air se maintenant à plus de 32 °C peuvent endommager les routes par un ramollissement de l'asphalte aboutissant à la formation d'ornières en cas de circulation intense (Field et al., 2007). Des vagues de chaleur extrême peuvent aussi déformer les rails des voies ferrées, provoquant des déraillements et imposant des limites de

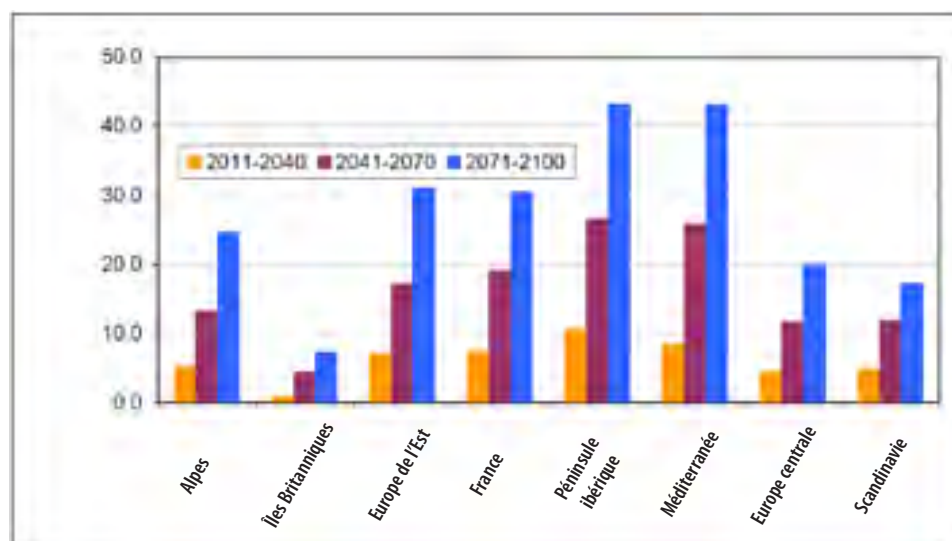


Figure 33. Nombre moyen de jours par an où la température maximale dépasse la température critique des voies et impose une limitation de vitesse à 30 km/h par rapport à la situation actuelle (scénario A1B) (Commission européenne, 2012a).

vitesse. Des déraillements peuvent aussi se produire lorsqu'un flambage de la voie n'est pas détecté à temps. Pour éviter ce phénomène, les exploitants émettent des ordres de marche au ralenti, qui correspondent à une marge de sécurité permettant d'imposer des limitations de vitesse. Ces marges de sécurité sont déterminées en fonction de la température critique des voies¹⁰. Selon une étude européenne récente (Commission européenne, 2012a), le nombre de jours par an où les températures maximales (Tmax) en Europe dépasseront la marge imposant une limite de vitesse de 30 km/h (CRT30, voir figure 33) devrait considérablement augmenter au XXI^e siècle, ce qui laisse à penser que les retards et les coûts d'exploitations augmenteront eux aussi.

Au Royaume-Uni, des étés chauds et secs devraient avoir des effets sur le réseau ferroviaire, notamment: (a) des phénomènes accrus de flambage des voies; (b) un dessèchement des terrassements de voies; (c) des sollicitations supplémentaires des systèmes de climatisation; (d) des difficultés supplémentaires pour ventiler les réseaux ferroviaires souterrains; (e) la multiplication des problèmes de chutes de feuilles du fait d'un allongement des périodes de végétation (Baker et al., 2010). En ce qui concerne le flambage des rails, étant donné que les changements climatiques devraient considérablement modifier le régime des températures au Royaume-Uni, et en particulier accroître la fréquence des températures extrêmement élevées, le nombre de flambages. Par conséquent, les retards devraient augmenter si aucune intervention n'est prévue sur les voies (Dobney et al., 2009).

Par conséquent, le flambage des rails est considéré comme une priorité importante, au même titre que les crues et les inondations du littoral; le secteur du transport ferroviaire britannique (Network Rail), l'autorité de réglementation (ORR) et le Ministère britannique des transports travaillent ensemble à l'élaboration de mesures d'adaptation qui seront mises en œuvre durant la période «de contrôle n°5» (2013-2014 à 2018-2019) et surveillées au plus haut niveau.

¹⁰ Les températures critiques des voies (CRT) correspondent aux températures au-dessus desquelles des limitations de vitesse s'appliquent. Ainsi, CRT70 et CRT30 correspondent aux températures critiques au-dessus desquelles des limites de vitesse de 70 km/h et de 30 km/h doivent s'appliquer, respectivement.

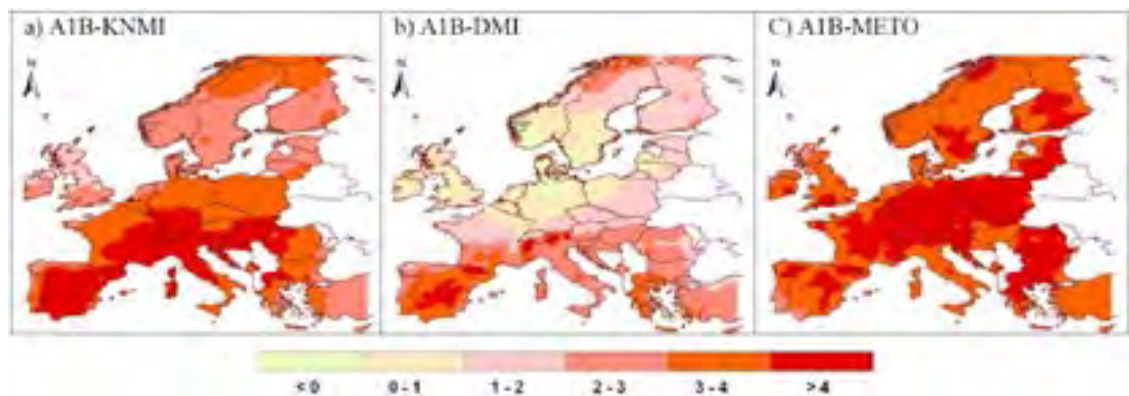


Figure 34. Évolution de la température maximale de la chaussée sur sept jours et dans différentes zones climatiques d'Europe, dans l'hypothèse du scénario A1B (comparaison entre les périodes 2040-2070 et 1990-2010) (Commission européenne, 2012a).

Des températures supérieures à environ 38 °C peuvent créer d'autres problèmes au niveau de l'équipement des transports. Des étés plus chauds et plus secs provoqueront une dégradation, voire l'affaissement des chaussées, ce qui se répercutera sur les performances et la résilience de cette dernière (Scott Wilson, 2009; AIPCR, 2012). Cette élévation de la température peut aussi réduire la durée de vie du bitume (Meizhu et al., 2010), entraîner une expansion thermique et une mobilité accrue des joints de béton, mais aussi endommager les gaines de protection, les enduits et les matériaux d'étanchéité utilisés pour les ponts et dans les aéroports, et créer des tensions dans les structures en acier des ponts (Arnell et Darch, 2006; Ministère américain des transports, 2012a). La surchauffe des véhicules et la dégradation des pneus sont aussi un problème (National Research Council, 2008). Par ailleurs, une étude de l'Agence britannique des autoroutes (UK Highway Agency, 2008) a montré qu'une élévation de la température pouvait gravement endommager la chaussée. Compte tenu de ces projections, les spécifications de surface des chaussées au Royaume-Uni ont été modifiées de façon à supporter des températures plus élevées (DEFRA, 2012). En procédant aujourd'hui à ces modifications au stade de la conception, on intègre les coûts correspondants, ce qui évitera des investissements importants dans des mesures d'adaptation à l'avenir.

Dans une étude européenne récente (Commission européenne, 2012a), des modèles climatiques (voir figure 34) ont servi à calculer le coût annuel lié à la fabrication de nouveaux liants bitumeux, en fonction de différents scénarios de température. Selon cette étude, pour le scénario A1B par exemple, le coût supplémentaire pour l'Europe des 27 serait 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 toutefois de noter que le revêtement routier est généralement remplacé tous les 20 ans et que les changements climatiques pourraient donc être pris en compte au moment du remplacement (SREX, 2012).

Des températures plus élevées risquent aussi de se répercuter sur les normes de réfrigération et les coûts afférents au transport de produits réfrigérés, en particulier dans les zones les plus chaudes de la région de la CEE (Kafalenos et al., 2008). Le nombre et la fréquence croissants des journées très chaudes (figure 12) devraient également réduire les activités de construction, pour des questions de santé et de sécurité (Karl et al., 2009).

L'élévation de la température de l'air augmente aussi l'évaporation, ce qui contribue à la sécheresse, en particulier dans les régions où les précipitations sont moins intenses ou moins fréquentes. Par conséquent, les sécheresses poseront un problème de plus en plus important dans plusieurs régions du monde, notamment dans le sud-ouest des États-Unis et le sud-est de l'Europe (GIEC, 2007a, b); cette évolution se répercutera probablement sur les transports. Les feux de forêt devraient augmenter, en particulier dans le sud-ouest des États-Unis et dans le sud de l'Europe (figure 35), menaçant les infrastructures de transport et entraînant des fermetures de routes et de voies ferrées. Il faut aussi s'attendre à une augmentation des coulées de boue dans les forêts détruites par le feu. Les aéroports pourraient également pâtir d'une baisse de la visibilité induite par les feux de forêt.

Par ailleurs, des hivers plus doux pourraient réduire le coût d'enlèvement de la neige et de la glace, prolonger la saison de la construction et améliorer la mobilité et la sécurité du transport de passagers et de marchandises. La baisse prévue du nombre de journées très froides pourrait réduire l'accumulation de glace sur les navires, les ponts, les systèmes d'amarrage et les bassins, mais aussi le brouillard glacé et les embâcles dans les ports. À l'inverse, le nombre plus important de journées de dégel prévues dans les régions septentrionales pourrait endommager les routes et les ponts (National Research Council, 2008).

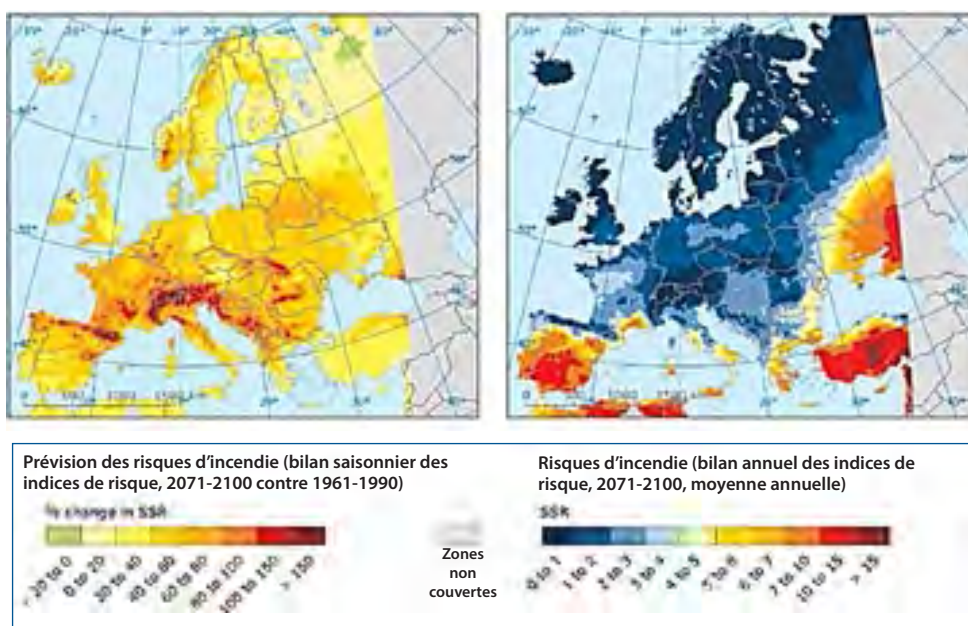


Figure 35. Prévision des risques d'incendie en bilan saisonnier des indices de risque (Seasonal Severity Rating (SSR)¹¹ à partir de projections du modèle climatique régional RACMO2, lui-même basé sur le modèle ECHAM5 et le scénario A1B du SRES (AEE, 2012). Selon ces résultats, les changements climatiques pourraient considérablement accroître le risque d'incendie dans le sud-est et le sud-ouest de l'Europe, mais aussi dans la région de la mer Noire.

La hausse des températures pourrait aussi se répercuter sur les installations aéroportuaires et les pistes en particulier, bien que les aéroports situés dans les régions les plus septentrionales bénéficieraient d'une baisse des coûts d'enlèvement de la

¹¹ Le bilan saisonnier des indices de risques (SSR), qui est calculé à partir de l'indice forêt météo (IFM) du Canada, est réputé être directement lié aux difficultés d'extinction des incendies. Il permet de comparer les risques d'incendie d'une année et d'une région à l'autre. Bien qu'il ne s'agisse pas d'une donnée quantifiable, lorsque sa valeur dépasse 6, on peut considérer que l'on atteint des situations extrêmes.

neige et de la glace. Des températures extrêmes plus fréquentes risquent aussi de créer des difficultés de fonctionnement, par exemple une consommation plus élevée de carburant par les appareils au sol. Elles pourraient aussi se répercuter sur la portance des avions, car l'air chaud étant moins dense, il réduit la portance créée par les ailes et la poussée des moteurs. Cela se traduirait donc par un temps de décollage plus long et, par conséquent, par la nécessité de disposer de pistes plus longues. Dans les aéroports équipés de pistes courtes, les charges transportées pourraient être limitées, des vols annulés et le service perturbé. Une étude récente fait état d'une réduction de 17 % de la capacité de transport de marchandises pour les 747 à l'aéroport de Denver d'ici à 2030 et de 9 % à l'aéroport de Phoenix en cas de hausse des températures et de production de vapeur d'eau (Karl et al., 2009).

Les voies navigables peuvent être gravement touchées par des niveaux d'étiage bas en cas de vagues de chaleur (figure 36). Des projections montrent que si le transport fluvial européen ne devrait pas être très affecté par les changements climatiques jusqu'en 2050 (Siedl, 2012), vers la fin du XXI^e siècle, la baisse du débit des cours d'eau pourrait susciter de graves problèmes (figure 37). Cela pourrait en effet réduire le nombre de voies navigables, raccourcir la période de navigation, diminuer les capacités de transport et renchérir le coût du transport, en tonnes par kilomètre, mais aussi augmenter les échouages (Siedl, 2012; Turpjin, 2012). De telles situations compromettraient gravement le transport de marchandises, d'importantes et onéreuses opérations de dragage devenant nécessaires pour entretenir les voies de navigation (Karl et al., 2009; Krekt, 2010).



Figure 36. Conséquences de la sécheresse de 2003 sur les voies navigables intérieures en France. Les voies fermées à la navigation apparaissent en rouge, celles où la navigation a été limitée le 30 août 2003 sont en jaune (Leuxe, 2011, source: VNF).

Des recherches financées par le Ministère français de l'écologie, du développement durable et de l'énergie ont commencé en 2013. Ce projet, baptisé «GEPET'Eau» (Eric Duviella – EMD Douai – Armines) contribue aux objectifs du Plan national d'adaptation au changement climatique appliqué aux transports. La démarche proposée consiste à

modéliser les voies navigables de façon à rendre possibles des prévisions sur le niveau de l'eau et une gestion adaptative. Plus généralement, cet outil permet la gestion des ressources en eau dans différents bassins versants. Bien que contrôlé, le système artificiel des canaux sera impacté par le changement climatique (crues et étiages).

On cherche à atteindre deux objectifs. Premièrement, veiller à ce que le niveau de l'eau permette une plus grande utilisation du réseau de voies navigables intérieures comme alternative aux transports terrestres. Deuxièmement, améliorer l'efficacité de la gestion des ressources en eau. Ce projet devrait avoir des retombées économiques et en matière de services pour les Voies navigables de France (VNF), ainsi que des retombées socio-économiques pour les collectivités locales.

Une étude récente (projet ECCONET du 7^e cadre de recherche de l'UE) a évalué les effets des changements climatiques, mais aussi d'éventuelles mesures d'adaptation sur le transport fluvial (voir aussi Heyndrickx and Breemersch, 2012). Le projet a consisté à étudier les faibles étiages sur l'axe Rhin–Main–Danube (RMD). L'étude a montré que sur une période de 20 ans, les pertes annuelles moyennes liées aux niveaux d'étiage s'étaient élevées à 28 millions d'euros, les niveaux d'étiage extrêmement bas de 2003 ayant entraîné des pertes de 91 millions d'euros (voir aussi Jonkeren et al., 2007). Différents modèles climatiques ont montré que de faibles débits sur l'axe RMD n'auraient pas de conséquences importantes sur la navigation jusqu'en 2050, tandis que le débit pourrait augmenter de façon modérée sur le Danube supérieur. Selon cette étude, il a également été estimé que les années de sécheresse pourraient se traduire par une augmentation de 6 % à 7 % des coûts totaux du transport par rapport à des années «humides» (voir aussi AEE, 2012).

Un rapport de la PIANC (2006) semble indiquer que le transport fluvial intérieur est plus à même que le transport maritime de répondre à ce type de facteurs des changements climatiques, car dans la plupart des pays, des infrastructures adaptées permettent de maîtriser les débits et l'écoulement. Parallèlement, il convient de réexaminer les exigences de la navigation fluviale au regard des besoins concurrents d'alimentation en eau, de régulation des crues, de production d'énergie hydraulique et d'irrigation.

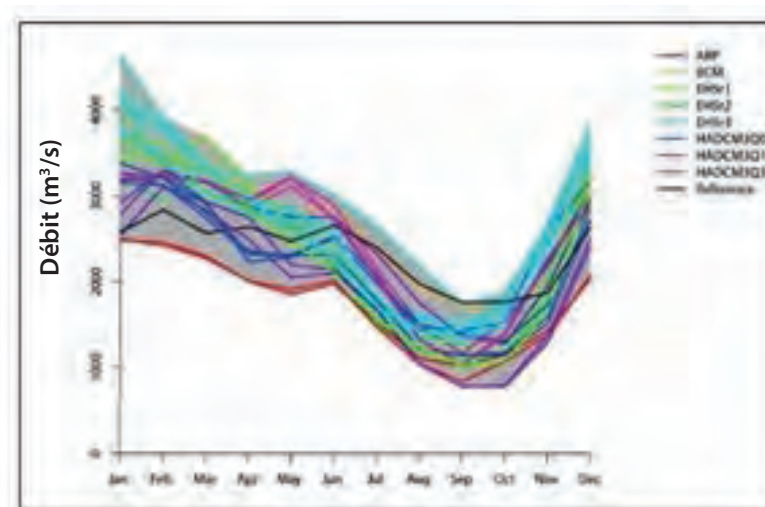


Figure 37. Projections sur 30 ans du débit mensuel moyen à Lobith (Rhin) sur la période 2017-2100, selon différents modèles climatiques. Tous les modèles mettent en évidence une baisse importante de l'écoulement moyen en été (Ben van de Wetering, 2011).

2.5. Mers subarctiques et pergélisol

Le recul de la banquise dans l'Arctique (voir figure 15) a des conséquences positives et négatives sur les transports. Le rétrécissement et le recul de la banquise peuvent élargir les débouchés du secteur des transports (Bennet, 2011). Non seulement ce phénomène allongerait la saison de la navigation dans cette région, en plus d'ouvrir le passage Nord-Ouest (voir figure 15), ce qui réduirait considérablement certaines routes maritimes, avec des économies substantielles à la clé notamment de carburant, mais les changements climatiques ouvriraient aussi de nouveaux ports libres de glace et amélioreraient l'accès aux ressources naturelles dans des zones reculées de l'Arctique. Toutefois, les coûts pourraient augmenter à cause de la nécessité de disposer de nouveaux services d'appui, de changements dans la demande et l'offre de services de transports, sans oublier les coûts considérables suscités par la liaison aux principaux réseaux de transport nationaux et internationaux (Bennet, 2011). Par conséquent, les prochaines décennies pourraient se révéler assez imprévisibles pour le transport maritime sur les nouvelles routes arctiques en raison d'un certain nombre de facteurs, notamment: (a) la forte variation interannuelle de la couverture de la banquise dans l'Arctique canadien; (b) le recul de la banquise dans les chenaux de navigation de l'archipel canadien, qui permettrait des intrusions plus fréquentes d'icebergs entravant la navigation sur le passage du Nord-Ouest (ACIA, 2005).

Parallèlement, en Amérique du Nord, la baisse des eaux dans les Grands Lacs et la voie maritime du Saint-Laurent, due à une évaporation accrue liée au réchauffement du climat, risque de renchérir les coûts du transport, les navires ne pouvant plus transporter autant de marchandises qu'avant. Une étude récente a montré que d'ici à 2050, le coût du transport de marchandises sur les voies commerciales intérieures aura augmenté dans une fourchette comprise entre 13 % et 29 % en raison de ces niveaux d'étiage (National Research Council, 2008). En outre, l'état des routes et des voies de chemin de fer sur le littoral devrait se dégrader à cause de l'érosion due à l'action des vagues sur les côtes libres de glace et au dégel du pergélisol (Lantuit et Pollard, 2008). Les coûts de construction et d'entretien pourraient également augmenter, à cause des dégâts subis par les infrastructures, l'équipement et les marchandises, tandis que l'on prévoit une hausse de la consommation d'énergie dans les ports et d'autres terminaux, mais aussi des difficultés croissantes à assurer la fiabilité du service (Crist, 2011).

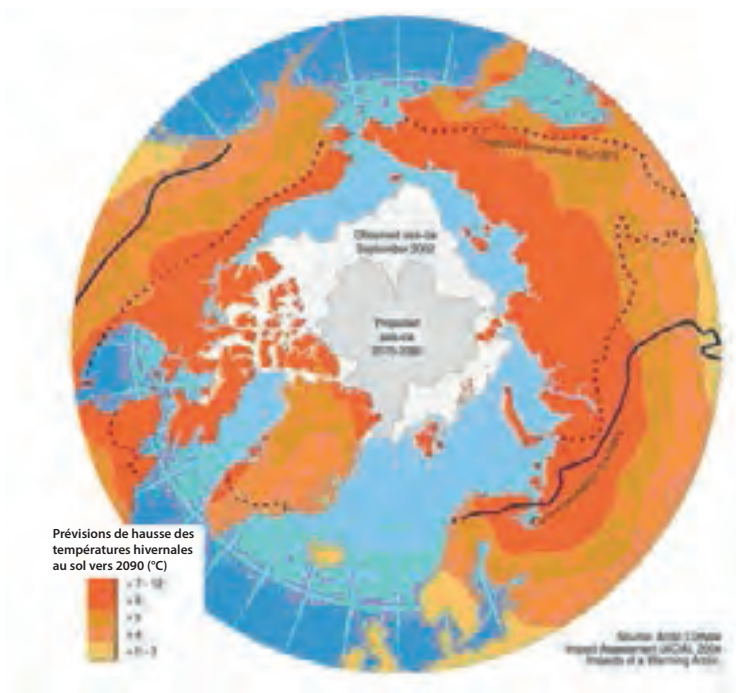


Figure 38. Répartition prévue (à l'horizon 2090) du pergélisol dans le nord de la région de la CEE par rapport au début du XXIe siècle (ACIA, 2005).

Le réchauffement climatique entraîne une dégradation du pergélisol à cause du dégel du sol gelé (à une profondeur de 0,4 à 0,8 m) et un décalage vers le nord de l'isotherme (figure 38) qui marque la frontière méridionale du pergélisol (Sherstyukov, 2009). Toute modification dans la répartition du pergélisol ou dans les cycles de gel et de dégel risque d'accroître les catastrophes naturelles telles que les chutes de pierres, les coulées de débris et les affaissements de terrain (Huggel et al., 2012), d'endommager les fondations des édifices et de perturber le fonctionnement de certaines infrastructures vitales. Les changements climatiques peuvent aussi réduire la superficie totale du pergélisol de 10 % à 12 % au cours des 20 à 25 prochaines années, sa frontière méridionale se déplaçant de 150 à 200 km vers le nord (Anisimov et al., 2004). Daanen et al. (2012) estiment que l'accélération observée du mouvement du pergélisol au cours des 30 dernières années en Alaska est probablement liée à l'approfondissement de la couche active et au réchauffement du pergélisol, eux-mêmes dus aux changements climatiques.

Les projections de modèles (forcés avec le scénario d'émissions A1B) montrent que la température à la surface du pergélisol augmentera considérablement d'ici à la fin du XXIe siècle, tandis que les surfaces gelées en permanence dans les zones de faible altitude à l'intérieur de l'Alaska disparaîtront presque entièrement (Streletskiy et al., 2012). Enfin, une étude récente (Zhang et al., 2012) réalisée dans le parc national d'Ivvavik, dans le Yukon (Canada) prévoit également d'importantes baisses de l'épaisseur du pergélisol.

Les conséquences du dégel du pergélisol sont considérables pour les transports (Field et al., 2007; Qingbai et al., 2008). En effet, ce phénomène entraîne l'affaissement des fondations de la chaussée, mais aussi leur gonflement dû au gel, ce qui compromet l'intégrité et la solidité des structures. Dans les régions septentrionales de la CEE, en Alaska, par exemple, de nombreuses autoroutes se trouvent déjà dans des zones où la

surface du pergélisol est discontinue, ce qui entraîne d'importants coûts de maintenance (Karl et al., 2009). En effet, lorsque le pergélisol dégel, les routes se déforment et les véhicules ne sont autorisés à rouler sur certaines routes qu'en cas de gel total du sol. Ces 30 dernières années, le nombre de jours où les déplacements sont autorisés a diminué, passant de 200 à 100 jours par an (Karl et al., 2009). Actuellement, plus de 1 900 kilomètres de routes et environ 90 000 personnes se trouvent sur plus de 50 % du pergélisol (figure 39) et sont donc exposées aux répercussions du dégel.

Les ponts sont particulièrement sensibles aux mouvements provoqués par ce dégel et ils sont bien plus difficiles à réparer et à modifier que les routes. Par conséquent, les considérations relatives aux changements climatiques sont bien plus importantes dans la conception de ces ouvrages. En outre, certains ponts et routes de glace qui desservent certaines localités, mais aussi les mines et les industries du pétrole et du gaz dans de nombreux territoires du nord sont également touchés. La hausse des températures a déjà réduit la durée d'utilisation de ces ouvrages essentiels. En outre, les réseaux de voies ferrées situés sur des zones de pergélisol peuvent aussi être touchés par le gonflement dû au gel et les mouvements dus au dégel, qui augmentent d'ailleurs considérablement les coûts d'entretien (ACIA, 2005).

Enfin, les aéroports construits sur du pergélisol nécessiteront de nombreuses réparations, voire une relocalisation si leurs fondations sont menacées par le dégel. Selon une étude récente (Larsen et al., 2008), le coût d'entretien des infrastructures publiques de l'Alaska devrait augmenter de 10 % à 20 % (de l'ordre de 4 à 6 milliards de dollars) en 2030, en raison du réchauffement climatique, la chaussée routière et les aéroports absorbant environ la moitié de cette somme. Par ailleurs, l'entretien des oléoducs deviendra aussi plus onéreux. Étant donné que la plupart de ces systèmes ont été conçus au début des années 1970, en fonction du climat et de l'état du pergélisol de l'époque, ils nécessiteront une surveillance, un entretien et des réparations constants (Karl et al., 2009).

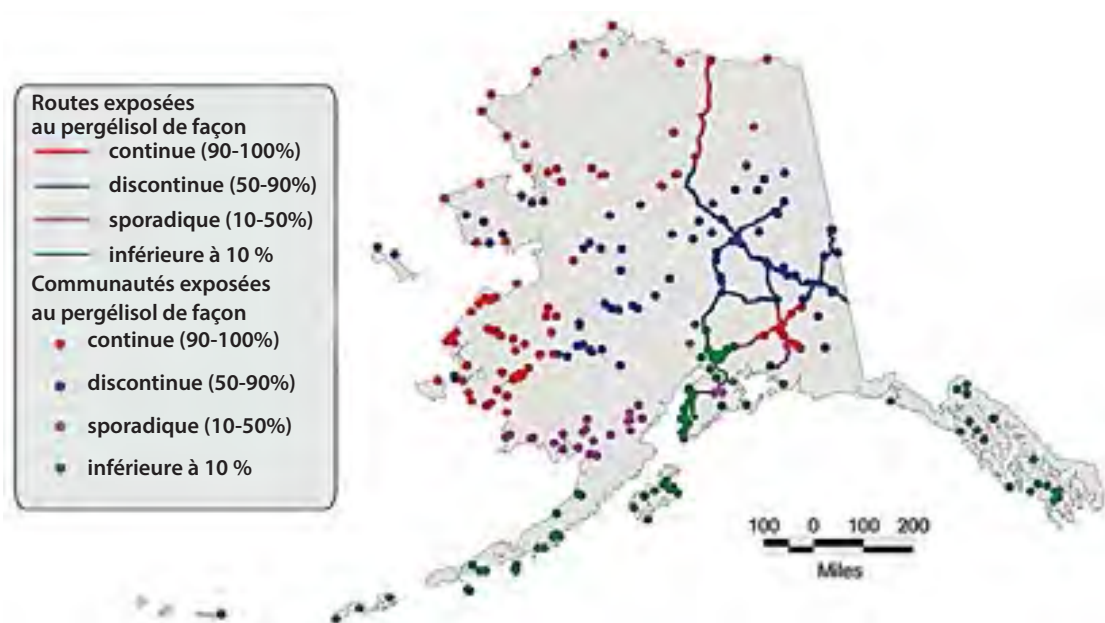


Figure 39. Routes exposées au pergélisol en Alaska (U.S. Artic Research Commission, 2003).

2.6. Conséquences (indirectes) des changements dans la demande de transports

Il ne faut pas perdre de vue que les transports sont une activité axée sur la demande. Les changements climatiques peuvent avoir des effets importants dans pratiquement tous les secteurs de l'économie et, par conséquent, toucher aussi les transports et les réseaux de transport internationaux. Ainsi, le transport de marchandises sera certainement touché, étant donné que les changements climatiques devraient entraîner des modifications importantes de la production (et de sa répartition géographique). Par ailleurs, la productivité dans l'agriculture et l'élevage est extrêmement sensible aux changements climatiques. Ainsi, aux États-Unis, les rendements agricoles pourraient diminuer de l'ordre de 30 % à 46 % durant le siècle à venir si le réchauffement est lent et de l'ordre de 63 % à 82 % s'il est rapide (Thornton et Cramer, 2012).

Schlenker et Roberts (2009), qui ont étudié les effets de la température sur la production de maïs (41 % de la production mondiale), de soja (38 % de la production mondiale) et de coton aux États-Unis, ont prévu une augmentation des rendements pour des températures atteignant 29 °C à 32 °C, et de fortes baisses au-dessus. Selon leurs travaux, les rendements devraient baisser de 79 %, 71 % et 60 % respectivement en cas de réchauffement rapide, et de 44 %, 33 % et 25 % en cas de réchauffement lent. De même, les rendements du blé, la source de protéines végétales la plus consommée – la consommation annuelle moyenne par habitant étant d'environ 76 kg en 2008–2010 - devraient baisser dans la plupart des régions du monde (Gbegbelegbe et al. 2012), avec l'élévation des températures et la multiplication des vagues de chaleur (voir Varshney (2011) concernant les rétroactions négatives liées au niveau élevé de CO₂). Des travaux récents laissent à penser que les modélisations pourraient largement sous-estimer l'ampleur du phénomène (Lobell et al. 2012).

Parallèlement, la demande de blé des pays en développement devrait augmenter de 60 % d'ici à 2050 (Rosegrant et al. 2009). Concernant l'Europe, une étude de Supit et al. (2010) a montré que la modification des températures et du rayonnement risquait de se répercuter sur les cultures européennes. Les effets dépendront de la plante cultivée (figure 40), mais devraient être négatifs pour l'Europe méridionale et positifs en Europe septentrionale (AEE, 2012).

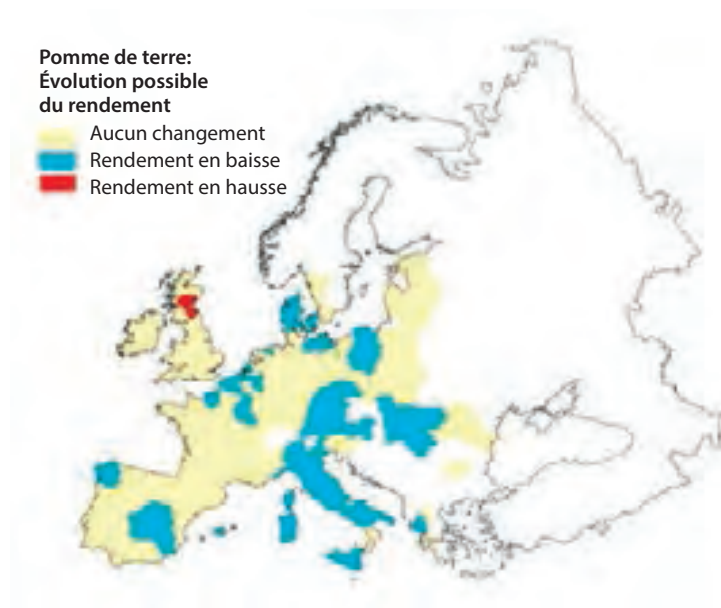


Figure 40. Simulation de l'évolution à long terme du rendement de la culture de pomme de terre en Europe (Supit et al., 2010). Légendes: bleu = baisse importante du rendement ; rouge = augmentation importante du rendement.

Les destinations touristiques les plus prisées sont généralement lointaines et nécessitent le transport d'un nombre croissant de passagers et de marchandises par voie maritime ou aérienne. Parallèlement, au cours des dernières années, la plage a été la destination touristique la plus prisée (Phillips et Jones, 2006), un relief toujours plus menacé par l'érosion due aux changements climatiques (SREX, 2012). Outre l'érosion des plages, l'inondation d'infrastructures touristiques sur les littoraux en raison de phénomènes extrêmes (Snoussi et al., 2008), la salinisation de la nappe phréatique due à l'élévation du niveau de la mer, la surexploitation des aquifères côtiers (Alpa, 2009) et la modification des configurations météorologiques (Hein et al., 2009) créeront des tensions supplémentaires à un secteur d'activité (Rigall-Torrent et al., 2010; Pacheco et Lewis-Cameron, 2010) déjà confronté aux effets des changements climatiques sur des infrastructures vitales de transport telles que les ports, les aéroports et les routes des littoraux (voir CEPALC, 2011; Velegrakis, 2012). Par conséquent, les flux touristiques et les transports afférents devraient subir un choc en raison d'ajustements dans les préférences de consommation et la réaffectation du revenu régional. Par ailleurs, les sports d'hiver attirent des millions de touristes chaque année et dégagent un chiffre d'affaires annuel de pratiquement 50 milliards de dollars rien qu'en Europe (AEE, 2012). Le recul généralisé de la couverture neigeuse prévu au XXI^e siècle (voir partie 2.2) se répercutera sur l'enneigement et, par conséquent, sur la durée de la saison du ski. Dans les Alpes, une baisse importante des zones recevant naturellement assez de neige est prévue, mais ce phénomène devrait aussi se vérifier dans plusieurs autres régions d'Europe (Endler et Matzarakis, 2011). Le tableau 4 récapitule les effets des changements climatiques sur les transports.

Effets des changements climatiques et adaptation à ces changements dans les réseaux de transport internationaux

Tableau 4 Récapitulatif des effets possibles des changements climatiques sur les transports (liste non exhaustive).

| Facteur | Effet | | |
|--|--|--|--|
| Température | Routes | Voies ferrées | Ports, voies navigables intérieures et aéroports |
| <p>Élévation des températures moyennes</p> <p>Vagues de chaleur et sécheresse</p> <p>Variabilité croissante des jours chauds et des jours froids</p> | <p>Chargement thermique et dégradation des chaussées; formation d'ornières dans l'asphalte; endommagement des ponts; augmentation des glissements de terrain en montagne; diminution de la durée de vie des infrastructures; besoins croissants de rafraîchissement (passagers et marchandises), d'où une hausse de la consommation de carburant; périodes d'entretien des ouvrages plus courtes; hausse des coûts de construction et d'entretien; évolution de la demande</p> | <p>Déformation des voies; surchauffe et pannes des infrastructures et du matériel roulant; feux de talus; problèmes d'électronique et de signalisation; limitations de vitesse; diminution de la durée de vie des infrastructures; augmentation de la consommation de carburant due aux besoins accrus de rafraîchissement; périodes d'entretien des ouvrages plus courtes; hausse des coûts de construction et d'entretien; évolution de la demande</p> | <p>Domage aux infrastructures, au matériel et à la marchandise transportée; consommation plus élevée d'énergie pour rafraîchir les passagers ou la marchandise; baisse du niveau des cours d'eau et restrictions de la navigation fluviale; restrictions au niveau des charges transportées par avion; diminution des coûts de l'enlèvement de la neige et de la glace et allongement de la saison de construction</p> |
| <p>Dégradation et dégel du pergélisol</p> <p>Recul de la banquise de l'Arctique</p> | <p>Déformation des routes; diminution du nombre de jours où les routes sont praticables; instabilité des remblais et des accotements; routes littorales touchées par l'érosion des côtes</p> | <p>Endommagement des voies; instabilité des pentes et de l'accotement; restrictions sur le transport de marchandises et de passagers</p> | <p>Endommagement de l'infrastructure portuaire et aéroportuaire; allongement des saisons de navigation nord-sud; raccourcissement du passage du Nord-Ouest et baisse des coûts de carburant mais augmentation des frais liés aux services d'appui</p> |
| <p>Précipitations</p> | <p>Routes</p> | <p>Voies ferrées</p> | <p>Ports, voies navigables intérieures et aéroports</p> |
| <p>Changement dans l'intensité et la fréquence des phénomènes extrêmes (inondations et sécheresses)</p> | <p>Inondations; glissements de terrain et problèmes au niveau des talus, des travaux de terrassement et de l'équipement; problèmes sur des ouvrages essentiels comme les ponts; visibilité réduite entraînant une hausse des accidents; coulées de boue plus fréquentes; retards; évolution de la demande</p> | <p>Submersion, affouillement des ponts, problèmes sur les systèmes d'évacuation de l'eau de pluie et les tunnels; glissements de terrain; inondations des voies souterraines; dommages sur les levées et les digues, problèmes opérationnels; retards, évolution de la demande</p> | <p>Inondations d'infrastructures terrestres; dommages aux marchandises et au matériel; restrictions de la navigation intérieure en raison des sécheresses</p> |

| Facteur | Effet | | |
|--|--|---|--|
| | Routes | Voies ferrées | Ports, voies navigables intérieures et aéroports |
| Vent et orages | Routes | Voies ferrées | Ports, voies navigables intérieures et aéroports |
| Changements dans la fréquence et l'intensité des phénomènes | Dommages aux clôtures; accidents de la route | Dommages aux installations et aux caténaires; surtensions; perturbations dans l'exploitation | Problèmes de navigation et d'accostage |
| Niveau de la mer et tempêtes | Routes | Voies ferrées | Ports, voies navigables intérieures et aéroports |
| Changement du niveau moyen de la mer; destructivité accrue des tempêtes et des ondes de tempête; changements dans l'énergie et la direction des vagues | Risque accru d'inondations côtières et d'érosion des routes côtières; inondations provisoires, routes non praticables durant l'onde de tempête | Affouillement des ponts, dommages aux installations et aux caténaires, restrictions et perturbations du fonctionnement des trains, inondation des ouvrages de terrassement et des talus | Dommages aux infrastructures et aux marchandises en raison des inondations et des changements dans la direction et l'énergie des vagues; coûts de construction et d'entretien des ports plus élevés; sédimentation plus importante dans les ports et les canaux de navigation; conséquences sur les points de passage essentiels (canal de Panama); relocalisation des populations et des activités, problèmes d'assurances. |

Chapitre 3. Analyse du questionnaire

Aux fins de la présente étude, une enquête a été menée afin de mieux comprendre et d'évaluer les perceptions, les capacités et les activités liées aux effets des changements climatiques et aux mesures d'adaptation adéquates. Un questionnaire composé de 44 questions (voir annexe IV) a été envoyé à des gouvernements et à des organisations par le secrétariat de la CEE et 34 réponses ont été reçues (voir annexe V). Les réponses sont analysées ci-dessous.

3.1. Degré de sensibilisation et disponibilité de l'information sur les effets des changements climatiques

À la question de savoir dans quelle mesure les changements climatiques étaient considérés comme un problème pour les transports [question 1, voir annexe V], 62 % des personnes interrogées ont répondu que le problème était grave (note supérieure à 6 sur une échelle de 1 à 10) dans leur pays et leur région. En outre, pratiquement un tiers (31 %) des sondés considère que ce phénomène posera des problèmes dans un délai compris entre zéro et quinze ans, tandis que presque 80 % d'entre eux considèrent que les problèmes surviendront à un horizon de trente ans [question 2]. Si l'on tient compte des calendriers de planification, de conception et de construction des infrastructures de transport, ainsi que de la longue durée de vie des éléments d'infrastructure et des changements climatiques prévus (figure 41), les réponses laissent entendre qu'il est urgent de prendre dès aujourd'hui des initiatives pertinentes. Parallèlement, 54 % des personnes interrogées estiment que les connaissances sur les effets des changements climatiques sur les transports ou la prise de conscience vis-à-vis de cette question sont relativement faibles dans leur pays ou région d'origine [question 3].

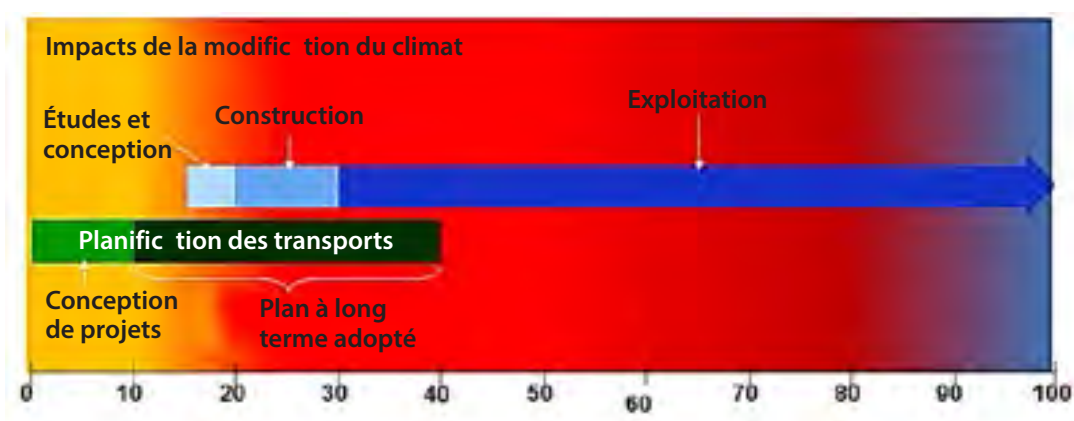


Figure 41. Calendrier des infrastructures de transport et des changements climatiques (CCSP, 2008). Compte tenu de la durée de construction et de vie des infrastructures, les effets du changement climatique doivent être pris en compte dès les premières étapes de la planification, de la conception et de la construction de ces infrastructures

Il est intéressant de se pencher sur les réponses obtenues à la question de savoir quel devait être principalement le public ciblé par la sensibilisation aux effets des changements climatiques sur les transports (figure 42). En effet, 38 % des personnes interrogées considèrent qu'il convient de cibler tout d'abord les organismes de réglementation, les ministères et

les collectivités locales, alors qu'une proportion très considérable (43 %) d'entre elles sont d'avis de cibler les acteurs du secteur, les investisseurs, les dirigeants d'entreprise et les fournisseurs d'infrastructures. Par ailleurs, seules 16 % des personnes interrogées estiment que les acteurs très importants du secteur, tels que les usagers, les entreprises de transport, le grand public et les compagnies d'assurance doivent être elles aussi ciblées. On peut déduire de ces réponses que pour les personnes interrogées, il faut d'abord sensibiliser les autorités de réglementation et le secteur des transports ou bien elles estiment que les usagers et les compagnies d'assurance ne jouent pas un rôle important. Il convient toutefois de signaler qu'une telle logique «descendante» reflète peut-être simplement la structure démographique des personnes ayant répondu (dont plus des trois quarts sont issues d'administrations publiques).

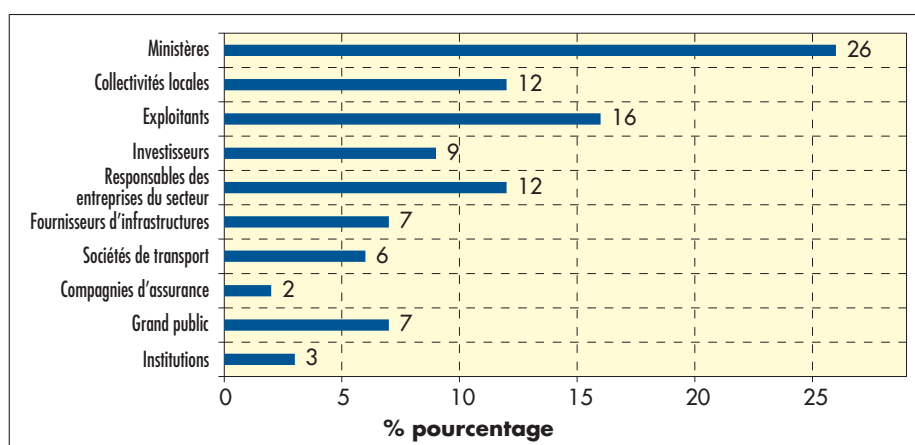


Figure 42. Réponses obtenues sur les principaux publics à sensibiliser aux effets des changements climatiques sur les transports.

En ce qui concerne les effets des facteurs météorologiques ou climatiques (hausse des températures, phénomènes extrêmes, sécheresses, inondations, élévation du niveau de la mer, ondes de tempête, dégel du pergélisol et autres), les personnes ayant répondu sont partagées, 52 % d'entre elles estimant que ces effets sont graves (note supérieure à 6 sur une échelle de 1 à 10) tandis que les autres estiment qu'ils restent relativement limités (note inférieure à 6 sur une échelle de 1 à 10) [question 5]. En ce qui concerne les moyens de transport, 54 % des personnes interrogées estiment que les routes et les voies ferrées subissent l'essentiel des effets des changements climatiques et météorologiques [question 6]. Les effets sur les transports maritimes et la navigation intérieure, le transport aérien et les centres logistiques sont considérés importants par 15 %, 9 %, 11 % et 4 % des personnes interrogées seulement, respectivement.

En ce qui concerne la réalisation d'évaluations précises de la vulnérabilité des moyens, des réseaux, de l'exploitation, de l'infrastructure et des autres paramètres de transport, une majorité nette, de 65 % des personnes interrogées, se dégage en faveur du «oui» [question 7]. De même, ces dernières sont 63 % à répondre que les effets des changements climatiques ont été évalués par leur pays ou leur organisation, mais seules 50 % d'entre elles ont connaissance d'études chiffrées sur les dommages effectifs ou éventuels aux infrastructures de transport [question 8]. Dans ce cas, le facteur le plus étudié est l'impact des inondations et de la hausse des températures sur les infrastructures. Cela peut s'expliquer du fait que ces éléments touchent principalement les routes et les voies ferrées (voir aussi partie 2). Quoi qu'il en soit, 59 % des personnes ont également connaissance d'études sur les conséquences de l'élévation du niveau de la mer et des ondes de tempêtes sur les infrastructures de transport côtier (figure 43). En ce qui concerne le

fonctionnement des infrastructures ou les services de transport, les inondations sont aussi l'aspect le plus étudié, suivi des vents extrêmes, de la hausse des températures, de l'élévation du niveau de la mer et des ondes de tempête. Par comparaison, les vagues de chaleur ne semblent pas être souvent étudiées, puisqu'elles ne représentent que 33 % des réponses, bien que les projections font état d'une hausse de leur fréquence et de leur durée au XXI^e siècle (voir aussi partie 3.4). Enfin, la faible priorité apparemment accordée aux études sur le dégel du pergélisol reflète et peut-être tout simplement les limites géographiques de ce phénomène et la composition du groupe de personnes interrogées. Par ailleurs, d'après les réponses obtenues, le principal obstacle à la réalisation d'études est le manque de financements et l'existence d'autres priorités, plus importantes (51 %) [question 9]. Fait intéressant, la sensibilisation insuffisante du grand public est également citée dans 22 % des réponses obtenues (voir aussi les réponses à la question 4).

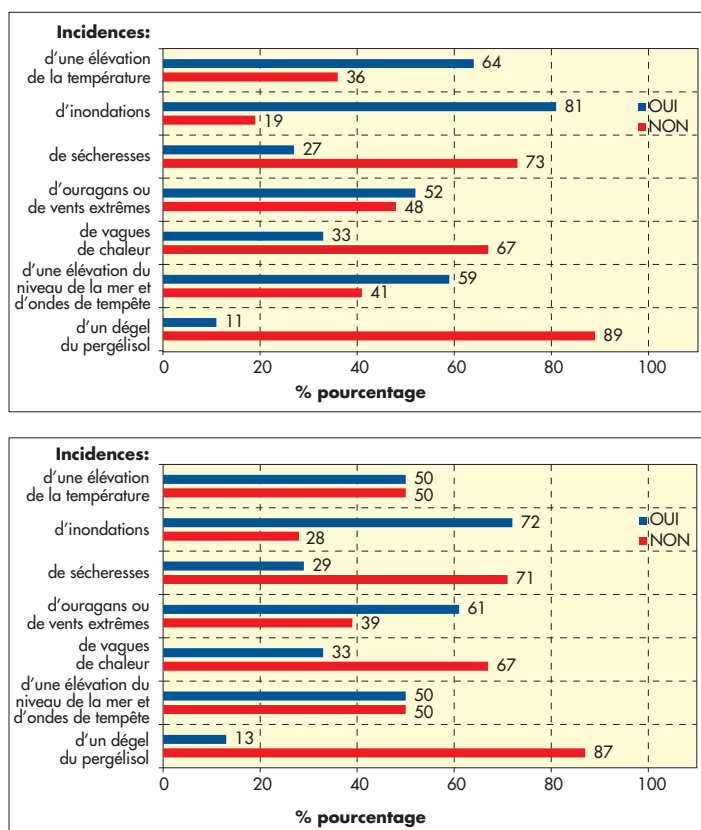


Figure 43. Réponses obtenues concernant les études sur certains facteurs météorologiques et climatologiques touchant (a) les infrastructures de transport; (b) l'exploitation et les services de transport.

D'après les personnes interrogées, les acteurs jouant le rôle le plus important dans l'étude, la recherche et la diffusion d'informations sur les effets des changements climatiques sur les transports [question 10] devraient être les ministères de l'environnement et des transports, suivis des cabinets d'études et des universités. Les organisations internationales sont aussi considérées importantes (figure 44), davantage que les entreprises privées (55 % de notes supérieures à 8 sur une échelle de 1 à 10). L'activité touristique et la production agricole sont considérées comme les deux principaux débouchés pour les transports dans le contexte des changements climatiques. Certains sondés citent également la demande ou la création d'emplois dans le secteur de la construction et de l'aménagement de l'infrastructure des transports, mais aussi dans la recherche et le développement d'infrastructures résilientes et à l'épreuve des changements climatiques, ainsi que la planification et la gestion des transports [question 11].

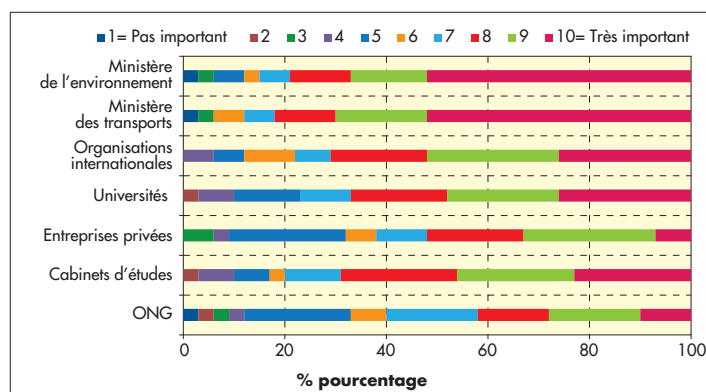


Figure 44. Classement des acteurs et des entités considérés importants pour l'étude, la recherche et la diffusion d'informations sur les effets des changements climatiques sur les transports.

3.2. Degré de préparation et politiques, mesures et initiatives existantes et qu'il est prévu de prendre en matière d'adaptation des transports

Trente-six pour cent des personnes interrogées affirment que leur pays ou leur organisation a adopté ou mis en œuvre une stratégie globale d'adaptation aux effets des changements climatiques, 34 % affirment qu'une stratégie est prévue; les autres (30 % des personnes interrogées) indiquent qu'il n'en existe pas jusqu'à présent ou ne se prononcent pas [question 12]. Des réponses similaires ont été données à la question de savoir si les pays ou les organisations auxquelles appartiennent les personnes interrogées avaient des projets particuliers en matière d'adaptation [question 14]. Les sondés sont 47 % à affirmer qu'une analyse coûts-avantages a été réalisée (22 %) ou est prévue (25 %) pour le plan ou la stratégie d'adaptation aux changements climatiques considérés [question 13]. La majorité des personnes interrogées (53 %) signale toutefois qu'une telle analyse n'est ni prévue, ni réalisée (28 % d'entre elles disant n'en avoir pas connaissance). Sur l'efficacité de la stratégie ou du plan d'adaptation, les quelques réponses pertinentes sont contradictoires, seules 15 % des personnes interrogées considérant que la stratégie est très efficace [question 15]. Les réponses à la question sur l'efficacité de l'évaluation future de la stratégie et de la méthodologie adoptées pour les mesures d'adaptation [question 16] sont également contradictoires. En effet, 39 % des personnes interrogées n'ont pas répondu à cette question, les autres indiquant que les méthodes d'évaluation en place sont des rapports d'étape (14 %), des mesures de la performance (14 %), des comparaisons avec des normes (6 %), une évaluation permanente des risques (6 %), la surveillance des émissions (6 %), des indicateurs de suivi (6 %) et un suivi scientifique (6 %).

À la question de savoir quelles actions concrètes sont prévues pour accroître la résilience du réseau de transports aux changements climatiques [question 17], environ 25 % des réponses obtenues font état de l'absence de toute action, en cours ou prévue, tandis que les autres personnes interrogées semblent avoir connaissance ou indiquent l'adoption d'une vaste gamme d'actions ou de mesures d'adaptation, en fonction à la fois des besoins qui apparaissent et de leur domaine de compétence (figure 45). Ces mesures sont liées, plus ou moins étroitement, à l'investissement, à la conception, à la construction et à l'exploitation de réseaux de transport [question 18]. Toutefois, aucun détail supplémentaire n'a été fourni. Fait intéressant, une des personnes interrogées indique que la construction d'un réseau RTE-T serait un pas en avant vers le renforcement de la résilience des réseaux de transport (voir aussi partie 4.15).

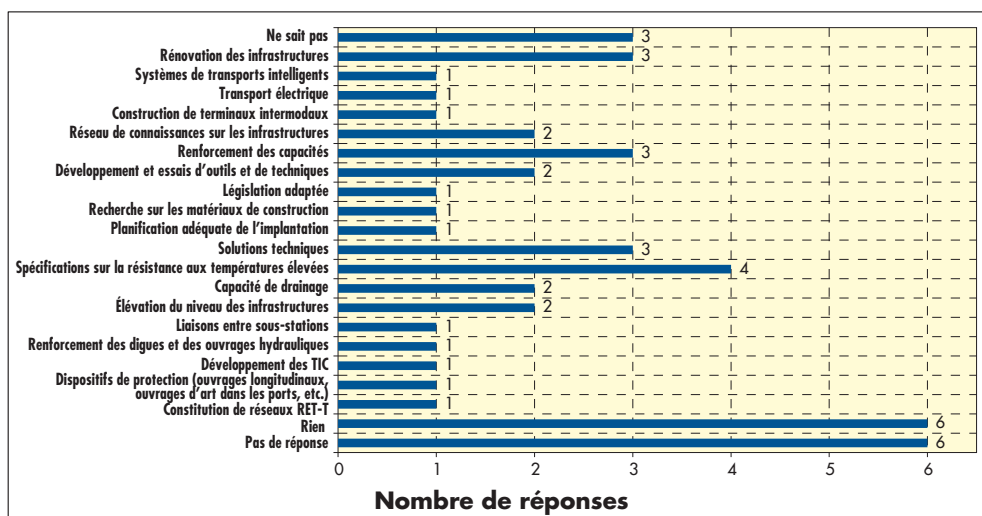


Figure 45. Mesures prises ou prévues pour renforcer la résilience des réseaux de transport telles qu'indiquées dans les réponses.

En ce qui concerne l'intégration du phénomène du changement climatique (phénomènes extrêmes, hausse des précipitations, élévation du niveau de la mer, etc.) à la planification ou à la conception de nouvelles infrastructures de transport [question 19], la grande majorité des personnes ayant répondu au questionnaire signalent que ces effets sont pris en compte dans une certaine mesure (59 %) ou dans une mesure importante (28 %). Les meilleures pratiques ou les meilleurs enseignements cités sur l'adaptation des transports aux changements climatiques [question 20] sont principalement les suivants : sensibilisation aux futurs effets et évaluation de ces derniers (22 %), planification efficace (9 %) et collaboration entre toutes les parties prenantes (10 %). Concernant l'élaboration ou la planification de systèmes d'intervention d'urgence [question 21], la majorité des personnes interrogées signale que le pays ou l'organisation qu'elles représentent dispose déjà de systèmes opérationnels d'intervention d'urgence pour l'ensemble du secteur et pour chaque sous-secteur des transports. Enfin, il semblerait que, à la connaissance des personnes interrogées, le secteur des assurances a intégré la dimension des changements climatiques seulement dans certains cas et dans une certaine mesure (29 %).

3.3. Besoins d'informations, de statistiques et de financements, et travaux de recherche

La nécessité de disposer d'informations chiffrées, d'effectuer des travaux de recherche et de bénéficier de financements est des questions fondamentales. Dans les réponses obtenues, les informations et les statistiques, ou les prévisions les plus précieuses pour l'élaboration de solutions adaptées [question 23] concernent avant tout les précipitations (28 %), les températures (24 %), les vents de terre extrêmes (23 %), les ondes de tempête côtières et l'élévation du niveau de la mer (20 %). Il semble une fois de plus que ce sont les incidences des inondations, de la hausse des températures et des vents extrêmes sur les infrastructures et les services de transport qui préoccupent principalement les personnes interrogées, étant donné que ces phénomènes se répercutent avant tout sur la chaussée routière et les infrastructures et services ferroviaires. Il convient toutefois de préciser que l'incidence de ces phénomènes sur les transports sont aussi les plus étudiés (voir figure 43) et que les personnes interrogées estiment peut-être que les efforts de suivi et de prévision de ces facteurs sont bien plus importants. Ces personnes indiquent aussi que les sources

les plus sûres d'informations pertinentes sont les autorités publiques et les organismes nationaux (42 %), suivis par les institutions spécialisées (13 %) et les universités (7 %) [question 24]. Notons au passage que les organisations européennes et internationales sont peu citées en tant que sources d'informations pertinentes (5 %); ce point de vue semble contradictoire avec le rôle important que les personnes interrogées semblent attribuer aux organisations internationales en ce qui concerne les études, la recherche et la diffusion d'informations (voir figure 44).

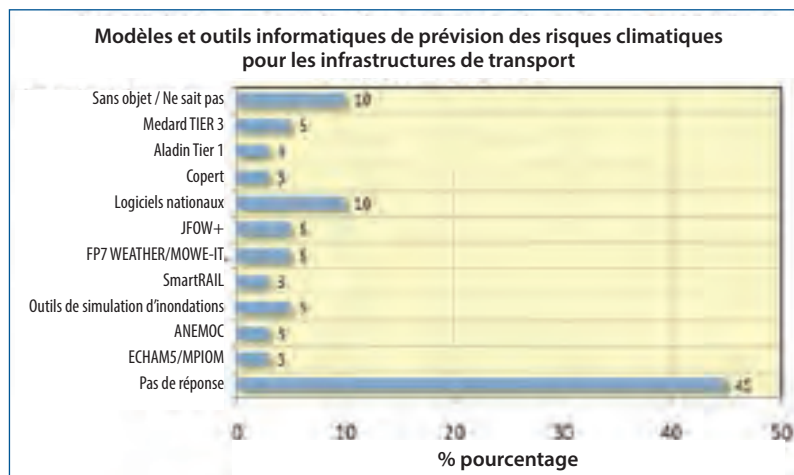


Figure 46. Modèles et outils informatiques (cités par certaines personnes interrogées) permettant de prévoir les effets du risque climatique sur les infrastructures de transport [question 28].

La disponibilité de statistiques et d'informations [question 25] est plutôt mal notée par les personnes interrogées. En d'autres termes, il y a plus de réponses «très peu disponibles» (6 %) et «peu disponibles» (27 %) que «facilement disponibles» (9 %) et «très facilement disponibles» (9 %). De même, en ce qui concerne la validité, la pertinence et la qualité des statistiques et des informations disponibles [question 26], les réponses sont plutôt négatives : très mauvaise, 6 %; médiocres, 27 %; assez bonnes, 40 %; bonnes, 15 %; et très bonnes, 6 %. Plus de la moitié (58 %) des personnes interrogées ne semblent pas savoir que des modèles et des outils informatiques permettent de calculer les effets du risque climatique sur les infrastructures de transport [question 27], tandis qu'une minorité considérable (42 %) semble les connaître (voir figure 46). Cela laisse à penser qu'il est urgent de poursuivre la collaboration et de diffuser des informations et des outils pertinents au sein de la région de la CEE.

Les mécanismes et les sources de financement réels ou possibles en faveur de l'étude des effets et des activités d'adaptation [question 29] cités sont surtout les deniers publics: 22 % des personnes interrogées citent des fonds nationaux, 17 % des fonds de l'Union européenne et 11 % des fonds internationaux, rares étant les réponses évoquant le financement par des investisseurs privés (5 %), des donations (5 %) ou des initiatives existantes (7 %). Il convient de mentionner qu'un cinquième des personnes interrogées ne citent aucun mécanisme, réel ou éventuel, ce qui laisse de nouveau à penser que la collaboration et la diffusion d'informations pertinentes doit se poursuivre au sein de la région de la CEE. Pour certains domaines prioritaires précis, qui doivent être suivis de plus près pour mettre en œuvre des stratégies d'adaptation efficace [question 30], les personnes interrogées accordent une grande importance à la détermination des impacts (15 %), à l'évaluation de la vulnérabilité (10 %), à la recherche et aux financements (12 %), à l'adaptation de stratégies ou de techniques (10 %) et à l'établissement et à la mise en œuvre de systèmes d'anticipation des risques (9 %) (figure 47). Ces réponses laissent clairement apparaître la nécessité de poursuivre les recherches et les études sur la question, et sur des mesures efficaces d'alerte et d'adaptation.

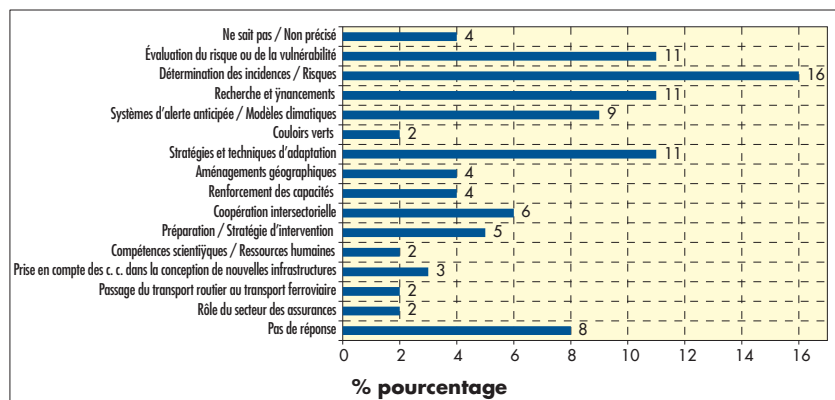


Figure 47. Domaines prioritaires devant être approfondis, selon les réponses données.

3.4. Mécanismes de collaboration à l'échelon national ou local, régional ou international

D'après les réponses obtenues, les mécanismes de collaboration les plus utiles pour structurer et coordonner l'adaptation des transports aux changements climatiques [question 31] sont énumérés à la figure 48. Les réponses sont variées, même si celle, neutre, de «collaboration entre acteurs» revient le plus souvent (25 %). Il est toutefois intéressant de noter que plusieurs réponses préconisent l'établissement de réseaux d'experts dans les infrastructures (9 %), de groupes de travail à niveaux multiples (9 %) et de partenariats entre les pouvoirs publics et les institutions (18 %), ainsi qu'une collaboration interministérielle et transnationale.

Parallèlement, une proportion importante des personnes interrogées n'est pas satisfaite du niveau actuel de collaboration aux échelons national et local, seules 34 % d'entre elles estimant que le niveau de collaboration est « très bon » ou « adéquat » [question 32]. La situation ne s'améliore pas lorsque l'on passe à l'échelon régional et sous-régional. À ce niveau, alors qu'il semble exister des politiques et des échanges d'informations [question 33], seules 22 % des personnes interrogées se disent satisfaites [question 34].

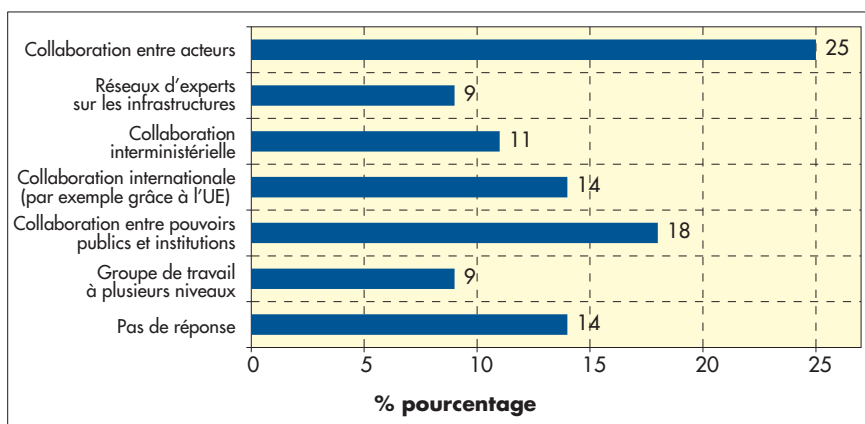


Figure 48. Mécanismes de collaboration considérés utiles dans l'adaptation des transports aux changements climatiques.

Effets des changements climatiques et adaptation à ces changements dans les réseaux de transport internationaux

Par comparaison, les personnes ayant répondu sont plus satisfaites de la collaboration internationale, 42 % d'entre elles signalant un travail « très bon » ou « adéquat » [question 36] ; par ailleurs des façons de moderniser cette collaboration sont également précisées [question 37] (figure 49). Enfin, en réponse à la question de savoir s'il faut revoir certains accords régionaux au sein de la région de la CEE dans le but de promouvoir ou de faciliter l'adaptation aux changements climatiques des réseaux de transport, 32 % des réponses sont affirmatives, 10 % l'envisagent et comme une possibilité 10 % des réponses sont négatives.

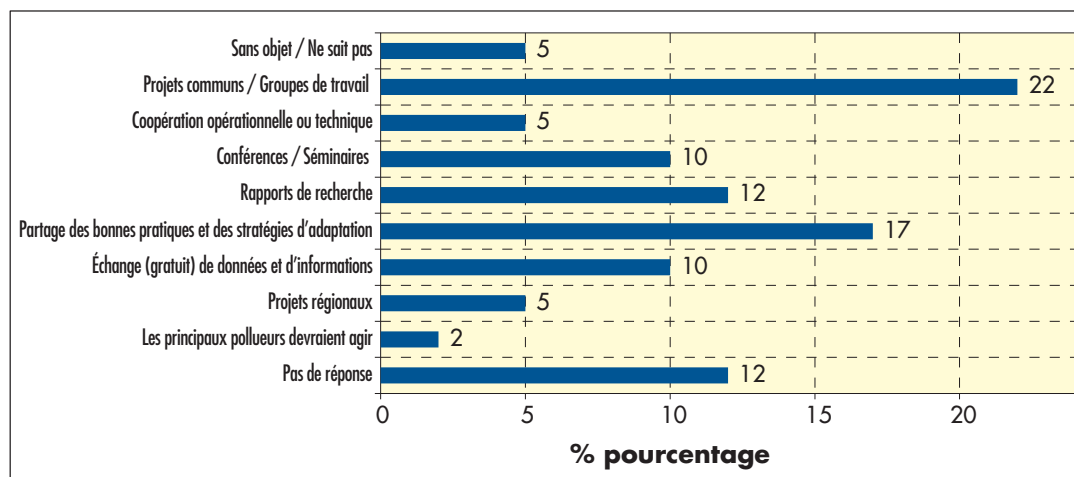


Figure 49. Modes de coopération internationale considérés utiles à la recherche de solutions face aux effets des changements climatiques et à la nécessité de s'y adapter.



Gara de Nord, Bucarest, fortes chutes de neige et blizzard, janvier 2008 © Club Ferroviar

3.5. Questions propres aux infrastructures routières et ferroviaires, et aux voies navigables intérieures

Une proportion importante (42 %) des personnes interrogées affirment sans ambiguïté que les administrations et des organismes publics sont conscient des facteurs de vulnérabilité de l'infrastructure routière et ferroviaire aux risques naturels et les comprennent [question 38]. Pourtant, il semble possible de mieux faire prendre conscience de ces aspects, étant donné que de nombreuses personnes (34 %) ne répondent pas à la question et qu'elles sont 24 % à vouloir améliorer cette prise de conscience ou cette compréhension. De même, lorsque la question devient plus détaillée (par exemple, quelle est la probabilité pour qu'un tronçon de chaussée ou de voie ferrée soit endommagé par une inondation et quelles en sont les conséquences ?), seules 44 % des personnes interrogées semblent relativement bien informées des risques précis et des conséquences probables de ces événements [question 39]. En outre, à la question portant sur la mise en œuvre de mécanismes d'évaluation du niveau de risque en cours [question 40], seules 23 % des réponses sont affirmatives, 18 % des personnes signalant l'établissement d'un mécanisme ou précisant que des mécanismes sont mis en place uniquement dans des circonstances précises.

Une tendance claire se dégage des réponses aux questions concernant les changements et la variabilité climatiques sur les voies navigables [questions 41 à 44]. Pour toutes ces questions, 50 % à 70 % des personnes ne fournissent aucune réponse, sans doute à cause des particularités de ce mode de transport et de la composition du groupe de personnes ayant répondu (réponses de pays ou d'organisations dotés d'un nombre restreint, voire inexistant, d'infrastructures ou de services de navigation intérieure). Le reste des réponses laisse à penser que les changements climatiques pourraient avoir des effets importants et divers (figure 50), mais gérables malgré tout.

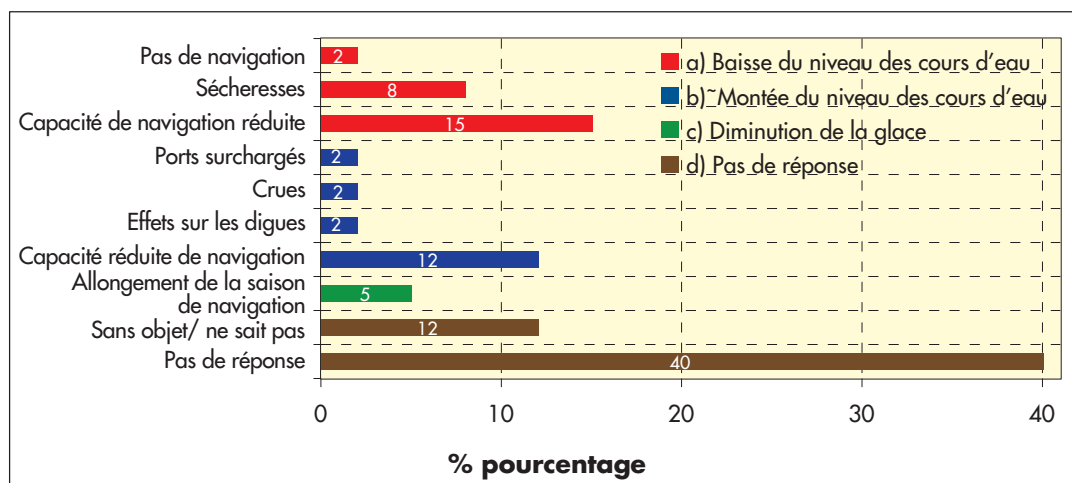


Figure 50. Effets des changements climatiques sur les infrastructures et les services de navigation intérieure.



Pont ferroviaire de Putna Seaca (Roumanie) endommagé par des inondations en 2005 © Club Ferroviar

Chapitre 4. Mesures possibles d'adaptation aux changements climatiques

4.1. Introduction

Il est largement admis que le transport international est un moyen de faciliter les échanges commerciaux et la mobilité et qu'il s'agit d'un moteur du développement et de la croissance économiques. En revanche, les volumes toujours plus importants de marchandises et de passagers¹² transportés ont des effets négatifs sur l'environnement, sur la consommation d'énergie et sur le climat. Ainsi, les transports représentent actuellement 62 % environ de la consommation mondiale de pétrole, cette dernière devant progresser d'environ 1,4 % par an jusqu'en 2035, lorsque les transports consommeront environ 82 % des combustibles fossiles liquides produits dans le monde (AIE, 2012; CNUCED, 2012). Cette évolution peut avoir, entre autres, d'importantes conséquences sur la sécurité énergétique (Haydock et Kollamthodi, 2009) mais aussi sur les politiques en matière d'émissions¹³. Si cette évolution n'est pas maîtrisée, la dégradation de l'environnement risque de se poursuivre et la situation énergétique risque, à terme, de faire obstacle au développement et à la croissance économiques. C'est la raison pour laquelle l'atténuation des changements climatiques devient toujours plus prioritaire dans la sphère politique internationale, et qu'elle fait notamment l'objet de travaux sous l'égide de la CCI de la CEE (Rothengatter, 2009). Étant donné que l'intensification du transport de marchandises et de passagers se traduira par un engorgement plus important des voies de circulation et par plus de pollution, mais aussi par une hausse des coûts¹⁴, il est urgent de définir une stratégie en matière de mobilité qui soit durable, économe en énergie et aussi écologique que possible.

On ne peut envisager d'intégration ou de mondialisation des marchés sans intégration des réseaux de transport. Ce postulat communément admis fait partie des principes de la politique commune des transports énoncés par exemple dans les traités fondateurs de l'Union européenne (voir par exemple Commission européenne, 2012b) et il figure dans de nombreuses initiatives de la CEE. Afin d'établir un réseau multimodal intégré et performant dans toute la région de la CEE, les réseaux de transport internationaux terrestres, maritimes et aériens devraient permettre une circulation facile, en toute sécurité et rapide des biens et des personnes entre États membres, et des liaisons bien organisées à destination d'autres pays qui sont aussi des partenaires commerciaux des pays de la CEE (voir par exemple figures 16 et 19). Un moyen évident d'y parvenir est de combiner de façon optimale divers modes de transport; la comodalité dans les chaînes de transport, notamment, favorisera l'innovation

¹² Par exemple, selon certaines estimations, le transport commercial de marchandises (en tonnes-km) triplera d'ici à 2050 (CNUCED, 2012).

¹³ Le secteur des transports produit actuellement environ 13 % des émissions de gaz à effet de serre (et environ 25 % des émissions de CO₂); ces émissions devraient augmenter de 1,7 % par an jusqu'en 2030 (CNUCED, 2012). Aux États-Unis, les émissions dues aux transports représentent environ 28 % des émissions totales (en équivalent CO₂) (voir <http://www.epa.gov/climatechange/ghgemissions/sources/transportation.html>).

¹⁴ Ainsi, le développement de nouvelles infrastructures dans l'Union européenne pour répondre à l'augmentation de la demande de transport devrait coûter plus de 1 500 milliards d'euros sur la période 2010-2030, selon les estimations. L'achèvement du réseau RTE-T nécessite environ 550 milliards d'euros jusqu'en 2020, dont 215 millions d'euros sont déjà affectés à l'élimination des principaux goulets d'étranglement (http://ec.europa.eu/transport/themes/sustainable/index_en.htm).

technique et la transition vers les modes de transport les plus durables et économes en énergie, et les moins polluants¹⁵. Parallèlement, de nouvelles stratégies de transport durable doivent assurément tenir compte des effets très importants des changements et de la variabilité climatiques sur les infrastructures et le fonctionnement des transports, et prévoir des mesures d'adaptation efficaces.

Les mesures d'adaptation visent à réduire les facteurs de vulnérabilité et à accroître la résilience des réseaux de transport. La résilience désigne la capacité d'un système à supporter des effets néfastes sans que ses fonctions essentielles soient touchées. Dans le contexte des transports, la résilience ne concerne pas uniquement la robustesse physique et la durabilité de l'infrastructure, mais aussi la capacité du système de transport à récupérer rapidement et à moindre coût suite à un incident. Les mesures d'adaptation peuvent donc être considérées comme des « assurances » qui limitent les coûts d'exploitation et de rénovation ultérieurs induits par les changements climatiques, comme une hausse des températures, une élévation du niveau de la mer ou des phénomènes climatiques extrêmes. Il convient également de noter que cette adaptation ne se limite pas à la gestion du risque. Elle offre aussi l'occasion de développer des infrastructures de transport innovante et à la pointe du progrès.

L'essentiel de l'infrastructure de transports actuelle a été développé dans le cadre de politiques nationales. Les possibilités d'adaptation à l'échelon national et régional dépendent de divers facteurs, notamment de l'évaluation des risques et des conséquences financières à court, moyen et long terme. Afin de fixer les priorités de cette adaptation, les installations doivent être tout d'abord classées en fonction de leur caractère essentiel dans le réseau de transports (Potter, 2012), puis en fonction des difficultés que présente leur adaptation aux changements climatiques, ainsi qu'aux coûts afférents. Les installations exposées à des risques graves doivent faire l'objet d'une planification des risques et d'interventions d'urgence. L'élimination d'une installation devrait être une solution de dernier recours, à envisager uniquement si les risques sont trop complexes ou qu'un transfert est difficile à envisager sur le plan financier et logistique. Ainsi, les ports sont des éléments essentiels de la chaîne internationale d'approvisionnement. Leur protection est coûteuse et il est pratiquement impossible de les transférer. Parallèlement, les choix de l'adaptation seront fonction du financement, dont l'origine — entités publiques, « hybrides » ou privées — sera un élément déterminant de la démarche d'adaptation adoptée (O'Toole, 2008; Parker et al., 2013).

L'élaboration de stratégies d'adaptation efficaces nécessite à la fois une action politique et des travaux de recherche collaborative. Des études bien ciblées sur la vulnérabilité, des études empiriques et des évaluations des risques prévus et des coûts afférents sont une première étape vers le comblement des lacunes et l'identification des priorités. De telles études ont d'ores et déjà été menées à l'échelon national et certaines sont brièvement présentées, plus loin dans le présent chapitre.

¹⁵ Émissions dues au transport de marchandises (en kg CO₂ par tonne-km): Transport routier (par camions de plus de 35 t) 0,051-0,091; trains diesel, 0,017-0,069, trains électriques, 0,019-0,040; vraciers 0,0025-0,008, navires porte-conteneurs (< 8 000 TEU) 0,013-0,020; rouliers, 0,050-0,060; transport aérien long courrier (> 1 600 km), 0,57-0,63 (Crist, 2012, voir aussi http://www.airportwatch.org.uk/?page_id=3262 (consulté le 17.08.2013)). Émissions dues au transport de passagers par mode de transport (en kg CO₂ par passager et par km): Voitures particulières 0,124, deux-roues, 0,083, bus urbains, 0,067, autocars 0,034; transport ferroviaire, 0,045; transport maritime, 0,043; transport aérien, 0,130 (http://knowledge.allianz.com/mobility/transportation_safety/?813/which-transport-methods-produce-most-emissions, consulté le 17.08.2013).

4.2. Modalités des politiques d'adaptation

Dans un contexte de changement et de variabilité climatiques, la résilience des réseaux de transport internationaux doit engager diverses autorités publiques, les gouvernements et d'autres acteurs des transports issus de régions climatiques différentes. L'examen des logiques et des mesures d'adaptation adoptées (Eisenack et al., 2011; 2012), ainsi que les conclusions de la présente étude (voir chapitre 3) mettent en évidence la prévalence d'un schéma «descendant», où une entité ou un opérateur public ou «hybride» prend l'initiative ou doit prendre l'initiative d'actions destinées à résoudre le problème de l'adaptation.

L'élaboration et la mise en œuvre de plans d'adaptation et de mesures techniques constituent un choix stratégique dont les modalités, variables, sont décrites ci-dessous. Le choix de l'inaction (prendre le risque de s'abstenir de planifier ou de mettre en œuvre des mesures d'adaptation techniques adéquates), bien qu'il permette de réaliser des économies à court terme, risque de se traduire par d'importantes dépenses à moyen ou à long terme, en particulier si le pays ou certaines de ses régions se trouvent dans un «point chaud» du changement climatique. Les coûts peuvent être directs ou indirects. Les coûts et les pertes directs se mesurent en vies humaines et en dommages corporels, en dommages aux infrastructures ainsi qu'en travaux de reconstruction ou de rénovation ultérieurs. Les coûts indirects sont liés aux diverses conséquences, pour la vie sociale, les échanges commerciaux et l'activité économique, des dégâts ou de la sous-exploitation de réseaux de transport endommagés.

Le choix de ne rien faire est tentant, en particulier compte tenu de la situation financière actuelle. En effet, les acteurs du secteur public préfèrent parfois financer des projets ayant des retombées bénéfiques directes et visibles aux yeux des citoyens. Par comparaison, les projets touchant à l'adaptation aux changements climatiques sont principalement des investissements coûteux dans l'avenir. Deuxièmement, il est parfois difficile pour une entité publique ou un État de donner la priorité à des actions en faveur de l'adaptation climatique qui risquent d'avoir des coûts relativement plus élevés au départ, surtout lorsque cette priorité se heurte à des objectifs concurrents en matière de transports, comme l'investissement dans des réseaux qui pourraient faciliter les liaisons commerciales et sociales. L'adoption de normes moins coûteuses pour les infrastructures peut alors présenter un certain nombre d'avantages immédiats (faibles coûts, routes opérationnelles) et être donc considéré comme une décision stratégique pragmatique. Toutefois, cette ligne de conduite risque d'entraîner des dégradations et des défaillances des infrastructures de transport qui auront une incidence sur l'économie nationale et régionale, le développement social, la sécurité des biens et des personnes, et les systèmes de communication. Dans ce cas, compte tenu de l'ampleur des effets, il sera essentiel non seulement de reconstruire les infrastructures endommagées, mais aussi de travailler l'urgence, ce qui risque de renchérir les coûts étant donné que les procédures normales ne peuvent être suivies à cause du caractère d'urgence de la situation. De telles considérations devraient être prises en compte dans l'analyse coûts-avantages de la planification et l'adoption de mesures d'adaptation techniques (figure 51).

Ainsi, le gouvernement français est persuadé que si un pays ne se prépare pas aux changements climatiques, cela entraînera, pour le secteur des transports comme pour d'autres secteurs, des coûts et des dégâts qui seront bien plus importants que l'effort d'adaptation nécessaire actuellement.

En effet, l'homme et la nature ont, sans aucun doute, les capacités de s'adapter spontanément aux modifications apportées par les changements climatiques. Toutefois, quels en sont les coûts et combien de temps durera cette adaptation ? Si les changements

climatiques sont devenus évidents aujourd'hui, il demeure des incertitudes sur l'ampleur de leurs effets et sur le rythme de leur évolution. C'est la raison pour laquelle la France a adopté un plan national d'adaptation qui associe anticipation pratique et mesures de surveillance tout en cherchant à améliorer les connaissances sur l'environnement.

Le Plan national d'adaptation au changement climatique a été adopté par le Gouvernement en juillet 2011. Compte tenu des incertitudes qui entourent les prévisions, les évaluations et les incidences attendues dans ce domaine, l'élaboration du plan s'est faite selon différents axes:

- (a) Améliorer les connaissances dans tous les domaines, y compris par une approche socio-économique;
- (b) Définir des méthodes d'intégration des mesures d'adaptation;
- (c) Renforcer l'observation et les mécanismes d'alerte.

Les experts français ont estimé que les changements climatiques auront des effets sur tous les modes de transport. L'adaptation est rendue nécessaire par la longue durée de vie des réseaux et des équipements de transport. Diverses mesures ont été identifiées. Elles offrent des moyens d'analyser les changements climatiques, de prévenir les fragilités des réseaux de transport et de préparer l'amélioration de la résistance et de la résilience des infrastructures existantes et futures, afin de garantir la continuité et la sécurité des services de transport. Les actions prévues dans le plan national concernent principalement l'examen des normes techniques - révision des normes de construction par exemple - et l'application et la révision des normes relatives aux infrastructures. Elles portent aussi sur l'évaluation de la vulnérabilité des réseaux et l'analyse des risques. Pour mettre en œuvre ce programme, il est essentiel de disposer d'une évaluation publique des conditions climatiques, partagée et mise en œuvre à l'échelon régional ou local (niveau de la mer, vagues, précipitations, température, neige, vent, écoulement des cours d'eau).

La logique d'*anticipation* passe par une décision consciente d'investir dans des plans, des stratégies et des mesures d'adaptation, puis par leur élaboration et mise en œuvre, face aux changements climatiques. Cette solution semble difficile, non seulement à cause de son coût, mais aussi parce qu'elle n'est pas facile à reproduire dans tous les contextes et qu'il ne s'agit pas d'une solution unique qui convient à toutes les situations. Bien qu'il faille soigneusement étudier et analyser les initiatives précédentes et les enseignements tirés de l'expérience, il convient d'entreprendre des évaluations détaillées des risques découlant des changements climatiques, avec une réduction d'échelle, et tenir compte des aspects liés à la criticité, à la sensibilité, à l'exposition et à la vulnérabilité du moyen et de l'infrastructure de transport concernés. De telles évaluations devraient être suivies d'analyses coûts-avantages de l'investissement d'adaptation, en fonction de différents scénarios climatiques. Les enseignements tirés de l'expérience de différentes régions montrent que les mesures d'adaptation peuvent varier en fonction du lieu, dans le même pays et la même région. Ainsi, les mesures techniques prises par les chemins de fer japonais pour lutter contre le gel fréquent des systèmes de signalisation (Mizukami, 2012), mais aussi la construction de structures de protection (gabions et murs de béton au pied des talus) afin de réduire la vitesse d'écoulement de débris à cause d'avalanches sur les routes du Nord de l'Europe (Hudecz, 2012) devraient être étudiés par d'autres réseaux de transport. Toutefois, ils devraient être adaptés aux caractéristiques locales, notamment à la moyenne climatique actuelle et future, aux records extrêmes et à leurs incidences éventuelles.

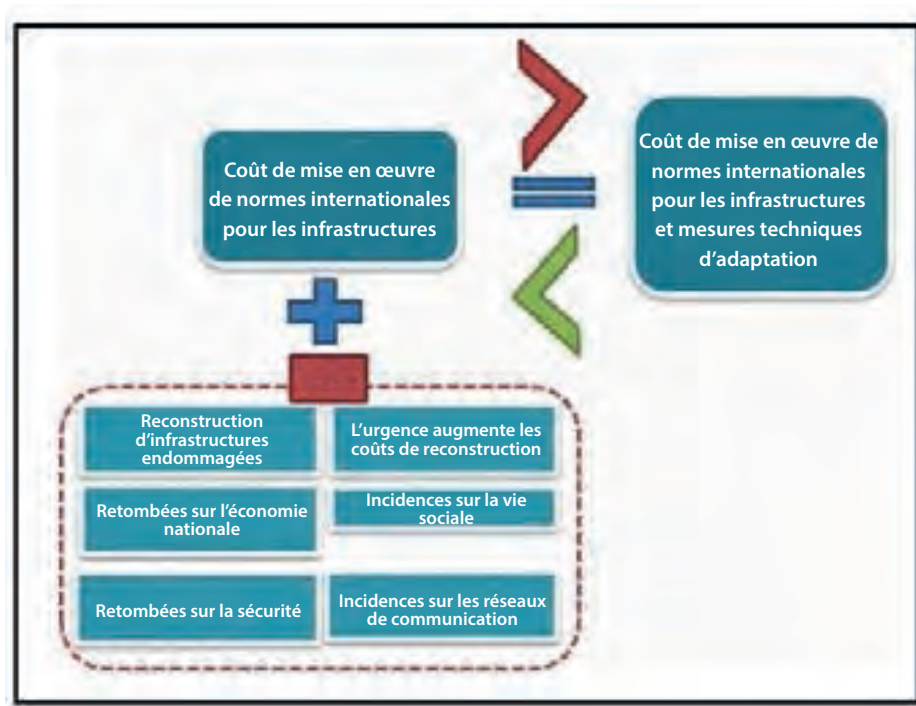


Figure 51. Décisions sur les coûts de construction d'infrastructures de transport (analyse effectuée par le secrétariat de la CEE).

La planification stratégique de mesures d'adaptation techniques semble être gouvernée par des considérations économiques, des contraintes importantes empêchant une adoption globale de telles mesures. Parfois, des facteurs supplémentaires entrent en ligne de compte, comme des normes de construction d'infrastructures, qui sont elles-mêmes fonction de l'environnement opérationnel, c'est-à-dire de l'existence d'instruments réglementaires précis¹⁶ ou de la disponibilité de financements supplémentaires ou particuliers. En l'absence d'une réglementation précise, les pays en proie à des difficultés économiques sont plus susceptibles d'investir dans des projets d'infrastructures de transport qui ne tiennent pas pleinement compte des changements climatiques, à moins qu'un financement spécial ne soit prévu. En revanche, les pays en phase de croissance économique sont plus susceptibles d'opter pour une infrastructure de transport qui intègre de nouvelles normes d'adaptation, bien que les coûts puissent encore une fois influencer les décisions. Comme indiqué précédemment, il serait malvenu de reproduire des logiques et des mesures d'adaptation sans entreprendre auparavant d'évaluation détaillée des risques au niveau national ou local.

¹⁶ Ainsi, la révision des orientations du réseau transeuropéen de transport (RTE-T) a finalement fait l'objet d'un accord, en juin 2013 (http://europa.eu/rapid/press-release_IP-13-478_fr.htm); cet accord pourrait faire avancer la proposition de règlement allant dans ce sens (UE COM(2011) 650 final/2, voir <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2011:0650:REV1:FR:PDF>). Selon la proposition de règlement, la vulnérabilité et la résilience des infrastructures aux changements climatiques devraient être dûment prises en compte dans tous les projets futurs de transport transeuropéen.

Effets éventuels des changements climatiques sur les infrastructures de transport

| Infrastructure | Temp. élevée | | Temp. basse | | Élévation de la nappe phréatique | | Élévation du niveau de la mer | | Ondes de tempête | | Précipitations prolongées | | Inondations | | Sécheresse | | Neige | | Vents extrêmes | | Orages électriques | | Gelées | | Brouillard | | Retrait du sol | | | |
|---|--------------|---|-------------|---|----------------------------------|---|-------------------------------|---|------------------|---|---------------------------|---|-------------|---|------------|---|-------|---|----------------|---|--------------------|---|--------|---|------------|---|----------------|---|---|---|
| | D | P | D | P | D | P | D | P | D | P | D | P | D | P | D | P | D | P | D | P | D | P | D | P | D | P | D | P | | |
| | M | H | M | L | M | M | M | L | H | H | H | H | H | M | H | M | H | M | H | H | H | M | L | L | H | M | H | M | | |
| Routes | M | H | M | L | M | M | M | L | H | H | H | H | H | M | H | M | H | H | H | M | L | L | H | M | H | M | H | H | | |
| Itinéraires piétons | L | L | M | L | L | L | L | L | L | L | L | L | L | L | L | L | L | L | L | L | L | L | L | L | M | L | M | L | M | |
| Pistes cyclables | L | L | M | L | L | L | L | L | L | L | L | L | L | L | L | L | L | L | L | L | L | L | L | M | M | L | M | L | M | |
| Voies ferrées de surface | L | H | L | L | M | M | M | M | H | M | H | H | H | M | L | M | H | H | H | M | L | L | M | M | M | M | M | M | M | |
| Voies ferrées souterraines | L | M | L | L | L | M | L | L | M | M | H | M | M | M | L | M | H | L | L | L | L | L | L | L | L | L | L | M | M | |
| Aéroports | M | H | M | M | L | M | L | L | M | M | M | M | H | M | H | M | H | M | H | M | H | M | M | M | H | M | M | M | M | |
| Pistes d'aéroports | L | L | L | L | L | L | L | L | L | L | L | L | L | L | L | L | L | L | L | L | L | L | L | L | L | L | L | L | L | |
| Terminaux | L | L | L | L | M | M | L | L | M | M | M | M | M | M | H | M | M | M | L | L | L | L | L | L | L | M | L | L | L | |
| Infrastructures côtières | L | L | L | L | M | H | H | H | H | H | M | L | H | H | L | L | L | L | L | M | M | L | L | L | L | H | M | L | L | |
| Ports | L | L | L | L | L | M | H | H | H | H | M | M | H | M | H | M | L | L | L | L | L | L | L | L | L | L | H | H | L | L |
| Voies navigables | L | L | M | L | L | M | M | M | H | M | H | H | H | M | H | M | L | L | L | L | L | L | L | L | H | M | L | L | H | M |
| Talus | L | L | L | L | H | M | L | L | H | M | H | H | H | M | M | M | M | M | L | L | L | L | L | M | M | L | L | H | H | |
| Tunnels | L | L | L | L | M | M | L | L | M | M | M | M | H | M | L | M | L | L | L | L | L | L | L | L | L | L | L | L | M | L |
| Ponts | M | H | M | L | L | M | L | L | H | M | H | M | H | M | M | M | M | M | L | M | H | L | L | L | L | L | L | L | M | L |
| Canalisations | L | L | L | L | L | M | L | L | H | L | H | M | H | M | L | M | L | L | L | L | L | L | L | L | L | L | L | L | M | M |
| Systèmes de commande | M | M | L | L | L | M | M | M | H | M | H | M | M | M | L | M | L | L | L | L | M | M | M | L | L | L | L | L | L | L |
| Navigation par satellite | L | L | L | L | L | L | L | L | L | L | L | L | L | L | L | L | L | L | L | L | L | L | L | L | L | L | L | L | L | L |
| Distribution de pétrole | L | L | L | L | M | L | H | M | H | M | M | M | H | M | L | L | M | M | L | L | L | L | L | L | L | L | L | L | L | L |
| Distribution de gaz | L | L | L | L | M | L | H | M | H | M | M | M | H | M | L | L | M | M | L | L | L | L | L | L | L | L | L | L | L | L |
| Réseau de recharge de véhicules électriques | L | L | L | L | L | L | L | L | M | M | H | M | H | H | M | M | L | L | L | L | L | L | L | L | L | L | L | L | L | L |
| Transport de CO ₂ | M | M | L | L | M | M | L | L | M | M | M | M | H | M | L | L | L | L | L | L | L | L | L | L | L | L | L | L | L | L |

Tableau 5. Interactions possibles entre facteurs du changement climatique et infrastructures de transport (UK Royal Academy of Engineering, 2011). La probabilité de dommages aux infrastructures et d'autres effets des changements climatiques est considérée élevée (H = high), moyenne (M) ou faible (L = low). Il convient de noter que: (a) les effets de phénomènes récurrents ou cumulés sont différents de ceux liés à un phénomène isolé; (b) des conditions météorologiques défavorables constantes s'accompagneront probablement d'investissements modestes, tandis que des événements sporadiques, même s'ils sont plus graves, pourraient avoir l'effet inverse; (c) les effets des changements climatiques varient selon les zones géographiques et des infrastructures différentes présentent des degrés de résilience différents; il est plus facile de mettre en place des déviations en cas d'endommagement d'une route que de gérer les conséquences de dégâts survenus dans un aéroport; (d) les changements climatiques peuvent entraîner des modifications dans la végétation, qui peuvent à leur tour se répercuter sur les infrastructures; (e) les sollicitations saisonnières sur les infrastructures peuvent aussi créer un stress supplémentaire; (f) les changements climatiques pourraient entraîner des changements dans l'affectation des terres, ce qui pourrait à son tour nécessiter des modifications au niveau des infrastructures.

4.3. Exemples de logiques et de mesures d'adaptation dans les transports

La présente partie donne un aperçu de certaines mesures techniques d'adaptation qui sont mises en œuvre ou prévues dans différents pays et organisations, concernent divers types d'infrastructures, d'équipements, de services et de modes d'exploitation de transports, et qui intègrent la route, le rail, les voies navigables et les ports maritimes. Cette démarche a été estimée plus appropriée en raison des degrés divers de fiabilité et d'intérêt stratégique de différents modes de transport en fonction du lieu, et des projections relatives aux changements climatiques.

Il convient de préciser dès le départ que les systèmes de transport sont vulnérables à différentes manifestations des changements climatiques, étant donné qu'ils se composent de nombreux sous-systèmes, eux-mêmes sensibles à un ensemble de risques climatiques (voir chapitre 2 et tableau 5). Les chaussées routières, qui comprennent les routes, les itinéraires piétons et les pistes cyclables, sont les plus exposées à des chutes de pluie prolongées et torrentielles, aux inondations, aux vagues de chaleur, à la sécheresse, à la

neige et aux gelées, aux vents extrêmes et au brouillard et, sur les littoraux, aux ondes de tempête. Le rail est aussi principalement menacé par les ondes de tempêtes sur les côtes et dans les estuaires, aux pluies diluviennes, aux inondations, aux vagues de chaleur, aux chutes de neige, aux vents extrêmes et à une forte humidité qui peut endommager l'équipement le long de la voie. Les terminaux ferroviaires sont aussi sensibles aux inondations et aux températures extrêmes, tandis que les voies ferrées souterraines le long des côtes craignent les inondations dues à des ondes de tempête (voir par exemple figure 21). Les infrastructures côtières telles que les ports sont particulièrement exposées à l'élévation du niveau de la mer, aux ondes de tempête et aux vagues, aux inondations, aux vents extrêmes, aux vagues de chaleur et au brouillard, tandis que les voies navigables et les ports fluviaux sont vulnérables à des niveaux exceptionnellement hauts ou bas de l'eau, aux sécheresses, à la neige et aux gelées, qui peuvent entraîner un retrait du sol et des problèmes sur les rives.

4.3.1 Mesures techniques d'adaptation pour les routes

En 2011, 75 millions de voitures ont été vendues dans le monde, ce qui porte le nombre total de véhicules sur la planète à environ un milliard d'unités. Ce nombre devrait considérablement augmenter d'ici à 2020, avec une proportion importante des nouveaux véhicules en circulation sur les routes des pays développés (statistiques de la CEE, 2012). En outre, la population urbaine devrait atteindre six milliards de personnes ces 40 prochaines années, ce qui signifie qu'il est urgent d'évaluer les tendances et les exigences à venir dans ce domaine, et d'y faire face, notamment en s'adaptant à des changements climatiques qui se répercuteront sur la qualité du transport routier et sur la sécurité des usagers de la route.

En outre, il convient de ne pas sous-estimer l'importance du transport routier dans les échanges internationaux de marchandises. En effet, 46 % des marchandises et 83 % des personnes qui circulent au sein de l'UE empruntent la route (Commission européenne, 2012b), tandis que, d'après les statistiques de l'Union internationale des transports routiers (IRU), le transport routier achemine en moyenne plus de 80 % du fret intérieur, en volume. Cela représente plus de 6 000 milliards de tonnes de marchandises par an rien que dans l'Union européenne, aux États-Unis et dans la Communauté des États indépendants (CEI), la Chine et le Japon. Dans les économies modernes, 85 % du tonnage du fret routier est acheminé sur des distances inférieures ou égales à 150 km, pour lesquelles il n'existe pas, ou peu, d'alternative économiquement viable à la route. Enfin, il convient de préciser que si plus de 80 % des échanges mondiaux de marchandises en volume se font par la mer (voir aussi partie 4.6), ce fret est presque toujours acheminé également par la route, en provenance ou à destination d'un port ou d'un entrepôt, dans le cadre d'un contrat de transport intermodal. Par conséquent, il semble qu'une grande partie du fret, du moins celui transporté par conteneurs, emprunte certains tronçons routiers.

Le transport routier de marchandises est confronté à un certain nombre de difficultés, notamment la nécessité de s'améliorer (par exemple par une meilleure intégration à d'autres modes de transport), de créer des services novateurs et des systèmes intelligents, mais aussi de développer des infrastructures résilientes, qui garantissent un accès et une mobilité élargis dans le cadre des changements climatiques. Les avancées techniques peuvent considérablement aider ce secteur d'activité à résoudre ces difficultés dans la mesure où elles permettent une utilisation plus efficace des infrastructures, une gestion perfectionnée de ce mode de transport, une empreinte carbone plus réduite et des routes plus résistantes aux changements climatiques¹⁷. Ainsi, une logistique intelligente peut réduire les voyages

¹⁷ Voir aussi AIPCR, 2012. Par ailleurs, on voit se multiplier les exemples qui montrent que s'il est toujours plus important de concevoir des routes résistantes aux changements climatiques, cette nécessité ne figure pas dans les domaines prioritaires de recherche proposés par la European Union Road Federation (ERF, 2013).

« à vide », qui représentent actuellement pratiquement 25 % des mouvements, tandis que les aides perfectionnées à la navigation et d'autres systèmes de gestion réduisent la durée des voyages et les encombrements, et permettent de localiser les véhicules et de la marchandise en ligne, améliorant ainsi l'interopérabilité. Des projets spécialisés de recherche et de développement peuvent aussi aboutir à la création de moteurs plus économes et moins polluants; ainsi, la norme Euro-VI pour les moteurs (obligatoire dès 2014) a été conçue pour réduire les émissions de plus de 60 % (Commission européenne, 2012b).

Les changements climatiques se répercuteront sur la sécurité, l'exploitation et l'entretien des infrastructures et des systèmes routiers. Les principaux effets sont directs (dégradation de la chaussée, déformation, affaissements et glissements de terrain, problèmes d'accès dus aux inondations et à l'érosion) et indirects (économiques, liées à l'environnement, démographiques, d'aménagement). Chacun de ces effets nécessite des mesures d'adaptation techniques et opérationnelles différentes, comme par exemple la définition de nouveaux seuils thermiques pour la chaussée routière et les joints de dilatation des ponts, le renforcement des bernes des talus de remblai des routes, l'intégration d'armatures métalliques à la structure de la chaussée, l'élévation des chaussées, des ponts et des tunnels au-dessus du niveau des hautes eaux et des champs de neige et le développement de chaussées «submersibles», pouvant supporter des inondations fréquentes (Tsampoulas, 2012; voir aussi <http://www.worldhighways.com/>). Les différentes solutions permettant d'intégrer les effets des changements climatiques à la conception et au fonctionnement des routes sont notamment les suivantes: (i) évaluation de l'exposition, de la vulnérabilité, de la résistance et des adaptations possibles de la chaussée routière; (ii) élaboration de calendriers (prise en compte des effets à long terme des changements climatiques durant la planification); (iii) stratégies d'adaptation spécialisées (voir aussi AIPCR, 2012).

Dans ce contexte, et bien qu'il ne s'agisse pas d'en dresser la liste exhaustive, plusieurs mesures d'adaptation mises en œuvre ou prévues dans certains pays de la CEE (Royaume-Uni, États-Unis et Canada) sont présentées ci-après. Elles constituent de bons exemples de politiques et de pratiques envisagées sur l'adaptation du transport routier aux changements climatiques.

4.3.1.1 Royaume-Uni

L'agence britannique des autoroutes (UK Highways Agency) a mené plusieurs études, ces dernières années, afin d'évaluer les conséquences des changements climatiques sur l'exploitation, l'entretien et l'amélioration du réseau routier. Ces études ont abouti à la publication, en 2009, du rapport *Highways Agency Climate Change Adaptation Strategy and Framework*, puis, en août 2011, du rapport *Climate Change Risk Assessment* (UK Highways Agency, 2009; 2011). Le tableau 6 contient des exemples de certains de ces risques pour les autoroutes britanniques, et de leurs effets, telles qu'ils sont évoqués dans les rapports mentionnés ci-dessus.

Le modèle HAAF (Highways Agency Adaptation Framework Model) de l'agence britannique des autoroutes se décompose en sept étapes (figure 52) correspondant aux activités touchées par les changements climatiques, mais aussi aux risques, aux occasions à saisir et aux choix à privilégier. En outre, le modèle HAAF: (i) respecte les objectifs professionnels de l'Agence; (ii) porte principalement sur les activités de l'Agence et la nécessité d'adapter ces dernières aux changements climatiques; (iii) identifie les mesures prioritaires; (iv) intègre, le cas échéant, les processus et les procédures en vigueur; (v) définit clairement les responsabilités; (vi) facilite la surveillance stratégique des progrès et la gestion du risque résiduel; (vii) comporte une certaine flexibilité en vue de s'adapter à l'évolution des exigences et aux progrès de la climatologie.

Tableau 6. Risques climatiques identifiés par l'Agence et exemples concrets

| Risque | Exemples |
|--|---|
| Dégradation de l'infrastructure et problèmes de sécurité | Les infrastructures se dégradent plus rapidement lorsque les changements climatiques sont progressifs et plus gravement en présence de phénomènes extrêmes. |
| Réseau moins disponible et fonctionnant moins bien | Restrictions de circulation nécessaires pour garantir la sécurité et travaux supplémentaires nécessaires. |
| Coûts accrus liés au maintien d'un réseau sûr et opérationnel | Construction, entretien, réparations et modernisation plus fréquents; nouvelles solutions (coûteuses) pour la conception et la construction des matériaux et des composants. |
| Risque d'insécurité supplémentaire pour les ouvriers | Risque accru pour les ouvriers chargés de la construction, de l'entretien et de l'exploitation (travail dans des conditions extrêmes et activités comportant plus de risques). |
| Risques supplémentaires pour les programmes et la qualité en raison des changements nécessaires dans les activités de construction | Conception plus exigeante; nécessité de disposer de nouvelles solutions techniques, incertitudes plus importantes touchant les programmes ou la qualité . |
| Procédures internes d'exploitation non adaptées | Les changements climatiques obligent à trouver de nouveaux modes d'exploitation et de commercialisations, mais aussi de nouvelles compétences |
| Augmentation des coûts de gestion | Augmentation des effectifs nécessaires; incidents plus fréquents (donc plus coûteux); nécessité d'approfondir les recherches sur la façon de gérer les changements climatiques. |

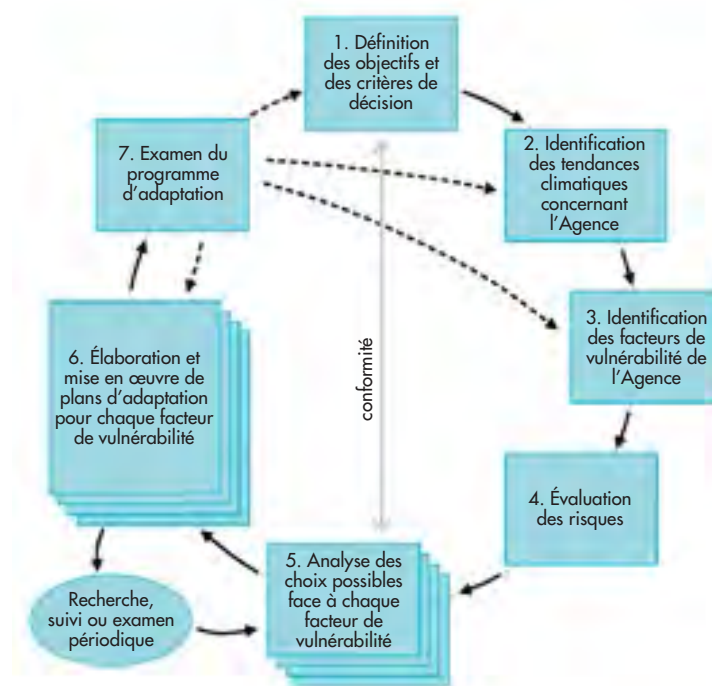


Figure 52. Modèle HAAFM de l'agence britannique des autoroutes (UK Highways Agency, 2009).

En ce qui concerne la fixation de priorités dans les mesures d'adaptation, il ressort que les calendriers dépendent de la durée de vie des actifs et des activités (figu e 53). Les effets climatiques à prévoir doivent être placés dans le contexte du cycle de renouvellement des actifs, de façon que les mesures d'adaptation soient mises en œuvre à l'échéance la plus proche possible de la manifestation de ces effets. Ainsi, les caméras de télévision en circuit fermé et les panneaux de signalisation, qui doivent être renouvelés souvent (voir figu e 53) ne devraient pas être prioritaires au départ, tandis que les actifs et les activités ayant une longue durée de vie doivent être pris en compte de façon précoce, car une intervention sur ces éléments risque d'être impossible plus tard.

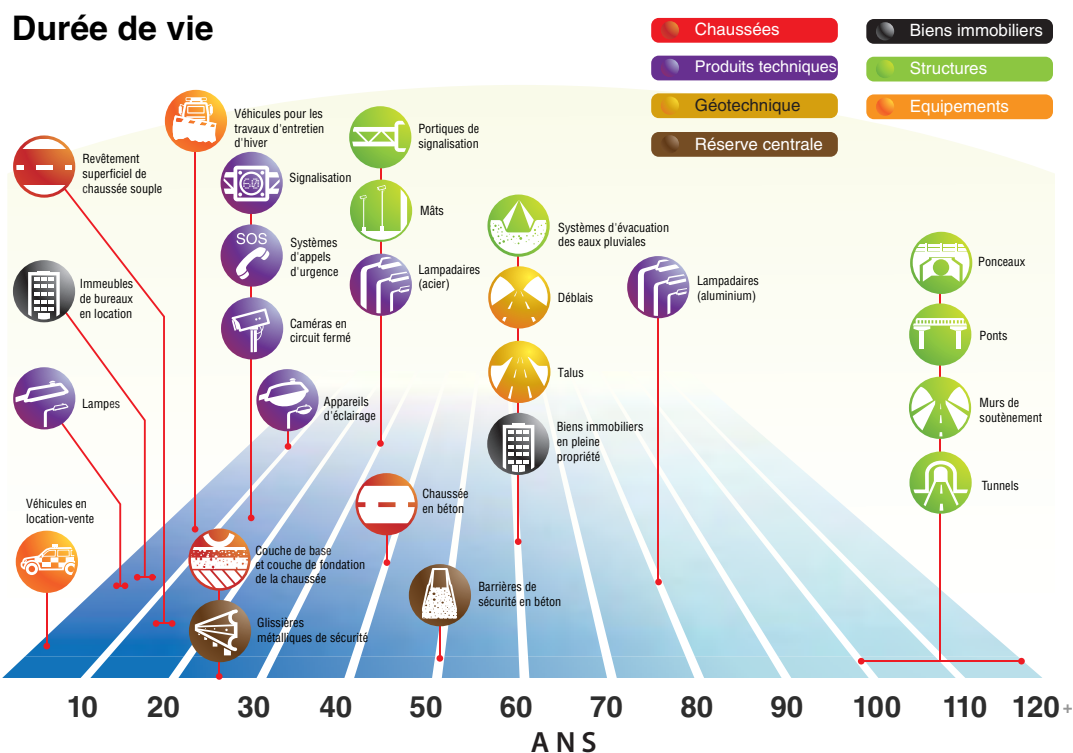


Figure 53. Durée de vie des actifs (UK Highways Agency, 2011).

Selon le rapport, une adaptation précoce est à conseiller si les critères suivants sont réunis: (a) délais longs de planification et de mise en œuvre de mesures d'adaptation (temps nécessaire à l'autorisation des recherches ou à la modification des politiques et des normes); (b) planification importante nécessaire due à la nécessité de travailler sur plusieurs sites du réseau; (c) protection d'actifs onéreux, ayant une longue durée de vie, et qui bénéficie ont clairement de telles mesures.

4.3.1.2 États-Unis

Le réseau de transports des États-Unis se compose d'environ 6,4 millions de kilomètres de routes publiques (<http://www.nationalatlas.gov/transportation.html>). L'Administration fédérale des routes (FHWA - Federal Highway Administration) fournit des financements à des bénéficiaires sélectionnés à l'échelon régional pour des projets d'infrastructures, d'évaluation de la vulnérabilité et des risques (achevé depuis

décembre 2011) qui permettront aux autorités chargées des transports au niveau des États, ainsi qu'aux agences d'urbanisme (MPO - Metropolitan Planning Organization) de tirer profit des enseignements tirés de leurs évaluations de vulnérabilité. La FHWA s'appuiera sur ces projets pilotes pour élaborer un cadre conceptuel d'évaluation de la vulnérabilité et du risque. Ce cadre sera diffusé auprès des États et des partenaires locaux avant d'être utilisé dans d'autres projets pilotes. Il a été décidé que les activités d'adaptation seront financées par des fonds fédéraux sous réserve qu'elles soient intégrées aux processus de décision des États et des MPO en matière de transports (ministère américain des Transports, 2012b). En outre, la FHWA a organisé, avec les MPO et les autorités compétentes des États, des ateliers d'échange centrés sur une réflexion efficace sur l'adaptation aux changements climatiques dans les processus de planification des transports urbains à l'échelle des États.

Le changement et la variabilité du climat se traduiront principalement par des journées plus chaudes, une vitesse plus élevée du vent, des précipitations intenses et des inondations, une intensité accrue de tempêtes côtières et une élévation du niveau de la mer (Potter, 2012). Selon une étude récente sur l'exposition aux inondations des ponts routiers des États-Unis (Wright et al., 2012), la plupart des problèmes sur ces ouvrages sont liés à l'affouillement, c'est-à-dire que l'érosion du lit des cours d'eau provoque une instabilité des fondations des ponts. Les ponts routiers sont des composantes essentielles du réseau national de transports; l'étude a révélé que 129 000 ponts sont défectueux actuellement, qu'entre 48 000 et 96 000 ouvrages seront en danger d'ici à 2055 (compte tenu d'une augmentation de l'intensité de la crue centennale) et qu'entre 66 000 et 117 000 d'entre eux seront dans un état inquiétant à l'horizon 2090 (voir aussi la partie 2.2 et la figure 30).

Dans une étude réalisée pour la FHWA, un procédé d'évaluation du risque climatique a été proposé, qui comprend: (i) une évaluation de l'état, critique ou non, de tous les actifs de transports; (ii) une évaluation de la sensibilité de tous les actifs en situation critique; (iii) une évaluation de l'exposition de tous les actifs sensibles ou en situation critique; (iv) un examen orienté principalement sur tous les actifs sensibles, exposés et en situation critique. Parmi les solutions d'adaptation possibles, il convient de citer la construction d'ouvrages de protection contre les ondes de tempête et le renforcement des ponts et des fondations des structures, l'adaptation à des niveaux de crue plus élevés par une élévation des structures, un entretien plus rigoureux et plus fréquent, l'amélioration de la tolérance aux crues, des dragages plus fréquents, un transfert des actifs, mais aussi une certaine souplesse dans la planification par une diminution des investissements irréversibles et une diminution de la durée des contrats de location-vente (National Research Council, 2008). Il a également été avancé (Potter, 2012) qu'une évaluation des risques associée à des mesures d'adaptation pourrait accroître la résilience. L'intégration aux procédures existantes de planification et de gestion des risques est censée améliorer les résultats, globalement. Enfin, l'expérience montre que: (i) les décisions sur les actions à mener devraient être prises aussi vite que possible; (ii) les phénomènes extrêmes peu probables devraient être examinés avec soin, car ils peuvent avoir des conséquences très graves; (iii) il est essentiel d'intégrer les paradigmes existants à l'analyse; (iv) les avis souvent changeants des parties prenantes sont importants; v) il convient de mettre l'accent sur des mesures vigoureuses.

Le tableau 7 est un récapitulatif des aspects liés à l'adaptation aux changements climatiques des infrastructures routières de transport aux États-Unis.

Tableau 7. Changements climatiques éventuels, effets sur les transports terrestres et choix d'adaptation (voir National Research Council, 2008).

| Facteur du changement climatique | Interruptions de l'activité | Infrastructures touchées | Modifications de l'activité | Changements au niveau de la conception et des matériaux | Autres éléments |
|--|--|--|---|---|-----------------|
| Températures: journées très chaudes et vagues de chaleur | Activité de construction limitée à certaines périodes pour des questions de santé et de sécurité; en règle générale, des restrictions s'appliquent à partir de 29,5 OC; coups de chaleur possibles à 40,5 OC | Chaussée et ouvrages en béton | Horaires de construction décalés sur des périodes plus fraîches de la journée | Développement de nouveaux matériaux routiers résistant à la chaleur | |
| | Surchauffe des véhicules et dégradation des pneus | Dilatation des joints de dilatation et des surfaces revêtues des ponts Aménagements des emprises d'autoroute et de rues | | Aménagements de rues et d'autoroutes tolérants à la chaleur | |
| Températures: diminution des journées très froides | Modification des coûts d'enlèvement de la neige et de la glace et conséquences différentes pour l'environnement de l'utilisation de sel et de produits chimiques (réduction globale, mais augmentation dans certaines régions) | Inquiétudes sur l'intégrité du revêtement en raison d'un ramollissement, d'un orniérage lié à la circulation et d'une migration de l'asphalte liquide; une température de l'air qui se maintient à plus de 32°C représente un seuil important d'alerte | Baisse des activités d'enlèvement de la neige et de la glace | | |
| | Moins de journées d'interruption du travail pour cause de froid, pour les ouvriers chargés de l'entretien | Moindre utilité des routes rudimentaires qui ne peuvent être empruntées que si le sol est gelé | Prolongement de la période de construction et d'entretien | | |

| Facteur du changement climatique | Interruptions de l'activité | Infrastructures touchées | Modifications de l'activité | Changements au niveau de la conception et des matériaux | Autres éléments |
|---|--|--|---|--|--|
| Température: augmentation des températures dans l'Arctique | | Dégel du pergélisol entraînant l'affaissement des routes, des ponts et des conduites | Raccourcissement de la saison d'utilisation des routes de glace | Isolation du prisme routier | Transfert de certains tronçons de la chaussée sur un sol plus solide |
| | | Raccourcissement de la saison d'utilisation des routes de glace | Allongement de la période de construction Utilisation accrue de sonars pour surveiller le débit des cours d'eau et l'affouillement des ponts | Utilisation de différents types de systèmes de réfrigération passive, comme des thermosiphons, des galeries rocheuses et des «ponceaux froids» | |
| Températures: gel saisonnier plus tardif et dégel saisonnier plus précoce | Modification des tolérances saisonnières en matière de charge | Dégradation réduite de la chaussée grâce à une moindre exposition au gel, à la neige et à la glace, mais possibilité d'augmentation des cycles gel-dégel dans certains lieux | Assouplissement des restrictions saisonnières de charge Raccourcissement de la saison d'utilisation des routes de glace | | |
| | Modification de la demande saisonnière de carburants. | | | | |
| | Mobilité et sécurité plus importantes en raison de la diminution des conditions météorologiques hivernales | | | | |
| | Allongement de la saison de construction | | | | |

Effets des changements climatiques et adaptation à ces changements dans les réseaux de transport internationaux

| Facteur du changement climatique | Interruptions de l'activité | Infrastructures touchées | Modifications de l'activité | Changements au niveau de la conception et des matériaux | Autres éléments |
|---|---|---|-----------------------------|--|--|
| Élévation du niveau de la mer et ondes de tempête | Interruptions plus fréquentes de la circulation sur les routes côtières et peu élevées en raison des ondes de tempête | Inondation des routes côtières | | Élévation des chaussées et des ponts | Transfert de certains tronçons de routes |
| | Ondes de tempête graves, nécessitant des évacuations | Inondations plus fréquentes ou plus graves des tunnels et des infrastructures peu élevées | | Ajout de systèmes d'évacuation des eaux de pluie le long des routes côtières | Protection des biens immobiliers côtiers de valeur par des digues |
| | | Érosion des fondations des chaussées et des éléments d'appui des ponts | | Élévation et protection des accès aux ponts, aux tunnels et des voies de transit | Renforcement et élévation des digues et des dispositifs de protection existants |
| | | Affouillement des ponts | | Augmentation de la capacité de pompage pour les tunnels | Limitation des nouvelles constructions sur les zones côtières les plus vulnérables |
| | | Diminution de la hauteur libre sous les ponts | | | Augmentation des primes d'assurance pour limiter les nouveaux aménagements |
| | | Perte de zones humides et de barrières côtières, affaissements de terrain | | | |

| Facteur du changement climatique | Interruptions de l'activité | Infrastructures touchées | Modifications de l'activité | Changements au niveau de la conception et des matériaux | Autres éléments |
|--|--|--|--|--|--|
| Précipitations: augmentation des chutes de pluies intenses | Augmentation des retards dus au mauvais temps | Augmentation des inondations des chaussées routières et des tunnels souterrains | Augmentation du nombre de systèmes de surveillance de l'affouillement des piles et des culées des ponts | Protection des itinéraires d'évacuation habituels | Utilisation accrue de capteurs de surveillance du débit de l'eau |
| | Perturbations de la circulation plus fréquentes | Surcharge des réseaux d'évacuation de l'eau de pluie provoquant des retards et l'inondation des rues | Surveillance accrue des pentes des terrains et des réseaux d'évacuation de l'eau de pluie | Modernisation des réseaux d'évacuation de l'eau de pluie des routes | Restrictions des aménagements sur les plaines inondables |
| | Inondation accrue des itinéraires d'évacuation | Augmentation de l'affouillement et du ravinement des routes et des structures de soutènement; les glissements de terrain et de boue endommagent la chaussée routière | Surveillance accrue des conduites en cas d'exposition, de désalignement et d'affouillement en eaux peu profondes | Protection des piles et des culées de ponts par des entrochements | |
| | Perturbation des activités de construction | Conséquences sur le niveau d'humidité des terrains, ce qui se répercute sur l'intégrité structurelle des routes, des ponts et des tunnels | Nécessité accrue de surveiller les niveaux de crue en temps réel | Augmentation de la capacité des ponceaux | |
| | Modification des inondations saisonnières dues aux précipitations et aux chutes de neige, se répercutant sur la sécurité et les opérations d'entretien | Eau stagnante sur les fondations de chaussée. Augmentation de l'affouillement des fondations de chaussée et dégâts sur les oléoducs | Intégration de procédures d'évacuation d'urgence | Augmentation de la capacité de pompage pour les tunnels | |
| | | | | Ajout de structures antiglissement de terrain | |
| | | | | Modification des normes relatives aux capacités d'évacuation de l'eau de pluie dans les nouvelles infrastructures ou les grands travaux de rénovation (en partant de l'hypothèse d'une tempête cinquantennale plutôt que centennale) | |

Effets des changements climatiques et adaptation à ces changements dans les réseaux de transport internationaux

| Facteur du changement climatique | Interruptions de l'activité | Infrastructures touchées | Modifications de l'activité | Changements au niveau de la conception et des matériaux | Autres éléments |
|---|---|--|---|---|--|
| Tempêtes: ouragans plus fréquents et intenses (catégorie 4 à 5) | Plus de débris sur les routes, provoquant une interruption du transport de personnes et de marchandises | Probabilité plus importante de défaillance des infrastructures | Procédures d'évacuation d'urgence devenant plus habituelles | Modification de la conception des ponts: liaison plus solide des tabliers aux structures inférieures et renforcement des fondations | Renforcement et relèvement des digues |
| | Évacuations d'urgence plus fréquentes et probablement plus étendues | Risque accru d'instabilité des tabliers des ponts | Amélioration de la capacité de prévoir la trajectoire des cyclones et le moment où ils atteignent les côtes | Augmentation de la capacité d'évacuation de l'eau de pluie pour de nouvelles infrastructures de transport ou pour d'importants projets de réhabilitation (en partant de l'hypothèse d'un rendement plus long de l'investissement) | Restriction des nouveaux aménagements sur les zones côtières vulnérables |
| | | Dommages accrus aux dispositifs de signalisation, d'éclairage et aux systèmes d'assistance | Amélioration de la surveillance de l'état des routes et diffusion de messages en temps réel aux usagers | Suppression des encombrements sur les itinéraires d'évacuation et renforcement de la redondance des systèmes | Augmentation des primes d'assurance aux inondations de façon à limiter les nouveaux aménagements |
| | | Diminution de la durée de vie prévue des autoroutes exposées aux ondes de tempête | Amélioration de la modélisation des évacuations d'urgence | Adoption de techniques de construction modulaires lorsque les infrastructures risquent d'être défectueuses | Retour de certaines zones côtières à l'état naturel |
| | | | | Développement de systèmes modulaires de circulation et de signalisation afin de faciliter leur remplacement | |

4.3.1.3 Canada

Face à la variabilité du climat et aux changements météorologiques et climatiques, le Canada s'attache surtout à protéger l'infrastructure et à entretenir et améliorer la mobilité et la sécurité des transports. Pour les routes, la sensibilité météorologique et climatique doit être prise en compte dans les normes et les protocoles de conception et de construction (CCIADC, 2004). Pour les chaussées recouvertes d'asphalte, il convient de tenir compte, dans la sélection des ciments et des émulsions, de la variabilité des températures, de façon à atténuer la formation d'ornières liées à la circulation sous des températures élevées et l'apparition de fissures thermiques à basse température.

La fréquence et l'intensité accrues des journées chaudes risquent d'accroître le ramollissement de la chaussée et les ornières dues à la circulation, mais aussi l'écoulement d'asphalte, l'arasement et le ressuage sur des chaussées anciennes ou mal construites. Les ornières peuvent encore se creuser si la chaleur estivale se prolonge sur des routes à forte circulation de poids lourds. Dans ce cas, il peut être nécessaire de mettre en œuvre des mélanges bitumeux plus perfectionnés et coûteux, afin d'accroître la tolérance thermique de la chaussée. Les fissures thermiques provenant du gel et les dégâts provoqués par des cycles de gel-dégel plus fréquents peuvent entraîner une dégradation précoce du revêtement routier, en particulier lorsque la couche de base est composée de matériaux saturés et à grain fin. Ces dégâts peuvent être atténués par une isolation en polystyrène, comme celle qui a été placée sous un tronçon de l'autoroute de Dempster. Parmi les mesures d'adaptation au raccourcissement ou au caractère aléatoire de la période d'utilisation des ponts de glace, il convient de citer le recours plus important au transport par barge durant l'été, une construction plus solide et un entretien plus important des routes en question, de façon à prolonger leur durée de vie saisonnière, la construction de routes praticables en toute saison et l'utilisation de systèmes de surveillance comme le système ARWIS (Advanced Road Weather Information System) pour suivre et prévoir les conditions météorologiques et l'état des routes, de façon à réduire l'épandage de sel (CCIADC, 2004).

Il convient de noter que les travaux de recherche sur l'adaptation sont bien moins nombreuses que les études sur l'atténuation des changements climatiques, sauf dans les régions recouvertes de pergélisol (Infrastructure Canada, 2006).

4.3.1.4 France

Selon une étude (SETRA et LCPC, *Contributions au Rapport interministériel: Coûts des impacts du changement climatique et de l'adaptation en France*, Ministère de l'écologie, de l'énergie, du développement durable et de la mer) réalisée en 2009 par le Ministère du développement durable, des dégâts peuvent être observés en cas d'élévation de la température moyenne sur des périodes plus longues.

Cette étude montre que, dans l'ensemble, la canicule de 2003 n'a pas entraîné de perturbations généralisées mettant en cause la pérennité des structures de chaussée ni des ouvrages d'art, qui ont bien résisté à la vague de chaleur. En revanche, les informations recueillies font état d'un certain nombre de problèmes ponctuels sur la chaussée et les ouvrages d'art.

Pour les ponts, la canicule a entraîné un retrait des sols et du remblai, notamment des ouvrages en argile. On signale l'apparition de fissures sur certains ponts et l'affaissement de remblais. Les structures ne faisaient pas apparaître d'anomalies à grande échelle à la fin de la canicule.

Il est également possible d'observer des fissures dues au dessèchement du sol. Il est important de noter que les routes de France comportent une couche de forme homogène (analogue au Nord et au Sud). La couche de surface diffère généralement en fonction du « type de climat ». Seuls l'alignement et la formation d'ornières sont réellement concernés par les changements climatiques.

Le climat aurait un impact négligeable sur les chaussées, sauf dans le cas d'un trafic compris entre 300 et 750 poids lourds par jour (trafic T1). Dans l'appréciation du comportement des matériaux, le paramètre climatique est secondaire par rapport à la circulation.

Par conséquent:

- (a) Le nombre de chaussées touchées par un changement du « type de climat » semble limité;
- (b) Le trafic est la principale sollicitation de la chaussée;
- (c) L'altitude est un facteur qui a peut-être plus d'impact que le climat;
- (d) Le critère des « basses températures » influe sur l'alignement, le revêtement devenant plus vulnérable aux cycles de gel-dégel.

Les températures élevées produisent généralement les effets mécaniques suivants sur les chaussées:

- (a) Le phénomène du dessèchement du sol, qui soulève le revêtement, est encore plus inquiétant en l'absence de perturbation à grande échelle due à la vague de chaleur.
- (b) Des ornières apparaissent sur l'enrobé. C'est du moins le résultat d'une enquête effectuée suite à la canicule de 2003, qui est moins significative aujourd'hui, étant donné que ses résultats sont anciens.

En résumé, en ce qui concerne les routes et les ponts:

- (a) Les enrobés et les revêtements à froid ont davantage suinté durant l'été 2003.
- (b) Cette tendance est nettement accentuée dans le cas de revêtements à base de liants hydrauliques, avec des fissurations ayant l'apparence de bourrelets en raison du « gondolement » des dalles, lié à des températures élevées. Divers problèmes localisés ont été observés, du fait du phénomène de retrait-gonflement des argiles.

Une autre étude (*Vulnérabilité du territoire national aux risques littoraux: contributions au Rapport interministériel sur le coût des impacts du changement climatique 2008-2009*), pilotée par le Centre d'Études Maritimes et Fluviales (CETMEF) en collaboration avec les Centres d'études techniques de l'équipement (CETE) de l'Ouest et Méditerranée, a principalement porté sur la vulnérabilité de l'infrastructure routière face au risque d'inondation du littoral. La cartographie des zones de faible élévation est un indicateur important pour déterminer la vulnérabilité des zones côtières aux inondations. Selon une telle approche de la topographie, les niveaux marins centennaux correspondent aux « zones de faible élévation ». Les effets des changements climatiques sur l'étendue de ces zones vulnérables sont mesurés en établissant la cartographie des zones situées sous le niveau marin centennal + 1 m. Cette simulation permet d'identifier les zones inondées en cas d'événement centennal avec une hausse d'un mètre du niveau de la mer.

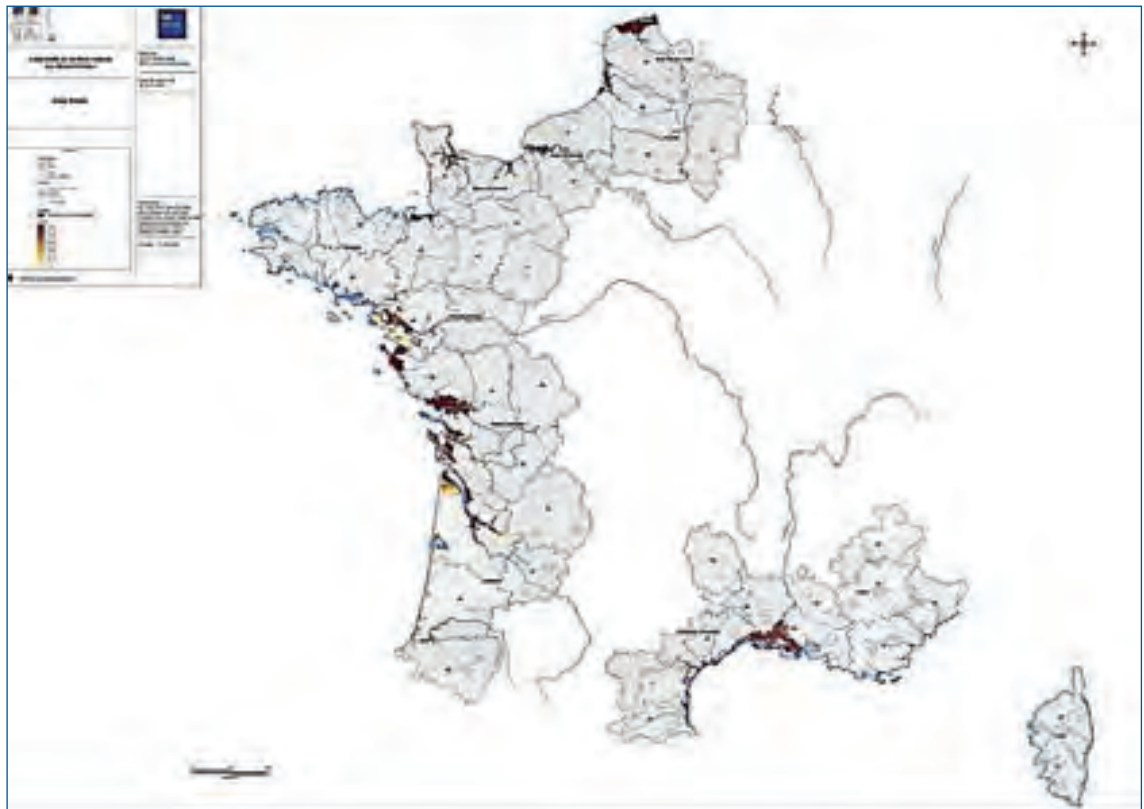


Figure 54. Vulnérabilité du territoire français aux risques côtiers – cartographie des zones de faible élévation.

L'hypothèse d'une hausse du niveau de la mer d'un mètre à l'horizon 2100 a été retenue. Il a été considéré que les ouvrages situés à plus d'un mètre au-dessus de la ligne côtière étaient menacés de submersion permanente. Le coût pourrait être égal à la valeur des constructions qui s'y trouvent. À partir d'informations issues de la base de données BD Topo Pays® de l'IGN sur les infrastructures de transport situées en dessous de la hauteur de submersion centennale + 1 m et en estimant le coût linéaire des constructions à 10 millions d'euros par kilomètre de route et le coût de réparation à environ 250 000 euros/km, une hausse d'un mètre du niveau de la mer aurait, en termes de biens immobiliers, un coût pouvant atteindre 2 milliards d'euros pour les routes principales, non compris les autoroutes et la perte d'usage. Le tableau 8 ci-dessous montre l'infrastructure linéaire des trois catégories de zones de faible élévation. Ces chiffres sont rapportés au niveau national en fonction de la nature du réseau concerné: autoroutes, routes nationales, routes départementales et autres (routes communales). Ils sont fondés sur le total des biens, ce qui permet de localiser les problèmes liés à chaque catégorie de route.

| | Niveaux marins centennaux -1m | Niveaux marins centennaux | Niveaux marins centennaux +1m |
|---|-------------------------------|---------------------------|-------------------------------|
| Autoroutes % du linéaire national | 160 1,3% | 301 2,5% | 355 2,9% |
| Routes Nationales % du linéaire national | 79 0,7% | 148 1,3% | 198 1,7% |
| Départementales % du linéaire national | 2074 0,5% | 3314 0,9% | 4338 1,1% |
| Autres % du linéaire national | 7032 1,12% | 11559 1,84% | 15522 2,47% |
| Voies ferrées % du linéaire national | 812 2,6% | 1482 4,8% | 1967 6,3% |

Tableau 8. Linéaire dans chaque zone de faible élévation et infrastructure routière et ferroviaire (en kilomètres) en France (Ne tient pas compte des ouvrages de protection existants. Calculs en référence aux niveaux marins centennaux actuels)

La superficie des zones de faible élévation augmente. Les ouvrages pris en compte dans la colonne «niveaux marins centennaux – 1 m» sont tous inclus dans la colonne «niveaux marins centennaux». De même, les structures prises en compte dans la colonne «niveaux marins centennaux» sont toutes incluses dans la colonne «niveaux marins centennaux + 1 m».

Cette méthode fait apparaître une plus grande vulnérabilité potentielle des autoroutes et des routes communales en pourcentage du réseau de transport.

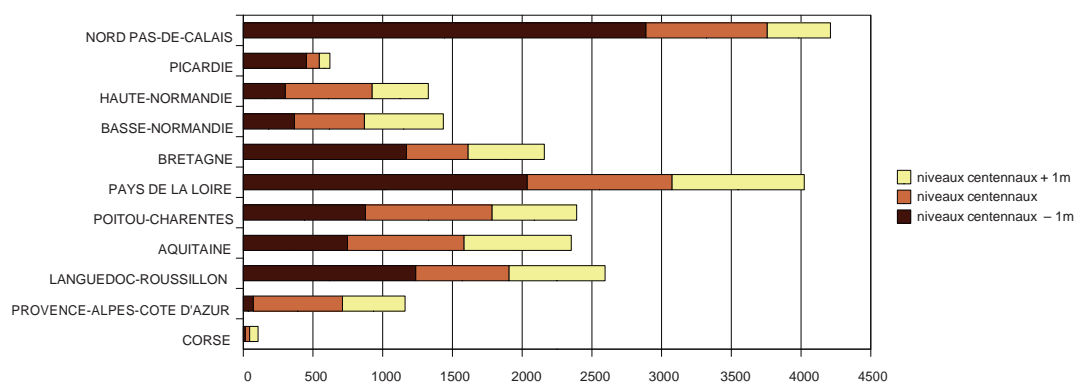


Figure 55. Linéaire d'infrastructures de transport dans les zones de faible élévation des régions françaises, en kilomètres.

4.3.2 Mesures techniques d'adaptation pour les voies ferrées

Le transport ferroviaire achemine une part importante des marchandises et voyageurs (environ 10,2 % et 6,3 % du transport intra-européen de marchandises et de voyageurs respectivement, voir Commission européenne, 2012b), offre des économies d'échelle et, compte tenu de sa faible intensité énergétique et de carbone, contribue à atténuer les émissions de gaz à effet de serre¹⁸. Toutefois, l'adoption massive de ce mode de transport au niveau international à l'avenir dépendra d'une interopérabilité efficace¹⁹ et de l'adoption de normes rigoureuses d'efficacité et de sécurité (voir http://ec.europa.eu/transport/modes/rail/index_en.htm). Dans son Livre Blanc de 2011 sur les transports, la Commission a présenté son projet d'espace européen unique des transports à l'horizon 2050, qui permettra de lever les obstacles administratifs, technique et réglementaires de façon intégrée. Par conséquent, une série de propositions allant dans ce sens a été adoptée dans le cadre du 4^e paquet ferroviaire (01/2013), qui place l'innovation au cœur de la gestion et de l'exploitation du rail. Dans le cadre de cette initiative, qui aura des retombées importantes sur les réseaux de transport internationaux de la CEE, il a été reconnu que l'intégration était nécessaire pour améliorer progressivement la qualité, la capacité et la productivité du service, des éléments essentiels dans la mise en œuvre de l'espace unique européen des transports. L'éparpillement des travaux de recherche et de développement ralentira l'adoption, par le marché, de solutions novatrices, entravant du même coup les améliorations à apporter en termes de capacité, de sécurité, de fiabilité et de coûts liés au cycle de vie. Il faudra donc mettre en commun toutes les ressources disponibles dans le domaine de la recherche et de l'innovation tant dans le secteur du rail que dans les établissements universitaires et de recherche (voir <http://ec.europa.eu/transport/media/consultations/doc/2013-shift2rail/background.pdf>).

Si les infrastructures et les politiques d'exploitation, les normes techniques et les seuils d'intervention futurs restent à peu près similaires à ce qui existe aujourd'hui, l'augmentation du trafic et l'évolution des conditions météorologiques peuvent poser des problèmes aux réseaux ferrés nationaux et internationaux au cours des 50 prochaines années. Il semble difficilement envisageable de continuer à concevoir, à construire, à exploiter et à entretenir des infrastructures selon des normes fondées sur les conditions météorologiques antérieures. Vu que les chemins de fer ont une durée de vie très longue et sont construits pour résister à des risques naturels, tels que celui de la crue centennale estimé pendant la phase de conception, il est probable que la fréquence et l'intensité accrues des phénomènes extrêmes sous l'effet des changements climatiques mettent à l'épreuve la capacité de résistance du système ferroviaire et en majorent les coûts (Nolte et al., 2011). Les effets des changements climatiques dans le secteur du rail devraient être considérables, nécessitant des politiques intégrées (Lochman, 2012), une cartographie systématique des facteurs de vulnérabilité climatiques, l'élaboration d'un système efficace de planification et la réalisation de synergies (Lindgren et al., 2009).

¹⁸ Il convient toutefois de noter que si le rail est en mesure de transporter des marchandises avec une consommation d'énergie et des émissions de gaz à effet de serre bien moindres que d'autres modes de transport (voir Crist (2012) et note de bas de page n°11), les coûts énergétiques et les émissions de gaz à effet de serre que comporte l'aménagement de nouvelles infrastructures ferroviaires devraient aussi être pris en compte (Hill et al., 2011). Les infrastructures ferroviaires comprennent divers éléments (gares, ballast, voies, tunnels, ponts, lignes caténaïres, dispositifs de signalisation et de télécommunications, troisième rail électrifié, passages à niveau et remblais) : les coûts de construction, l'énergie consommée et les gaz à effet de serre produits par ces équipements varient en fonction de l'itinéraire. Ces différences expliquent la multiplicité des chiffres avancés dans la littérature concernant les coûts totaux sur la durée de vie et les émissions de gaz à effet de serre des nouvelles infrastructures ferroviaires (O' Toole, 2008).

¹⁹ Par interopérabilité, on entend la capacité d'un train de circuler sur n'importe quelle ligne du réseau. La compétitivité du transport de marchandises par voie ferrée est limitée par les différences de matériel, de techniques, de systèmes de signalisation et de règles de sécurité entre les États. Dans l'UE, la directive 2004/50/EC porte sur l'établissement de normes communes pour les systèmes de signalisation et de commande, les applications télématiques au service du fret, l'exploitation et la gestion du matériel roulant destiné à un usage international et les qualifications du personnel

Parmi les effets des changements climatiques, il convient de citer des précipitations plus fréquentes et plus intenses, des inondations, des hivers plus humides et des étés plus secs, des températures plus élevées et des vagues de chaleur, des tempêtes et des ondes de tempête, des vents et des orages plus violents. Ces phénomènes devraient accroître la fréquence de divers problèmes : inondation des voies ferrées, affouillement des ponts, affaissement des talus et déformation des rails. Les autres conséquences à prévoir sont notamment la dégradation du transport de l'électricité, les feux de talus, la surchauffe du matériel roulant, les dégâts aux installations, le survoltage et des effets sur la signalisation. Des méthodes de construction novatrices devraient être utilisées pour les différentes régions, comme des remblais de refroidissement et des mesures de contrôle de la conduction thermique, de la radiation et de la convection, autant de techniques qui ont servi à atténuer les effets du dégel du pergélisol sur la ligne ferroviaire Qinghai-Tibet (Qingbai et al., 2008).

Si les aspects techniques sont relativement bien connus, il manque un cadre global pour quantifier les effets probables des changements climatiques sur le secteur ferroviaire, de même qu'une méthode permettant de déterminer quels sont les effets les plus critiques auxquels il convient d'allouer des ressources en priorité (Baker et al., 2010). Les principaux types d'infrastructure considérés comme vulnérables sont les suivants: voies (températures extrêmes), ouvrages de terrassement (précipitations extrêmes), systèmes d'évacuation des eaux pluviales (précipitations torrentielles), lignes de caténaires (vents violents) et dispositifs de protection des côtes et des estuaires (élévation du niveau de la mer et ondes de tempête). Afin d'identifier les méthodes et les mesures qui peuvent être envisagés pour protéger les réseaux ferrés internationaux, quelques initiatives émanant d'organes publics et privés nationaux sont résumées ci-dessous.

4.3.2.1 Royaume-Uni – Network Rail

Au Royaume-Uni, le rail sera très touché par les changements climatiques (Baker et al., 2010), ce secteur d'activité se trouvant dans l'obligation de s'y adapter de différentes façons dans les décennies à venir. D'après les prévisions du programme sur les effets climatiques UKCIP02, les changements climatiques se divisent en trois grandes catégories: étés plus chauds et plus secs ; hivers plus chauds et plus humides et fréquence plus importante de violentes tempêtes . Ces trois catégories offrent un cadre utile de discussion sur les effets possibles des changements climatiques. Dans un rapport de 2003, le Conseil britannique de la sécurité et de la normalisation du rail (RSSB - Railway Safety and Standards Board) avait identifié les principaux effets susceptibles d'intéresser le secteur du transport ferroviaire britannique à l'avenir, à savoir: les effets de températures élevées sur les voies (déformation, etc.), les effets de fortes pluies sur les ouvrages de terrassement, les effets de niveaux extrêmes de précipitations sur les réseaux d'évacuation des eaux pluviales en service et les effets de vents très violents sur les systèmes de caténaires.

Des étés chauds et secs devraient avoir des effets négatifs sur le réseau ferroviaire britannique, notamment: (a) des phénomènes accrus de déformation des voies; (b) une dessiccation des fondations sur lesquelles reposent les voies; (c) des besoins accrus de climatisation; (d) des difficultés supplémentaires pour ventiler les réseaux ferroviaires souterrains; (e) une végétation plus touffue du fait d'un allongement de la saison de croissance; (e) la multiplication des problèmes de chutes de feuilles. Des hivers chauds et humides plus fréquents devraient avoir des effets négatifs sur le réseau ferroviaire, notamment: (a) des inondations plus importantes et des contraintes s'exerçant sur les systèmes d'évacuation des eaux pluviales; (b) une instabilité des ouvrages de terrassement et des accotements gorgés d'eau; (c) des problèmes de circuit sur les voies. Toutefois, ils pourraient aussi avoir quelques effets bénéfiques, comme une diminution des incidents occasionnés par la neige, le gel et les basses températures.

Des vents violents augmentent le risque de décâblage (perte de contact entre les pantographes et les caténaires), de déraillement des rames et d'accidents ou de perturbations de fonctionnement du réseau en raison de chutes d'arbres. Enfin, une élévation du niveau de la mer de 0,3 m à 0,4 m peut avoir des conséquences graves sur les systèmes ferroviaires des estuaires ou des côtes. Les tableaux suivants répertorient les effets des changements climatiques en précisant leurs risques et la durée de leurs conséquences (tableaux 9 et 10), mais aussi les solutions d'adaptation possibles (tableau 11).

Tableau 9. Aperçu des risques pesant sur les actifs ferroviaires (Network Rail, 2011).

| Impact climatique | Risques | Importance des retombées | Importance des effets sur les performances | Probabilité de réalisation | Échéance |
|------------------------|--|--------------------------|--|----------------------------|-------------|
| Chaleur | Pannes de la climatisation des rames | Faible | Moyenne | Moyenne | Court terme |
| Chaleur | Déformation des voies | Élevée | Élevée | Moyenne | Long terme |
| Chaleur | Limitations de vitesse en raison du risque de déformation | Faible | Élevée | Moyenne | Long terme |
| Chaleur | Affectation de personnel à la surveillance des voies (risque de flambage) | Moyenne | Élevée | Moyenne | Long terme |
| Chaleur | Terre électrique flottante en raison d'un faible niveau d'eau | Élevée | Élevée | Moyenne | Long terme |
| Chaleur | Raccourcissement de la période de travaux de construction et d'entretien des voies | Faible | Moyenne | Moyenne | Long terme |
| Chaleur | Diminution de la qualité des voies en raison d'un entretien moins fréquent | Faible | Moyenne | Moyenne | Long terme |
| Chaleur | Conditions de travail par temps chaud | Élevée | Élevée | Moyenne | Long terme |
| Chaleur | Dessèchement des ouvrages de terrassement | Faible | Moyenne | Moyenne | Long terme |
| Chaleur | Effets de la chaleur sur les ponts tournants | Faible | Faible | Moyenne | Long terme |
| Chaleur | Affaissement des câbles de contact dans les stations de renvoi | Faible | Élevée | Moyenne | Long terme |
| Chaleur | Diminution de la durée de vie des transformateurs | Faible | Faible | Moyenne | Long terme |
| Chaleur | Apport de chaleur par insolation se répercutant sur l'équipement des lignes, la signalisation, l'alimentation électrique et les systèmes de télécommunications | Moyenne | Élevée | Moyenne | Court terme |
| Précipitations accrues | Augmentation des inondations en général | Faible | Élevée | Moyenne | Long terme |
| Précipitations accrues | Inondations des gares | Faible | Moyenne | Moyenne | Long terme |
| Précipitations accrues | Inondations des dépôts | Faible | | Moyenne | Long terme |
| Précipitations accrues | Inondation des installations et des pièces contenant les équipements | Élevée | Élevée | Moyenne | Court terme |

Effets des changements climatiques et adaptation à ces changements dans les réseaux de transport internationaux

| Impact climatique | Risques | Importance des retombées | Importance des effets sur les performances | Probabilité de réalisation | Échéance |
|------------------------|---|--------------------------|--|----------------------------|-------------|
| Précipitations accrues | Inondations dues à une évacuation insuffisante des eaux pluviales et à un niveau élevé de l'eau | Faible | Élevée | Moyenne | Long terme |
| Précipitations accrues | Au niveau des ponts: affouillement, pression, obstruction damage | Élevé | Élevée | Moyenne | Long terme |
| Précipitations accrues | Inondation des tunnels | Faible | Moyenne | Moyenne | Long terme |
| Précipitations accrues | Inondation des circuits de voies, des systèmes automatiques d'alerte, des armoires le long des voies (inondations par les eaux pluviales) | Faible | Élevée | Moyenne | Court terme |
| Précipitations accrues | Ruissellement de surface accru | Faible | Élevée | Moyenne | Long terme |
| Précipitations accrues | Élévation du niveau de la nappe phréatique: affouillements | Élevée | Élevée | Moyenne | Long terme |
| Précipitations accrues | Sécurité du personnel en cas d'inondations extrêmes: personnel de surveillance des sites inondés | Moyenne | Élevée | Faible | Court terme |
| Précipitations accrues | | Moyenne | Faible | Moyenne | Long terme |
| Précipitations accrues | | | | | |
| Froid | Soulèvement dû au cycle gel-dégel | Faible | Faible | Faible | Long terme |
| Froid | Chutes de pierre dues au cycle gel-dégel | Élevée | Élevée | Faible | Long terme |
| Froid | Effets du cycle gel-dégel sur les ponts | Moyenne | Faible | Faible | Long terme |
| Froid | Glace dans les tunnels | Faible | Moyenne | Faible | Court terme |
| Froid | Rupture de rails | Moyenne | Élevée | Faible | Court terme |
| Froid | Glace et neige sur le 3e rail | Faible | Élevée | Faible | Court terme |
| Froid | Glace et neige sur la voie | Faible | Élevée | Faible | Court terme |
| Froid | Glissades, faux-pas et chutes dus à la glace et à la neige | Moyenne | Élevée | Faible | Court terme |
| Vent | Ponts et circulation sur les ponts | Faible | Faible | Faible | Long terme |
| Vent | Matériel (lignes de caténaires, systèmes de signalisation et de télécommunications), structures, auvents des gares, etc. | Faible | Faible | Faible | Long terme |
| Vent | Trains de marchandises | Élevée | Moyenne | Faible | Long terme |
| Vent | Utilisation de grues | Faible | Moyenne | Faible | Long terme |
| Vent | Effets des changements de direction et de vitesse sur les arbres | Moyenne | Moyenne | Faible | Long terme |
| Vent | Câbles de contact / Pantographes | Faible | Moyenne | Faible | Long terme |

| Impact climatique | Risques | Importance des retombées | Importance des effets sur les performances | Probabilité de réalisation | Échéance |
|--|---|--------------------------|--|----------------------------|-------------|
| Élévation du niveau de la mer et augmentation des orages | Ouvrages de protection | Faible | Moyenne | Moyenne | Long terme |
| Insolation, chaleur, précipitations, vent | Augmentation et évolution de la végétation | Élevée | Élevée | Moyenne | Long terme |
| Insolation, chaleur, précipitations, vent | Problèmes d'adhésion | Moyenne | Élevée | Faible | Long terme |
| Insolation, chaleur, précipitations, vent | Dégagement des circuits de voie envahis par la végétation | Moyenne | Élevée | Faible | Long terme |
| Insolation, chaleur, précipitations, vent | Visualisation des signaux | Élevée | Élevée | Faible | Long terme |
| Wind | Croissance des arbres le long de la voie présentant un risque d'obstruction | | Élevée | Moyenne | Long terme |
| Insolation, chaleur, précipitations, vent | Diminution de la sécurité des accotements en raison d'un envahissement de la végétation | Moyenne | Faible | Moyenne | Long terme |
| Insolation, chaleur, précipitations, vent | Parasites dans les systèmes de signalisation | Élevée | Élevée | Faible | Long terme |
| Humidité accrue | Corrosion des rails | Moyenne | Faible | Faible | Long terme |
| Humidité accrue | Corrosion des ponts | Faible | Faible | Moyenne | Long terme |
| Divers | Intervention en cas d'incident | Faible | Moyenne | Moyenne | Court terme |
| Divers | Trains ratés, conséquences pour les passagers | Moyenne | Élevée | Moyenne | Long terme |

Tableau 10. Résumé des priorités au niveau des actifs et de l'exploitation. Les priorités feront l'objet d'un examen permanent (Network Rail, 2011).

| Facteur climatique | Groupe | Conséquence |
|---|---|--|
| Chaleur | Voies | Risque de flambage des voie |
| Chaleur | Voies | Raccourcissement de la période de travaux de construction et d'entretien des voies |
| Chaleur | Personnes | Santé des passagers en cas de panne du train par grande chaleur ou grand froid |
| Chaleur | Personnes | Conséquences sur les marchandises en cas de panne du train par grande chaleur ou grand froid |
| Chaleur | Personnes | Conditions de travail et recours à du personnel de surveillance du flambag |
| Chaleur | Alimentation électrique/signalisation/télécoms | Affaissement des câbles de contact des caténaires dans les stations de renvoi |
| Chaleur | Alimentation électrique/signalisation/télécoms | Répercussion sur l'équipement hors voie, en particulier sur les systèmes de signalisation et de télécommunications |
| Chaleur | Alimentation électrique/signalisation/télécoms | Terre électrique flottante en raison d'une nappe phréatique basse ou vide |
| Précipitations | Crués | Pannes du matériel de voie et hors voie |
| Précipitations | Inondations par remontée de nappe | Pannes du matériel de voie et hors voie |
| Précipitations | Crués | Pannes du matériel de voie et hors voie |
| Précipitations | Crués | Affouillements et autres conséquences de l'écoulement pour les ponts |
| Précipitations | Crués | Affouillement des remblais et des ponceaux en raison d'un niveau élevé des cours d'eau |
| Précipitations | Crués | Sécurité du personnel d'inspection en cas d'inondation extrême |
| Précipitations | Crués | Glissements de terrain |
| Précipitations | Crués | Accessibilité de la flotte et des dépôts d'entretien |
| Insolation/chaleur/précipitations/vent | Végétation | Modification du type de végétation, problèmes d'adhésion et non activation des circuits de voies |
| Insolation/chaleur/précipitations/vent | Végétation | Chutes d'arbres obstruant la voie |
| Élévation du niveau de la mer et tempêtes | Ouvrages de protection des côtes et des estuaires | Débordement de vagues et inondations de voies ferrées sur des côtes et des estuaires protégés |

Le tableau 11 donne des exemples de risques importants auxquels est exposé le réseau ferroviaire britannique et propose des solutions (qui font appel à l'ingénierie lourde ou à des techniques de gestion «douces»). Les solutions présentées ci-dessous sont mises en œuvre dans le réseau ferré britannique ou sont à l'étude.

Tableau 11. Risques importants et solutions possibles (Dora, 2011; 2012 voir aussi annexe III).

| Nature du risque | Système touché | Problème | Solution possible |
|---|--|--|---|
| Élévation du niveau de la mer et tempêtes plus fréquentes et intenses | Voies ferrées des zones littorales | Endommagement des brise-mer: risque de rupture, de submersion et de déraillement | <ul style="list-style-type: none"> - Reconstruction des brise-mer selon des normes adaptées - Mise en place d'un système de prévision sur l'état de la mer |
| Élévation du niveau de la mer et tempêtes plus fréquentes et intenses | Voies ferrées des zones littorales | Déferlement de vagues sur les rames | <ul style="list-style-type: none"> - Reconstruction des brise-mer selon des normes adaptées - Mise en place d'un système de prévision sur l'état de la mer |
| Précipitations intenses | Effondrements et glissements de terrain | Risque d'obstruction et de déraillement | <ul style="list-style-type: none"> - Cartographie des sites où l'eau est concentrée - Connaissance de l'état des ouvrages de terrassement - Connaissance de l'emplacement des systèmes d'évacuation des eaux pluviales, de leur état et de leur caractère crucial - Amélioration des ouvrages de terrassement et des systèmes d'évacuation des eaux pluviales par de nouveaux investissements - Gestion ciblée des réseaux d'évacuation des eaux pluviales |
| Précipitations intenses extrêmes | Affouillement des ponts | Les fondations, fragilisées, provoquent un effondrement de l'ouvrage d'art et créent des risques de déraillement | <ul style="list-style-type: none"> - Connaissance de la probabilité de survenue de l'affouillement - Installation de systèmes de protection contre les affouillements - Instauration de systèmes de surveillance des risques d'inondation en relation avec les agences de prévision des inondations - Surveillance du niveau des cours d'eau |
| Précipitations intenses extrêmes | Systèmes de signalisation et d'alimentation électrique hors voie | Inondation de la voie, panne du matériel essentiel hors voie | <ul style="list-style-type: none"> - Cartographie des sites où l'eau est concentrée - Amélioration des ouvrages de terrassement et des systèmes d'évacuation des eaux pluviales grâce à de nouveaux investissements - Gestion ciblée des systèmes d'évacuation des eaux pluviales |
| Chaleur extrême | Voies | Flambage, d'où risques de déraillement | <ul style="list-style-type: none"> - Tenue d'un registre de l'état des voies sur différents sites - Limites de vitesse sur les sites à risque - Limitation des activités qui risquent de perturber l'état du ballast par temps chaud - Peinture des rails en blanc sur les sites concernés |
| Chaleur extrême | Systèmes de signalisation et d'alimentation électrique hors voie | Fiabilité des logiciels et des différents éléments | <ul style="list-style-type: none"> - Refroidissement actif ou passif des armoires d'équipement - Installation des armoires à l'ombre - Remplacement de l'équipement |

| Nature du risque | Système touché | Problème | Solution possible |
|---------------------------------------|--|--|--|
| Chaleur extrême | Personnel | Stress thermique | <ul style="list-style-type: none"> - Prise en compte de la durée d'exposition à la chaleur et de ses conséquences sur les personnes et ajustement des tableaux de service en conséquence - Formation du personnel et prise en compte des différences entre travail à l'intérieur et à l'extérieur - Prise en compte des conséquences sur le sommeil et du risque d'épuisement |
| Chaleur extrême | Équipement des rames | Fiabilité des logiciels et des différents éléments | <ul style="list-style-type: none"> - Peinture des rames d'une couleur claire - Refroidissement actif ou passif - Équipement sur les toits à éviter |
| Augmentation rapide de la température | Systèmes de signalisation et d'alimentation électrique hors voie | Fiabilité des logiciels et des différents éléments | <ul style="list-style-type: none"> - Conception de modèles à forte inertie thermique - Installation des armoires à l'ombre - Remplacement de l'équipement |
| Chaleur extrême | Lignes de caténaires | Affaissement du câble de contact | <ul style="list-style-type: none"> - Renforcement des mâts et des câbles |
| Vitesse accrue du vent | Lignes de caténaires | Déplacement latéral du câble de contact | <ul style="list-style-type: none"> - Renforcement des mâts et des câbles |

4.3.2.2 États-Unis

Aux États-Unis, le réseau ferroviaire se compose de plus de 193 000 kilomètres de grandes lignes (<http://www.nationalatlas.gov/transportation.html>). Les changements climatiques auront des effets variables sur l'infrastructure et l'exploitation, étant donné que le réseau s'étend sur différentes zones climatiques. Ces dernières années, l'adaptation aux changements climatiques est devenue une question importante pour la FRA (Federal Railroad Administration), qui va intégrer des mesures d'adaptation à son programme de planification et de développement de nouveaux axes de transport ferroviaire. Il a également été prévu d'intégrer cette question aux futures dotations de la FRA pour la planification et le développement d'infrastructures (Ministère américain des transports, 2012b). En outre, en collaboration avec Amtrak, la FRA lancera un projet pilote d'évaluation des risques et de la vulnérabilité climatiques, qui devrait être terminé fin 2013, afin de déterminer quels sont les effets possibles des changements climatiques sur les actifs et d'intégrer une analyse exhaustive de ces questions aux décisions de financement à venir, afin d'améliorer et d'entretenir le réseau ferré. Par ailleurs, le programme prévoit des actions de sensibilisation, comme des réunions avec les États et les sociétés des chemins de fer, visant à encourager la prise en compte des changements climatiques dans la planification et l'exploitation du rail.

Le tableau 12 récapitule les aspects liés à l'adaptation aux changements climatiques de l'infrastructure de transport ferroviaire tels qu'ils ont été identifiés par le National Research Council (2008).

Tableau 12. Changements climatiques éventuels, effets sur les transports ferroviaires et solutions d'adaptation (National Research Council, 2008).

| Facteur du changement climatique | Fonctionnement / Interruptions | Infrastructure | Modifications de l'activité | Changements au niveau de la conception et des matériaux | Autres éléments |
|---|---|--|--|--|---|
| Températures: augmentation des journées très chaudes et vagues de chaleur | Activité de construction limitée à certaines périodes pour des questions d'hygiène et de sécurité; en règle générale, des restrictions s'appliquent à partir de 29,5 °C; coups de chaleur possibles à 40,5 °C | Déformation des rails; lorsque la température de l'air dépasse 43°C, défaillance possible des équipements | Horaires de construction décalés sur des périodes plus fraîches de la journée | Utilisation accrue de longs rails soudés | |
| Températures: diminution des journées très froides | Diminution des coûts d'enlèvement de la neige et de la glace et conséquences moindres pour l'environnement de l'utilisation de sel et de produits chimiques | | Enlèvement moins fréquent de neige et de glace | | |
| | Moins de journées d'interruption du travail pour cause de froid, pour les ouvriers chargés de l'entretien | | Allongement de la période de construction et d'entretien | | |
| Température: augmentation des températures dans l'Arctique | | Dégel du pergélisol entraînant l'affaissement de l'assiette des rails, des fondations des ponts et des conduites | Allongement de la période de construction | Utilisation de différents types de systèmes de réfrigération passive (thermosiphons) | Transfert de certains tronçons de voies ferrées vers un terrain plus stable |
| | | | Utilisation accrue de sonars pour surveiller le débit des cours d'eau et l'affouillement des ponts | | |

Effets des changements climatiques et adaptation à ces changements dans les réseaux de transport internationaux

| Facteur du changement climatique | Fonctionnement / Interruptions | Infrastructure | Modifications de l'activité | Changements au niveau de la conception et des matériaux | Autres éléments |
|---|--|--|-----------------------------|---|--|
| Élévation du niveau de la mer et ondes de tempête | Interruptions plus fréquentes de la circulation sur les voies côtières et peu élevées en raison des ondes de tempête | Inondation des voies ferrées côtières | | Élévation des chaussées et des ponts | Transfert de certains tronçons de voies vers l'intérieur des terres |
| | Ondes de tempête graves, nécessitant des évacuations | Inondations plus fréquentes ou plus graves des tunnels et des infrastructures peu élevées Affaiblissement des ponts | | Ajout de réseaux d'évacuation des eaux pluviales le long des voies ferrées côtières Élévation et protection des accès aux ponts, aux tunnels et des voies de transit | Protection des biens immobiliers côtiers de valeur par des digues Renforcement et élévation des digues et des dispositifs de protection existants |
| | | Diminution de la hauteur libre sous les ponts Disparition de zones humides et de barrières côtières | | Augmentation de la capacité de pompage pour les tunnels | Restrictions des aménagements sur les zones côtières les plus fragiles Augmentation des primes d'assurance pour limiter les nouveaux aménagements |
| | | Affaissements de terrain | | | |

| Facteur du changement climatique | Fonctionnement / Interruptions | Infrastructure | Modifications de l'activité | Changements au niveau de la conception et des matériaux | Autres éléments |
|--|--|---|--|---|---|
| Précipitations: augmentation des chutes de pluies intenses | Augmentation des retards dus au mauvais temps | Augmentation des inondations des chaussées routières et des tunnels souterrains | Augmentation du nombre de systèmes de surveillance de l'affouillement des piles et des culées des ponts | Protection des itinéraires d'évacuation | Utilisation accrue de capteurs pour la surveillance du débit de l'eau |
| | Perturbations plus fréquentes de la circulation | Surcharge des systèmes d'évacuation des eaux pluviales | Surveillance accrue des talus et des systèmes d'évacuation des eaux pluviales | Protection des piles et des culées de ponts par des enrochements | Restrictions des aménagements sur les plaines inondables |
| | Inondation accrue des itinéraires d'évacuation | Augmentation de l'affouillement et du ravinement des structures de soutien des rails; les glissements de terrain et de boue endommagent les voies | Surveillance accrue des conduites en cas d'exposition, de désalignement et d'affouillement en eaux peu profondes | Augmentation de la capacité des ponceaux | |
| | Perturbation des activités de construction | Conséquences sur le niveau d'humidité des terrains, ce qui se répercute sur l'intégrité structurelle des ponts et des tunnels | Surveillance accrue des niveaux de crue en temps réel | Augmentation de la capacité de pompage pour les tunnels | |
| | Modification des inondations saisonnières dues aux précipitations et aux chutes de neige, se répercutant sur la sécurité et les opérations d'entretien | | Intégration de procédures d'évacuation d'urgence | Ajout de structures de rétention des pentes et antiglisement de terrain | |
| | | | | Modification des no mes relatives aux capacités d'évacuation des eaux pluviales dans les nouvelles infrastructures ou les grands travaux de rénovation (en partant de l'hypothèse d'une tempête cinquantennale plutôt que centennale) | |

Effets des changements climatiques et adaptation à ces changements dans les réseaux de transport internationaux

| Facteur du changement climatique | Fonctionnement / Interruptions | Infrastructure | Modifications de l'activité | Changements au niveau de la conception et des matériaux | Autres éléments |
|---|---|---|---|--|--|
| Tempêtes: ouragans plus fréquents et intenses (catégorie 4 à 5) | Plus de débris sur les voies ferrées, provoquant une interruption du trafic | Probabilité plus importante de défaillance des infrastructures | Généralisation des procédures d'évacuation d'urgence | Modification de la conception des ponts: liaison plus solide des tabliers aux structures inférieures | Renforcement et relèvement des digues |
| | Évacuations d'urgence plus fréquentes et probablement plus étendues | Risque accru d'instabilité des tabliers des ponts | Amélioration de la capacité de prévoir la trajectoire des cyclones et le moment où ils atteignent les côtes | Augmentation de la capacité d'évacuation des eaux pluviales pour de nouvelles infrastructures de transport ou pour d'importants projets de réhabilitation (en partant de l'hypothèse d'un rendement plus long de l'investissement) | Restriction des nouveaux aménagements sur les zones côtières vulnérables |
| | | Dommages accrus aux dispositifs de signalisation et d'éclairage | Amélioration de la surveillance de l'état des voies et diffusion de messages en temps réel | Suppression des encombrements sur les itinéraires d'évacuation et renforcement de la redondance des systèmes | Augmentation des primes d'assurance aux inondations de façon à limiter les nouveaux aménagements |
| | | | Amélioration de la modélisation des évacuations d'urgence | Adoption de techniques de construction modulaires lorsque les infrastructures risquent d'être défaillantes | Retour de certaines zones côtières à l'état sauvage |
| | | | | Développement de systèmes modulaires de circulation | |

4.3.2.3 Canada

Au Canada, l'infrastructure ferroviaire est très exposée aux températures extrêmes et les rails se déforment parfois sous les fortes chaleurs. Toutefois, le froid extrême semble actuellement plus problématique pour les voies ferrées que la chaleur extrême, à l'instar du réseau routier, ce qui entraîne une fréquence plus importante des ruptures de voies et du gel des aiguillages, et un remplacement plus fréquent des roues. En fin de compte, les effets des changements climatiques sont considérés gérables par le Canada (CCIADC, 2004) et pourraient même apporter quelques effets bénéfiques modestes aux infrastructures ferroviaires, à l'exception des zones de pergélisol (voir ci-dessous).

En effet, un certain nombre d'enseignements ont été tirés de l'expérience concernant les infrastructures de transport et autres, construites sur du pergélisol. Ainsi, le fait de ne pas avoir établi de normes de conception adaptées et de ne pas avoir régulièrement entretenu la ligne The Pas-Churchill (Manitoba) au début du XXe siècle a provoqué des dégâts considérables, les cycles gel-dégel ayant entraîné des déformations et le déplacement de certaines portions de rail. Actuellement, alors que les itinéraires sont sélectionnés de façon rigoureuse avant que commence la construction sur ou dans le pergélisol, les décisions ne tiennent pas habituellement compte des changements climatiques à venir, notamment en raison d'informations insuffisantes. Toutefois, quelques mesures tiennent compte de la durée de vie des infrastructures construites sur du pergélisol. Il existe aussi la possibilité de construire des installations provisoires et faciles à transférer. De telles pratiques comportent certes des coûts, mais démontrent qu'il est possible de gérer des variations de climat dans un environnement qui y est extrêmement sensible.

Les compagnies ferroviaires mettent aussi en œuvre des plans d'exploitation pour l'hiver dont le coût s'élève à plusieurs millions de dollars par an. Parmi ces mesures, il convient de citer le déneigement, le sablage et le salage, l'inspection des voies et des roues, des ordres provisoires de marche réduite et la formation du personnel. Alors que des hivers plus doux ou plus courts devraient bénéficier au rail, des recherches plus adéquates sont nécessaires afin d'identifier et de quantifier ces avantages (Infrastructure Canada, 2006).

4.3.2.4 Japon – Compagnie des chemins de fer de l'est du Japon (JR East Company)

Au Japon, le rail est intégré au système de surveillance sismique. Grâce aux changements dans la teneur en sel de l'eau se trouvant sous les rails, des capteurs détectent les moindres mouvements telluriques et en informent le système d'alerte sismique. De violentes tempêtes (Mori et al., 2013) et l'élévation du niveau de la mer peuvent aussi modifier la résistance au cisaillement, d'où une augmentation éventuelle du risque d'activité sismique. Les activités ferroviaires devraient de plus en plus pâtir des effets suivants des changements climatiques : (i) fortes précipitations provoquant des inondations, des phénomènes d'affouillement, l'élévation du niveau de la nappe phréatique et des glissements de terrain; (ii) vents violents provoquant des déraillements; (iii) fortes vagues intensifiant l'érosion des côtes et l'effondrement des brise-lame le long des voies ferrées côtières; (iv) chutes de neige importantes provoquant des avalanches et des chutes d'arbres; (v) tremblements de terre, vagues de chaleur et orages (Mizukami, 2012, voir aussi les annexes II et III).

Les principales mesures prises par la JR East Company sont les suivantes:

- *Résilience accrue du réseau* (voir figure 56) à l'égard de fortes précipitations (par un renforcement du talus et des systèmes de protection contre l'affouillement), de vents violents (par l'installation de clôtures et d'écrans brise-vent et la plantation de forêts ayant la même fonction) et de fortes chutes de neige (par des dispositifs anti-avalanche, la disponibilité et l'utilisation accrue de matériel de déneigement, des mesures à bord et la plantation de forêts ayant une fonction de protection).
- *Installation de systèmes de surveillance*, composés de divers capteurs qui mesurent les conditions météorologiques (environ 11 anémomètres tous les 100 km de voie ferrée, par exemple), hydrauliques (environ 8 capteurs tous les 100 km), les précipitations (environ 8 capteurs tous les 100 km), les chutes de neige et la température, mais aussi des détecteurs d'affouillement et de glissement de terrain, et des sismographes (environ 4 appareils tous les 100 km) capables de transmettre des informations en temps réel à des centres de commande qui prescrivent des limites de vitesse ou une suspension du trafic, le cas échéant.
- *Dispositifs de formation* pour le personnel de la compagnie.
- *Recherche et développement* dans un laboratoire spécialisé, où les mécanismes des catastrophes naturelles sont étudiés, les risques évalués et où sont élaborées des méthodes d'observation et de détection, des mesures et des normes techniques, mais aussi des mesures concrètes fondées sur l'expérience.

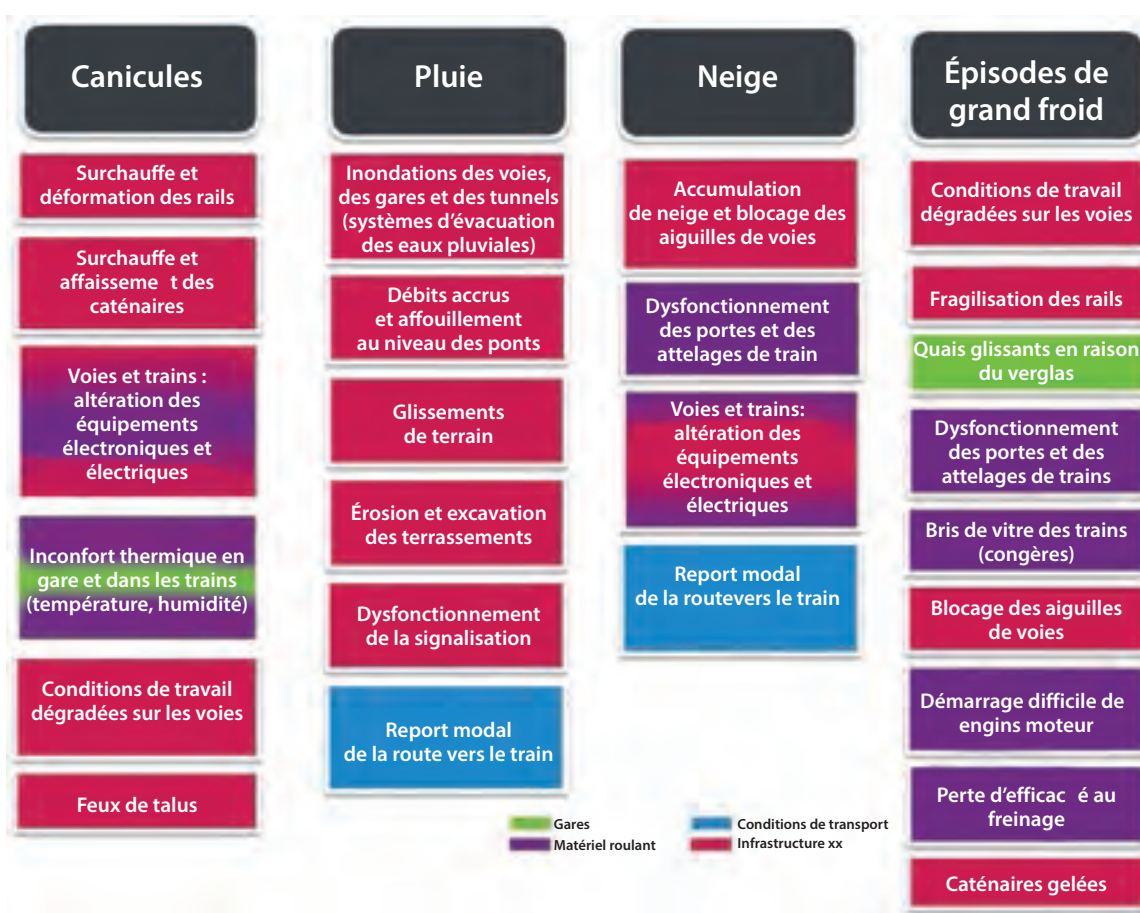


Figure 56. (a) Protection contre l'affouillement; (b) Renforcement du talus; (c) Écran coupe-vent; (d) Auvent de protection contre les avalanches.

4.3.2.5 France – SNCF

À la SNCF, les risques et les effets des changements climatiques sont étudiés dans le détail depuis 2009 (lois dites du Grenelle de l'environnement). La SNCF a apporté une contribution importante à l'élaboration du Plan national d'adaptation au changement climatique: (i) l'entreprise a investi dans du matériel roulant d'une durée de vie d'une quarantaine d'année et dans des gares d'une durée de vie supérieure, de tels actifs devant être raisonnablement à l'épreuve des changements climatiques à long terme; (ii) les risques opérationnels devraient diminuer et la résilience augmenter; (iii) les changements climatiques peuvent modifier les comportements et offrir de nouvelles opportunités.

Tableau 13. Effets des changements climatiques sur le transport ferroviaire (Kaddouri, 2012).



Le Plan d'adaptation se décline en quatre grandes actions. L'action n°1 consiste à passer en revue et adapter les référentiels techniques pour la construction, l'entretien et l'exploitation des réseaux de transport (infrastructures et matériels) en France métropolitaine et dans les DOM-TOM. L'action n°2 consiste à étudier l'impact des changements climatiques sur la demande de transport et ses conséquences sur la réorientation de l'offre de transport. L'action n°3 définit une méthodologie harmonisée pour réaliser les diagnostics de vulnérabilité des infrastructures et des systèmes de transport terrestre, maritime et aérien. Enfin, l'action n°4 cherche à établir un état de la vulnérabilité des réseaux de transport terrestre, maritime et aérien en France métropolitaine et dans les DOM-TOM, et à préparer des stratégies de réponses adaptées et progressives aux problématiques globales et territoriales des

changements climatiques. Le tableau 12 montre les effets des changements climatiques selon l'analyse de la SNCF (Kaddouri, 2012, voir aussi annexe II), tandis que le tableau 13 décrit les risques liés à des températures élevées ou à des canicules et les mesures d'adaptation possibles.

Tableau 14. Mesures possibles d'adaptation à une élévation des températures et à des canicules (Kaddouri, 2012).

| Risque | Impact | Mesures possibles d'adaptation |
|---|---|--|
| Surchauffe de l'air ambiant dans les voitures | Inconfort, voire malaise, du personnel et des passagers | Préparation plus longue des trains Spécifications plus exigeantes du dispositif de climatisation Amélioration de la ventilation (sur le modèle des VMC double flux) Sur les véhicules circulant à vitesse modérée (ex. tramways), ventilation sans climatisation (cf. tramway La Réunion) |
| Altération ou usure prématurée de l'électronique embarquée ou de la signalisation de long des voies | Perte de fiabilité | Maintenance plus fréquente Durcissement des spécifications |
| Surchauffe moteur | Perte de puissance des engins moteurs | Ralentissement de la circulation |
| Sécheresse de la végétation | Feux de talus | Choix d'espèces végétales moins inflammable Coordination préventive avec la sécurité civile |
| | Présence d'animaux aux abords des voies, à la recherche de pâture | Clôtures le long des voies «Chasse-buffles» devant les locomotives |
| Déplacement vers le nord de certains insectes en raison du réchauffement climatique | Invasion de ces insectes dans les voitures (systèmes de ventilation, trains couchettes) | |

4.3.3 Mesures techniques d'adaptation des voies fluviale

L'hydrologie et sa dynamique commandent le transport par voie navigable. À cet égard, les analyses prospectives (étés plus chauds, hivers plus humides) montrent que les changements climatiques pourraient avoir des effets notables sur ce mode de transport, plus spécialement au cours de la seconde moitié du siècle (scénarios correspondant à un futur lointain, c'est-à-dire après 2050) (Turpijn, 2012, voir aussi annexe III et parties 2.3 et 3.5). Ces effets sont essentiellement de faibles débits en été (bassin rhénan moyen, canal Rhin-Meuse-Danube (RMD), Haut Danube) et des débits élevés en hiver. Certains effets positifs sont également établis, notamment en ce qui concerne la diminution possible de la glace. Outre les facteurs environnementaux, certaines évolutions sectorielles (augmentation du tonnage des navires, par exemple) auront pour effet d'accroître la vulnérabilité de la navigation fluviale si les périodes de bas débit (et d'étiage) se multiplient ou se prolongent, mais aussi comporter des coûts pour le changement des écluses. Il a été établi que les coûts de transport augmentent rapidement lorsque les cours d'eau sont à l'étiage, le coût à la tonne/kilomètre étant multiplié par trois lorsque le niveau baisse de 4 à 2 mètres. Lorsque ce niveau tombe à moins de 1,6 m, le transport fluvial devient impossible. Les considérations relatives à l'infrastructure et à une économie autonome des transports sont prépondérantes dans les risques que les changements climatiques font planer sur le transport fluvial (Turpijn, 2012).

4.3.3.1 Effets du climat sur le réseau fluvial et mesures d'adaptation possible

Une coopération internationale est indispensable pour permettre au transport fluvial de se protéger du changement et de la variabilité climatiques au-delà de ce qui est envisagé pour les autres modes de transport, étant donné que les effets du climat sur les cours d'eau ont toujours tendance à se propager en aval. Par conséquent, l'objectif du projet européen ECCONET (7PC), «Effets des changements climatiques sur le réseau des voies fluviales», inauguré en janvier 2010 (voir www.econet.eu) consiste à intégrer le savoir-faire d'une dizaine de partenaires de cinq pays différents dans le domaine des conditions environnementales actuelles et futures (météorologie, hydrologie, etc.), des infrastructures, de l'exploitation, des services et de l'économie, afin d'évaluer les effets des changements climatiques sur le réseau européen de transports, notamment sur le réseau fluvial (Rhin et Danube)²⁰ (voir tableau 15).

Tableau 15. Effets des changements climatiques sur les principales voies navigables de l'Union européenne (Heyndrickx et Breemersch, 2012).

| Phénomène | Période | Rhin moyen | Canal RMD | Haut Danube |
|--------------|-----------|---------------|---------------|---------------|
| Débit faible | 1950-2005 | Effet positif | Aucun effet | Effet positif |
| | 2050 | Aucun effet | Effet inconnu | Effet négatif |
| | 2090-2100 | Effet négatif | Effet négatif | Effet négatif |
| Débit élevé | 1950-2005 | Aucun effet | Aucun effet | Aucun effet |
| | 2050 | Effet négatif | Aucun effet | Aucun effet |
| | 2090-2100 | Effet négatif | Aucun effet | Effet inconnu |
| Glace | 1950-2005 | Effet positif | Effet positif | Effet positif |
| | 2050 | Aucun effet | Effet positif | Effet positif |
| | 2090-2100 | Aucun effet | Effet positif | Effet positif |
| Visibilité | 1950-2005 | Effet positif | Effet positif | Effet positif |
| | 2050 | Effet inconnu | Effet inconnu | Effet inconnu |
| | 2090-2100 | Effet inconnu | Effet inconnu | Effet inconnu |

Sur les voies navigables, l'étiage peut avoir des coûts importants. Pour le Rhin (voir Heyndrickx et Breemersch, 2012, et l'annexe II), il a été démontré que les coûts de transport augmentaient rapidement lorsque le niveau de l'eau était bas dans les cours d'eau, le coût à la tonne/kilomètre étant multiplié par trois lorsque le niveau passait de 4 à 2 mètres. Lorsque ce niveau tombe à moins de 1,6 m, le transport fluvial devient impossible. Les principales conséquences des basses eaux ou de la sécheresse sont de mauvaises conditions de navigation, une augmentation des accidents (échouages), une consommation accrue de carburant par tonne et par kilomètre, une faible vitesse du courant et une sédimentation accrue. Par ailleurs, les hautes eaux ou les crues, même si elles ne durent pas longtemps, peuvent entraîner un arrêt de la navigation, modifier la morphologie des cours d'eau, les schémas de sédimentation, entraîner un envasement et provoquer des dégâts sur les chemins de halage, les berges et les systèmes de protection. Enfin, la présence de glace dans les voies navigables peut aussi entraîner l'arrêt de la navigation, rendre le fonctionnement des écluses difficile et endommager les systèmes de signalisation (Heyndrickx et Breemersch, 2012; Siedl, 2012).

²⁰ Certains des principaux cours d'eau navigables se trouvent sur le territoire de l'Union européenne. La Stratégie de l'UE relative à l'adaptation aux changements climatiques d'avril 2013 pourrait offrir un cadre pour l'adaptation des infrastructures de transport intérieur, y compris des voies et des ports de navigation fluviale. <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2013:0216:FIN:FR:PDF>. Voir aussi Lochman (2012).

Les mesures d'adaptation proposées ont trait à: (i) l'adaptation de la flotte e (introduction de superstructures légères, volets amovibles, caissons latéraux, coques plates, voir tableau 16 et figure 57); (ii) l'infrastructure (information, dragage, génie fluvial, voir figure 58); (iii) l'amélioration des prévisions (tendances et prévisions hydrographiques); (iv) la logistique (couplage de convois, coopération avec d'autres modes de transport). Une première évaluation indique que les mesures les plus prometteuses sont celles qui concernent les coques plates (pousseurs à hélices multiples), l'adaptation des navires de faible tonnage à un fonctionnement en continu et le recours au couplage des convois (voir aussi annexe II).

Tableau 16. Mesures d'adaptation de la flotte et évaluation préalable (Heyndrickx et Breemersch, 2012)

| | Mesure | Premier effet | Évaluation préliminaire |
|----|---|---|--|
| A1 | Structure légère | Réduction du poids du navire, d'où une diminution du tirant d'eau | Poursuite des recherches pour trouver des solutions techniques |
| A2 | Volets amovibles | Navigation en conditions d'étiage | Voir A1 |
| A3 | Caissons latéraux | Gain compris entre 115 et 260 tonnes de charge utile | Mesure théorique, difficile à mettre en œuvre dans la pratique |
| A4 | Coques plates (pousseurs à hélices multiples) | Diminution du tirant d'eau de 1,7 à 1,4 mètre | Démarche prometteuse, en particulier pour les pousseurs, malgré un coût de construction plus important |
| B1 | Navires de faible tonnage plutôt que de gros tonnage | Les navires de faible tonnage sont moins sensibles au niveau de l'eau | Pas d'économies d'échelle |
| B2 | Modernisation des navires de faible tonnage pour permettre un fonctionnement en continu | Performance accrue | Mesure prometteuse |
| B3 | Couplage des convois | Redistribution de la charge | Solution prometteuse en raison des économies d'échelle possibles |
| C1 | Alliance stratégique entre le transport fluvial et d'autres modes de transport | Coopération avec d'autres modes de transport | Difficulté liée aux limites physiques et financières du rai |

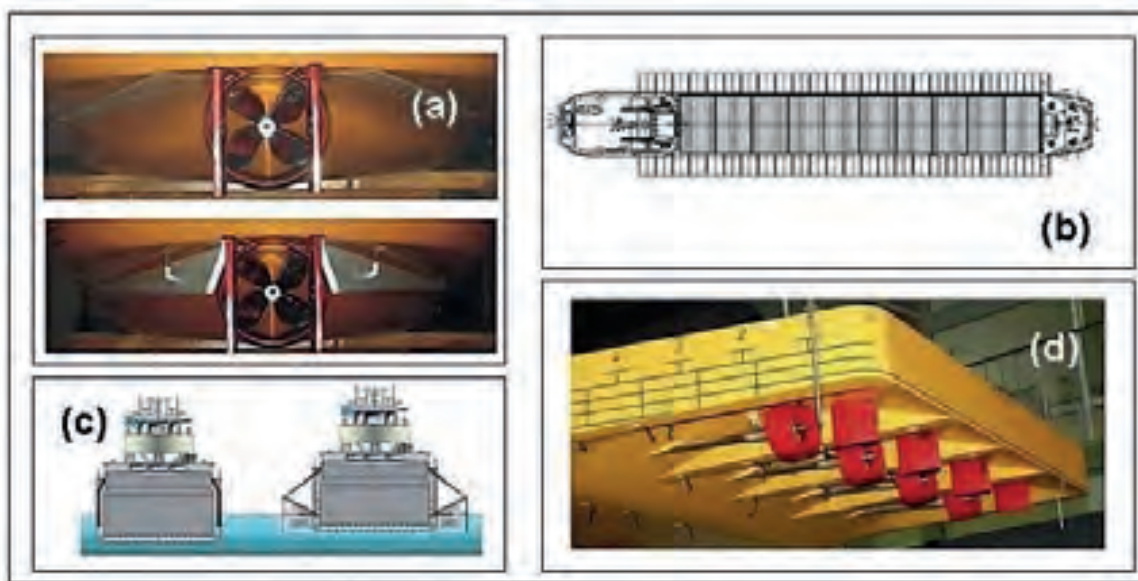


Figure 57. Mesures d'adaptation pour la flotte de navigation intérieure (Heyndrickx et Breemersch 2012): a) Volets amovibles qui se replient sous la coque en cas d'utilisation de tout le tirant d'eau, pour la navigation en eau profonde (image du haut) et qui se déplient lorsque le bateau navigue en eaux peu profondes (image du bas); (b) vue verticale d'un bateau équipé de caissons latéraux de flottaison; (c) Coupe transversale d'un navire fluvial équipé d'éléments latéraux extractibles de flottaison; (d) vue rapprochée des éléments de flottaison

En ce qui concerne les effets des changements climatiques sur la morphologie des cours d'eau, les lits des cours d'eau continueront de se dégrader si rien n'est fait et de nouvelles mesures de géomorphologie s'imposeront, ainsi que de meilleures pratiques de gestion fluviale (voir figure 58). On estime que les coûts de l'adaptation de l'infrastructure à la dégradation des lits sont du même ordre que les coûts à prévoir pour remédier à leur érosion (Turpjin, 2012).

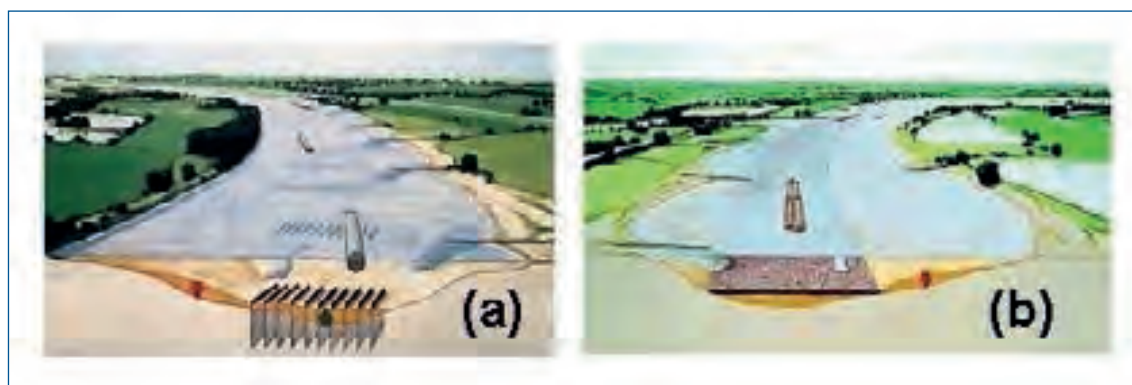


Figure 58. La dégradation du lit des cours d'eau peut avoir des conséquences importantes sur la navigation, en particulier sur les ouvrages de consolidation du fonds. Les solutions techniques peuvent être (a) des vannes de fond ou (b) des radiers (Turpjin, 2012). Dans ces cas, il convient d'envisager des travaux de réaménagement ou de rééquipement.

Un exemple d'adaptation de l'infrastructure de navigation intérieure (projet pilote Witzelsdorf, voir Siedl (2012)) a montré que les ouvrages d'art devaient sans doute être adaptés. Dans ce cas, les anciens épis ont été retirés et remplacés par de nouveaux épis de conception plus perfectionnée (figure 59) et les berges restaurées; ce dispositif a amélioré le débit et réduit l'affouillement au niveau des têtes d'épis.



Figure 59. Mesures d'ingénierie fluviale utilisées dans le projet pilote de Witzelsdorf (Siedl, 2012). Les anciens épis (en jaune) sont remplacés par des épis mieux conçus afin de modifier l'écoulement de l'eau et la dynamique de formation de sédiments.

Concernant la gestion intégrée des voies navigables, la même étude a fait valoir que les voies navigables devaient faire l'objet de cycles d'entretien des chenaux prévoyant les mesures suivantes: (i) une surveillance régulière du cours d'eau par bathymétrie; (ii) un dragage en temps opportun qui tienne compte des processus naturels (sans retrait de gravier pendant la saison du frai); (iii) information en ligne sur la bathymétrie et le débit à l'intention des usagers. Ce type de gestion devrait permettre le maintien des chenaux en conformité avec les paramètres convenus au niveau international et les mesures d'adaptation à court, moyen et long terme.

Les parties suivantes donnent un aperçu de certains plans nationaux d'adaptation.

4.3.3.2 États-Unis

Les États-Unis comptent environ 40 000 kilomètres de voies navigables commerciales. Dans le cadre du réseau international des voies fluviales, la Saint Lawrence Seaway Development Cooperation (SLSDC) a travaillé sur un plan d'adaptation aux changements climatiques qui intégrera cette question au fonctionnement et aux services de la compagnie. Le plan prévoit la coordination de projets d'adaptation avec des organismes partenaires en vue d'une coopération intégrée avec le réseau canadien de la voie maritime du Saint-Laurent (Ministère américain des transports, 2012b).

Un examen des systèmes mécaniques, électriques et hydrauliques des écluses a permis de constater qu'il faudrait effectuer certaines modifications afin de protéger ces systèmes en cas de niveau très élevé ou très bas de l'eau. Le programme de renouvellement des actifs de la SLSDC prévoit de renouveler tous les éléments essentiels du réseau pour les protéger de conditions climatiques extrêmes, notamment grâce à des systèmes d'évacuation de la glace, des équipements spéciaux de verrouillage hydraulique, des systèmes de chauffage en cas de grand froid et des systèmes d'évacuation de l'eau en cas d'inondation (Ministère américain des transports, 2012b).

4.3.3.3 Canada

Les mesures d'adaptation portent principalement sur les écluses (voir aussi la section 4.5.2). Le changement et la variabilité climatiques se répercuteront sur ces équipements, des écluses plus profondes et plus larges étant nécessaires en cas de très hautes eaux; une

autre solution pour le réseau des Grands Lacs et de la voie maritime du Saint-Laurent serait d'investir dans des navires à moindre tirant d'eau. Le dragage est une méthode largement utilisée à l'heure actuelle en cas de très basses eaux et de sécheresse; cependant, il faudra sans doute en modifier la fréquence et l'intensité sous l'effet des changements climatiques, ce qui pourrait se traduire par des coûts financiers et environnementaux plus élevés (CCIADC, 2004).

4.3.3.4 Pays-Bas

Les résultats de deux programmes de recherche - «Effets des changements climatiques sur le transport fluvial et la compétitivité du port de Rotterdam» (2011) et «Protéger les Pays-Bas contre les crues et assurer un approvisionnement suffisant des usagers en eau douce» (2014) - donnent des informations sur les effets des changements climatiques sur les voies navigables intérieures. Ces études ont montré que les principaux effets étaient une restriction de la capacité de charge et une majoration des coûts de transport, mais ces effets seraient relativement modérés jusqu'en 2050 (Turpjin, 2012; voir aussi annexe III.7).

4.3.4 Mesures techniques d'adaptation des ports maritimes

Le transport maritime a toujours beaucoup contribué à la croissance économique et représente une source importante de revenus et d'emplois. Par exemple, 80 % des échanges commerciaux internationaux de l'UE se font par voie maritime, tandis que le cabotage compte pour 40 % environ dans le transport des marchandises au sein de l'Union européenne; par ailleurs, 400 millions de passagers transitent chaque année par les ports de l'UE, le transport maritime représentant une activité essentielle pour les îles et les régions périphériques (http://ec.europa.eu/transport/modes/maritime/index_en.htm). Soutenu par une forte croissance du trafic de conteneurs et de vrac sec en 2011, le transport maritime mondial a progressé cette année-là d'environ 4 %, ce qui a porté le volume total de marchandises chargées au niveau mondial à 8,7 milliards de tonnes (CNUCED, 2012). Par conséquent, des orientations appropriées sont nécessaires pour garantir l'efficacité constante du réseau de transports maritimes et sa contribution à l'économie mondiale (Asariotis et Benamara, 2012).

Les ports maritimes risquent de subir les effets des changements climatiques de plein fouet (voir partie 2.1). Malgré la dimension intrinsèquement internationale du transport maritime (voir figure 16), l'évaluation des risques et les mesures d'adaptation correspondantes sont de questions qui commencent tout juste à être intégrées au débat sur les orientations du transport international²¹. Parmi les actions notables qui ont été prises à cet égard, il convient de citer une enquête auprès des ports maritimes du monde entier réalisée par l'Association internationale des ports (AIP) et l'Association américaine des autorités portuaires (AAPA). Ces organisations professionnelles ont interrogé leurs membres sur la façon dont les changements climatiques se répercuteraient sur le fonctionnement des ports, mais aussi sur les modifications du niveau de la mer qui pourraient susciter des problèmes de fonctionnement et sur la façon dont les ports prévoient de s'adapter à la nouvelle situation (AIP/AAPA, 2010). Les résultats de l'enquête montrent que les autorités portuaires s'inquiètent, certes, des effets des changements climatiques, mais que, en règle générale, elles estiment que la communauté scientifique devrait fournir des informations plus précises qui leur permettraient de prendre des décisions éclairées. Fait intéressant,

²¹ Ainsi, la résilience face aux changements climatiques n'est pas évoquée dans les objectifs stratégiques et les recommandations concernant la politique du transport maritime de l'UE jusqu'en 2018 (Commission européenne, 2013). En revanche, les mesures d'atténuation des changements climatiques portant sur les émissions dues aux transports maritimes sont souvent prises en considération (directive 2012/33/UE concernant la teneur en soufre des combustibles marins).

alors que la grande majorité des ports considère que l'adaptation aux changements climatiques est un problème que les autorités portuaires doivent s'employer à résoudre, 34 % seulement des autorités portuaires ayant répondu s'estiment suffisamment informées sur les changements climatiques et leurs conséquences pour les ports (Inoue, 2012; Becker, 2012).

Dans la moitié des cas environ, les ports ayant participé à l'enquête ont signalé que certaines mesures avaient été prises pour faire face aux effets des changements climatiques. Toutefois, bien que la durée de vie théorique de nombreux équipements soit d'une cinquantaine d'années, ce qui s'inscrit tout à fait dans l'horizon de nombreux scénarios liés aux changements climatiques, les cycles de planification sont généralement de cinq à dix ans. En outre, la communauté scientifique n'a pas encore pu fournir d'informations sur les changements climatiques à l'échelle locale, qui sont pourtant nécessaires pour la planification portuaire. Ainsi, il n'existe pas encore de prévisions fiables sur l'élévation du niveau de la mer pour un certain nombre de ports et de zones littorales, comme c'est le cas pour le régime et l'intensité des ondes de tempête locales. Il est donc difficile de prendre des décisions d'investissement en raison des incertitudes relatives à certains phénomènes climatiques précis sur une longue échelle de temps. Les résultats de l'enquête montrent que, globalement, la plupart des ports n'en sont encore qu'aux premières étapes de leur réflexion sur l'adaptation aux changements climatiques. Par conséquent, la communauté scientifique a encore beaucoup à faire pour mobiliser le secteur des ports maritimes en vue de promouvoir la résilience et l'efficacité pour le siècle à venir.

Les ports ne cessent de se développer²². Ainsi, environ la moitié des autorités portuaires ayant répondu à l'enquête déclare que de grands projets d'infrastructure seront terminés dans dix ans, et 75 % d'entre elles affirment que ces projets tiennent compte de l'éventualité d'une tempête décennale. Étant donné qu'il s'agit de projets à grande échelle, d'une durée de vie de plusieurs dizaines d'années, ces critères ne semblent pas adaptés étant donné que les changements climatiques risquent de réduire la période de récurrence de la tempête décennale (voir aussi la section 1.3). Ces résultats mettent en évidence l'une des difficultés les plus importantes de la planification en vue des changements climatiques. Étant donné que l'horizon de planification des équipements est court par rapport aux prévisions les plus largement admises d'élévation du niveau de la mer, les projets prévus tiennent rarement compte de ce dernier paramètre. Toutefois, des stratégies supplémentaires pourraient être élaborées, sans compliquer inutilement ou empêcher toute planification future d'adaptation aux changements climatiques.

Seul un pourcentage réduit de ports semble avoir des projets en préparation, comme de nouvelles digues ou des ouvrages de défense contre les tempêtes, afin de renforcer la protection contre les inondations et les dégâts dus aux vagues (voir aussi figure 59). Il convient toutefois de noter que les risques liés aux futurs changements climatiques ne sont pas fondamentalement différents de ceux qui existaient par le passé, mais le niveau de risque va probablement augmenter.

L'administration maritime américaine (MARAD - United States of America Maritime Administration) prévoit d'intégrer, d'ici à la fin de 2013, la question de l'adaptation aux changements climatiques à ses procédures d'examen interne, en particulier en ce qui concerne les projets d'infrastructure, les évaluations en vue des demandes de subventions

²² Les ports sont des nœuds essentiels de transport. Une des mesures concrètes préconisées dans le Livre Blanc de l'UE (action 4) en faveur de la création d'un système de transports concurrentiel et économe en ressources à l'horizon 2020-2030 serait d'intégrer 82 grands ports de l'UE au réseau transeuropéen de transport (RTE-T) d'ici à 2030 (http://ec.europa.eu/governance/impact/planned_ja/docs/2013_move_016_future_eu_ports_policy_en.pdf).

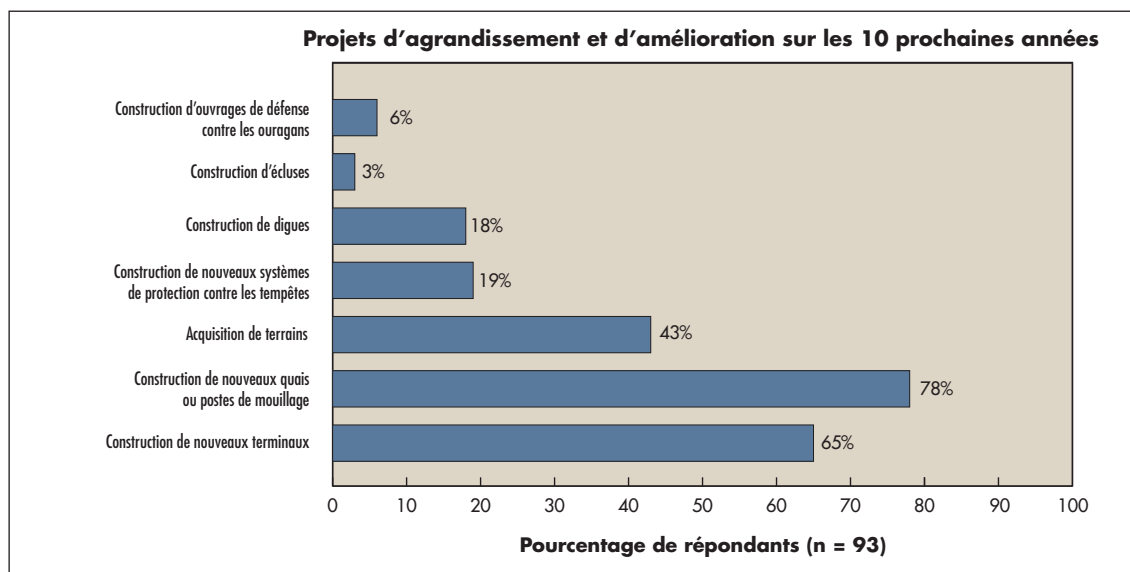


Figure 60. Projets de protection et d'agrandissement des ports (AIP, 2010; Becker, 2012)

pour les chantiers navals et les modifications des installations. La MARAD a également démarré une campagne de sensibilisation qui incite les parties prenantes à tenir compte des changements climatiques dans leur travail de réflexion (Ministère américain des transports, 2012b). Une étude récente menée en Australie (McEvoy et Mullett, 2013) a mis l'accent sur les critères permettant d'évaluer la résilience des ports maritimes face aux changements climatiques. La procédure d'évaluation a été divisée en six étapes, l'étape 0 correspondant à la mise en place et à l'appui administratif, l'étape 1 à la définition du contexte portuaire, l'étape 2 à l'identification des facteurs de vulnérabilité actuels et des risques à venir, l'étape 3 à l'analyse et à l'évaluation des risques, l'étape 4 à l'identification et à la hiérarchisation des options envisageables en matière d'adaptation et l'étape 5 au suivi et à l'évaluation des mesures d'adaptation.

Dans cette étude, plusieurs mesures d'adaptation innovantes ont été identifiées, qui permettent d'améliorer la chaîne logistique, de mieux gérer les cycles de vie des infrastructures et de réduire les risques possibles en plus de renforcer la résilience aux changements climatiques. L'étude a révélé que le développement de la capacité d'adaptation passait par l'aptitude de l'organisation à réagir rapidement aux difficultés dans ce domaine, aptitude qui pouvait être développée grâce à des campagnes de sensibilisation, au développement des compétences, à la collecte de données et au suivi et à la recherche. L'étude a aussi montré que les actions en vue de l'adaptation passent par des mesures pratiques qui réduisent la vulnérabilité vis-à-vis des risques climatiques ou qui permettent de trouver de nouveaux débouchés. Il s'agit notamment de changements au niveau des techniques, de la conception et de l'entretien, de la planification, des assurances et de la gestion du changement (voir tableau 16). D'autres études insistent plutôt sur la nécessité de prendre des mesures concrètes, comme de réduire la charge exercée par le vent en construisant des murs le long des quais ou en empilant des conteneurs. Il a été constaté que tels empilements, lorsqu'ils atteignent de 13 m à 15 m de hauteur, peuvent réduire la vitesse du vent de 25 % et la charge exercée par le vent jusqu'à 30 % (Paulauskas et al., 2009).

Effets des changements climatiques et adaptation à ces changements dans les réseaux de transport internationaux

Une adaptation efficace des ports maritimes doit passer par des recherches détaillées et à petite échelle sur les risques liés aux changements climatiques (élévation du niveau de la mer à long et à court terme, modifications du régime des vagues pouvant entraîner la pénétration de vagues longues dans les ports et modifier l'écoulement et le mouvement des matériaux) (Becker et al., 2013). De telles recherches mobilisent des moyens humains et financiers importants. Il pourrait être intéressant de réaliser un certain nombre d'études de cas (Stenek et al., 2011) qui donneraient des indications sur le meilleur moyen d'évaluer les effets et les possibilités d'adaptation.

Tableau 17. Stratégies d'adaptation des ports australiens (d'après McEvoy et Mullett, 2013)

| Type d'action | Action d'adaptation |
|-------------------------|---|
| Technologie | Investissement ciblé sur certaines technologies (permettant par exemple un fonctionnement en toute sécurité des grues en cas de fortes rafales de vent) |
| | Spécifications applicable aux entrepôts frigorifique en fonction de températures plus élevées et permettant un fonctionnement des équipements plus économique en énergie |
| | Utilisation d'énergies renouvelables ou peu polluantes pour éviter toute coupure de l'alimentation et une augmentation des coûts de l'énergie. Ces solutions sont déjà mises en œuvre par exemple dans les piles à combustible utilisées dans les éléments logistiques mobiles, les systèmes de refroidissement des cargaisons réfrigérées et les cellules photovoltaïques des bâtiments |
| | Automatisation des procédures logistiques |
| Ingénierie | Évaluation de l'achat de certains actifs (portiques de chargement, tapis roulants, grues de quai) en fonction des besoins futurs d'exploitation |
| | Mise à niveau des installations de stockage en vue des phénomènes extrêmes à venir |
| | Examen et adaptation des systèmes d'évacuation des eaux pluviales en prévision de précipitations plus intenses |
| | Surveillance hydrographique continue pour déterminer les besoins de dragage |
| | Systèmes (de dépoussiérage, par exemple) plus solides en prévision de vents plus violents |
| | Relèvement ou réagencement des brise-lames pour faire face à une montée du niveau de la mer et à des vagues plus hautes |
| | Élévation des chaussées et des voies ferrées desservant les ports en prévision des inondations |
| Conception et entretien | Incitation aux nécessaires changements de modes de transport afin de renforcer la résilience en supprimant les éléments redondants dans la chaîne d'approvisionnement |
| | Prise en compte des changements climatiques (élévation du niveau de la mer ou ondes de tempête plus importantes) dans les spécifications futures de toutes les composantes de l'infrastructure portuaire |
| | Plan prévisionnel de gestion des actifs et des infrastructures portuaires tenant compte de la durée de vie des actifs |
| | Établissement de partenariats avec les municipalités et des prestataires en logistique en vue de planifier et de concevoir des plateformes logistiques interconnectées et résilientes face aux changements climatiques régionaux |
| | Réflexion sur la diversification des échanges commerciaux en faveur de produits résilients face aux changements climatiques |
| Assurance | Collaboration avec le secteur de l'assurance sur la quantification de risques, afin de garantir les risques ne pouvant être réduits de façon efficace |
| Gestion | Introduction progressive des considérations liées aux changements climatiques dans les systèmes de gestion de l'environnement, des situations d'urgence et des risques par la mise à jour des éléments liés aux orientations, l'intégration de modules sur les effets des changements climatiques aux programmes de formation, la réflexion sur les stratégies et les systèmes de mesure adéquats et la mise à jour périodique des éléments de mise en conformité |
| | Élaboration de plans de lutte en cas de catastrophe à grande échelle dans le cadre du système de préparation et de réaction aux situations d'urgence |

Un certain nombre de ports ont d'ores et déjà pris des mesures en prévision de l'adaptation. Ainsi, le port de Rotterdam (Pays-Bas) a élaboré, en collaboration avec d'autres parties prenantes, un programme d'adaptation aux changements climatiques dont l'objectif est de protéger «intégralement» le port des effets de ces changements à l'horizon 2025 (Rotterdam Climate Initiative, 2013). La stratégie d'adaptation a principalement porté sur la sécurité en cas d'inondation, l'accessibilité des navires, l'adaptation des constructions et la gestion municipale de l'eau. Les nouveaux aménagements portuaires sont conçus pour résister aux changements climatiques et des évaluations dans ce domaine, ainsi que les connaissances acquises sur la question, sont intégrées à la planification de l'aménagement du port (Vellinga et De Jong, 2012). Le port de San Diego (Californie) a élaboré un plan d'atténuation des changements climatiques et d'adaptation à ces derniers en collaboration avec les collectivités locales voisines, avec lesquelles il partage les responsabilités concernant les mesures d'urgence, la protection des services collectifs et l'évacuation des eaux de ruissellement (Port de San Diego, 2013; Messner et Moran, 2013). La méthode retenue comprend un cadre d'évaluation des risques qui décrit la probabilité et les conséquences des impacts. Les études et les initiatives qui viennent d'être décrites montrent que les ports et les zones portuaires ont su mettre en œuvre des logiques intégrées et collaboratives face aux changements climatiques. Quoi qu'il en soit, il reste encore beaucoup à faire et des démarches différentes devront être imaginées et testées afin de répondre à la diversité des situations auxquelles les ports sont confrontés dans le monde (Becker et al., 2013).

4.4. Résumé et analyse

L'exposé qui précède montre que l'adaptation aux effets des changements climatiques et de la variabilité du climat dans les transports commence tout juste à être abordée dans les débats sur la politique des transports au niveau international. Alors qu'un certain nombre d'études sur les effets des changements climatiques sur les transports et les exigences d'adaptation ont été entreprises et que des mesures et des projets d'adaptation sont mis en œuvre ou sont prévus par les autorités publiques et les exploitants de ports dans divers pays, des efforts importants doivent encore être déployés pour mieux comprendre les principaux problèmes auxquels seront confrontés les transports dans la perspective des changements climatiques. La plupart des initiatives de recherche existantes suivent une démarche modale, mais certains éléments laissent entrevoir une approche plus intégrée pour l'avenir²³. Parallèlement, il semblerait qu'à ce jour, les initiatives ont été rares pour résoudre le problème de la résilience des réseaux de transport internationaux²⁴ à l'échelon régional et mondial.

Le changement et la variabilité climatiques se répercutent sur la sécurité et le fonctionnement du réseau routier, mais aussi sur l'entretien de l'infrastructure et des équipements routiers. Ces effets peuvent être directs (dégradation de la chaussée, déformation, affaissements et glissements de terrain, problèmes d'accès dus aux inondations et à l'érosion) ou indirects (économiques, liées à l'environnement, démographiques, d'aménagement). Chacun de ces effets nécessite des mesures d'adaptation techniques et opérationnelles différentes, notamment la définition de nouveaux seuils thermiques pour la chaussée routière et les joints de dilatation des ponts, le renforcement des bernes des talus de remblai des routes, l'intégration d'armatures métalliques à la structure de la chaussée et l'élévation des chaussées, des ponts et des tunnels au-dessus du niveau des hautes eaux.

²³ Voir par exemple l'étude sur la côte du golfe du Mexique (annexe I.13).

²⁴ Les réseaux de transport sont des actifs de très grande valeur. Ainsi, le réseau routier britannique a été estimé en 2005 comme étant l'actif le plus onéreux du Royaume-Uni, la valeur des principales routes à grande circulation et des autoroutes ayant été estimée à environ 62 milliards de livres sterling (Hooper et Chapman, 2012).

L'intégration des effets des changements climatiques à la conception et à l'exploitation des routes comprend une évaluation de l'exposition, de la vulnérabilité et de la résilience des routes, l'élaboration de calendriers et la formulation de stratégies d'adaptation.

Les changements climatiques perturbent déjà le secteur ferroviaire dans différentes régions et les effets des canicules, des inondations et de vents forts devraient encore s'accroître à l'avenir. Des précipitations importantes et des inondations risquent de saper les ouvrages de terrassement et de mettre à rude épreuve les systèmes d'évacuation des eaux pluviales, tandis que les vents violents pourraient endommager les caténaires. Des études réalisées dans plusieurs pays, dont celles évoquées plus haut, semblent avoir pour dénominateur commun la façon de gérer les effets des changements climatiques pour le rail. En effet, au cœur des stratégies d'adaptation, on retrouve la nécessité de renforcer la résilience des infrastructures par la mise en place de garde-fous permettant le rétablissement rapide des équipements ferroviaires en cas de phénomènes météorologiques extrêmes. Le développement de nouvelles infrastructures ferroviaires semble privilégier les innovations techniques de construction et les modifications dans les procédures opérationnelles qui visent à intégrer les effets prévus des changements climatiques.

L'hydrologie des cours d'eau et sa dynamique régissent le transport fluvial. Les considérations relatives aux infrastructures et à l'économie du transport fluvial dominent le débat sur l'adaptation de ce secteur aux changements climatiques. En Europe, selon les projections, ces derniers devraient produire des effets importants après 2050 essentiellement, principalement sous la forme de faibles débits en été et de débits élevés en hiver. Les mesures proposées portent principalement sur une adaptation de la flotte et la surveillance ou le réaménagement du lit des cours d'eau et des canaux. Par ailleurs, les mesures d'adaptation en Amérique du Nord sont axées sur les écluses de la voie maritime Grands Lacs-Saint Laurent, qui devraient être considérablement touchées par les changements climatiques.

Les ports maritimes risquent de subir les effets des changements climatiques de plein fouet étant donné qu'on les trouve sur les côtes, les zones peu élevées et les deltas des fleuves, mais aussi en raison de la forte valeur de leurs infrastructures et du fait qu'ils concentrent des activités économiques (voir partie 2.1). Toutefois, l'évaluation des risques et les mesures d'adaptation correspondantes ne sont pas encore au cœur du débat sur les orientations du transport international. Les résultats d'enquêtes menées par les organisations professionnelles (comme l'AIP) montrent que les ports risquent d'être particulièrement touchés par les changements climatiques. Quoi qu'il en soit, les exploitants semblent penser que des recherches supplémentaires et plus détaillées sont nécessaires afin de planifier la résilience des ports et d'investir de façon efficace dans ce domaine.

En ce qui concerne les réseaux internationaux de transport, le tour d'horizon effectué dans le présent rapport montre que des réseaux efficaces, intégrés et multimodaux sont indispensables pour faciliter une circulation efficace, sûre et rapide des personnes et des biens. Toutefois, à ce jour, rares sont les efforts conjoints à avoir été entrepris pour évaluer les effets et l'adaptation nécessaires, au niveau international, face au changement et à la variabilité climatiques (voir Commission européenne, 2012). Bien qu'un tel exercice comporte des difficultés, comme l'importante variation du climat dans l'espace et dans le temps, des contextes administratifs et techniques très variés, des contraintes financières très différentes, mais aussi des informations pertinentes en nombre limité (le «paradoxe des données», cf. Potter, 2012), les stratégies en faveur d'un transport international durable devraient intégrer les effets des changements et de la variabilité climatiques sur les infrastructures et le fonctionnement du transport international et des mesures d'adaptation efficaces devraient également être prévues.

En vue de créer un réseau global de transport international dans la région de la CEE, les États membres, les responsables chargés du développement et de la gestion des infrastructures ainsi que les autres parties prenantes devraient prêter une attention particulière aux mesures nécessaires pour: (i) ouvrir les dessertes manquantes et supprimer les goulets d'étranglement; (ii) éliminer les obstacles administratifs et techniques à l'interopérabilité du réseau, ce qui garantit une intégration optimale des modes de transport et l'accès de l'ensemble de la région à ces derniers; (iii) mettre en service des systèmes intelligents pour la gestion du trafic, la programmation multimodale, les services de suivi et de repérage, la planification des capacités et les services de réservation et de billetterie intégrés en ligne; (iv) garantir les meilleures performances environnementales ou un impact minime sur l'environnement, la qualité des services et des plans de circulation efficaces (v) promouvoir un développement technique à la pointe du progrès, qui accroîtra la sécurité énergétique et réduira les émissions de carbone; (vi) maintenir et améliorer la qualité des infrastructures pour ce qui touche à l'efficacité, à la sécurité et à la résilience aux changements climatiques et aux catastrophes.

Pour la région de la CEE, il semblerait que la résilience aux changements climatiques nécessite tout d'abord de cartographier dans le détail les réseaux et les corridors de transport international existants et prévus, comme ceux qui relèvent du programme RTE-T (voir http://ec.europa.eu/transport/themes/infrastructure/index_en.htm). En outre, il est nécessaire d'identifier les nœuds de transport essentiels et d'évaluer leur sensibilité à différentes manifestations des changements climatiques, en fonction du lieu et du scénario climatique. Cet exercice éclairera les décisions, non seulement pour ce qui touche aux actions prioritaires et aux normes de conception, mais aussi pour ce qui concerne la modalité et la transition vers les modes de transport les plus durables, les plus économes en énergie et les plus résilients aux changements climatiques.



Ville de Baja, inondation du Danube (Hongrie), 2013. Photographie de M. Otto Michna

Chapitre 5. Conclusions et recommandations

5.1. Introduction

Bien que les gouvernements et les organisations internationales se préoccupent depuis quelque temps déjà des effets des changements climatiques sur diverses activités humaines, on s'est relativement peu intéressé jusqu'à présent à leurs effets sur les réseaux de transport internationaux et aux éventuelles mesures d'adaptation à prendre pour y faire face. Il convient toutefois de noter que les Parties à la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC) se sont engagées à agir pour s'adapter aux changements climatiques (anthropiques). L'adaptation a été de plus en plus débattue au sein des organes de la CCNUCC et des décisions pertinentes ont été prises. Il convient également de noter que la communauté internationale a constaté que des informations et des services climatologiques appropriés n'étaient pas toujours disponibles. Pour combler cette lacune, les gouvernements ont décidé, dans une décision adoptée lors d'une session extraordinaire du Congrès météorologique mondial, de mettre en place un Cadre mondial pour les services météorologiques (CMSC), sous la houlette de l'OMM. Cela étant, des études récentes menées au niveau national et, dans quelques cas, au niveau supranational, ainsi que par le secteur des transports, ont révélé que les conditions météorologiques induites par les changements climatiques pouvaient avoir des conséquences importantes pour l'infrastructure des réseaux de transport internationaux et, partant, pour le fonctionnement de l'économie mondiale et régionale, ainsi que pour les moyens de subsistance des populations. Au vu de ces constatations, des stratégies intégrées ont commencé à apparaître récemment aux niveaux national et supranational, comme par exemple, en avril 2013, la stratégie de l'UE relative à l'adaptation aux changements climatiques, destinée à rendre l'Union européenne plus résiliente en la matière; en ce qui concerne le secteur des transports, la stratégie met l'accent sur l'évaluation des coûts, des avantages et des effets des mesures d'adaptation, sur le renforcement des connaissances, sur la promotion de normes et de directives, ainsi que sur le recensement et la mise en commun des meilleures pratiques.

Conscients de la nécessité d'une action concertée, des experts venus de divers pays, organisations internationales et universités ont créé sous les auspices de la Commission économique pour l'Europe le Groupe d'experts chargés d'étudier les effets des changements climatiques et l'adaptation à ces changements dans les réseaux de transport internationaux. Ce groupe s'est réuni six fois et a: a) examiné les informations concernant la région de la CEE et au-delà, et analysé les effets éventuels des changements climatiques sur les infrastructures et services de transport internationaux qui composent l'ensemble de la chaîne d'approvisionnement; b) collecté et analysé des informations concernant le niveau de sensibilisation et de préparation, la disponibilité des informations et des outils pertinents, les politiques d'adaptation, mesures et initiatives existantes et en projet, les besoins en matière de recherche et de financement, ainsi que les mécanismes de collaboration aux niveaux national, régional et international; c) passé en revue les initiatives, études de cas et projets nationaux de recherche pertinents; d) partagé des expériences en matière de mesures d'adaptation propres à tel ou tel mode susceptible d'atténuer la vulnérabilité des réseaux de transport; e) recensé les meilleures pratiques concernant les politiques nationales, la gestion des risques et les stratégies permettant de renforcer la résilience des réseaux de transport; f) reconnu la nécessité d'une sensibilisation accrue à la nécessité d'évaluer les

effets des changements climatiques et des mesures d'adaptation; g) évalué la contribution de l'adaptation aux changements climatiques à l'élaboration de directives plus larges et de meilleures pratiques dans le secteur des transports.

5.2. Tendances, projections et effets des changements climatiques

5.2.1 Tendances et projections

L'évolution climatique actuelle et les prévisions pour l'avenir laissent clairement présager une augmentation à long terme de la température moyenne ambiante. Les caractéristiques des précipitations changent également, mais de manière plus complexe, certaines régions devenant plus humides et d'autres plus sèches, tendances qui devraient se maintenir voire s'accroître à l'avenir. On peut aussi observer une tendance (non uniforme) à la diminution du manteau neigeux. L'augmentation de la température a pour effet d'entraîner une élévation générale du niveau des mers en raison de la dilatation thermique des océans, de la fonte des glaces du Groenland, de l'Antarctique, des glaciers et des calottes glaciaires, ainsi que des changements dans les réserves d'eau terrestres. Depuis 1860, le niveau des mers s'est élevé d'environ 0,2 m, alors que les observations recueillies par satellites indiquent une accélération progressive de cette élévation depuis les années 1990.

Les changements climatiques peuvent aussi entraîner des fluctuations dans la fréquence, l'intensité, l'étendue, la durée et la périodicité des phénomènes météorologiques et climatiques extrêmes, qui sont susceptibles d'avoir à leur tour des répercussions sur le climat. Les phénomènes extrêmes tels que tempêtes, ondes de tempêtes, inondations, sécheresses et vagues de chaleur, ainsi que les changements qui surviennent au sein de systèmes climatiques particuliers, comme les moussons, peuvent avoir, à de plus petites échelles spatio-temporelles, des effets plus graves sur les réseaux de transport que les changements au niveau des variables moyennes. L'une des tendances les plus marquées est la fréquence et l'intensité croissantes des fortes précipitations. Les modèles climatiques prévoient que cette tendance perdurera et que les fortes précipitations qui se produisent actuellement tous les vingt ans environ devraient se produire à des intervalles compris entre quatre et quinze ans d'ici à 2100 selon les endroits.

Les inondations provoquées par les crues constituent également un réel danger, en particulier en Europe centrale et orientale ainsi qu'en Asie centrale. Toutefois, ces tendances sont plus facilement mesurées aux échelons régional et local. Par ailleurs, tout semble indiquer également une augmentation de la fréquence et de l'intensité des vagues de chaleur, c'est-à-dire des périodes prolongées de temps anormalement chaud. Les vagues de chaleur sont souvent associées à des périodes de sécheresse intense, qui tendent à devenir plus graves dans certaines régions.

On considère que l'une des causes principales des hausses de température observées est l'augmentation des concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère (vapeur d'eau, monoxyde de carbone (CO₂), méthane (CH₄) et protoxyde d'azote (N₂O)). Les gaz à effet de serre absorbent la chaleur réfléchiée par la surface de la Terre et accroissent donc la chaleur emmagasinée par notre planète. Depuis la révolution industrielle, les concentrations de gaz à effet de serre n'ont cessé d'augmenter dans l'atmosphère et sont actuellement plus élevées qu'elles ne l'ont jamais été depuis des millions d'années. La concentration de CO₂, par exemple, a dépassé le cap des 400 ppm (parties par million) pour la première fois depuis

(au moins) un million d'années en mai 2013. Le réchauffement de la planète peut s'amplifier sous l'effet d'un véritable cercle vicieux: les processus engendrés par les changements climatiques peuvent en effet provoquer à leur tour un réchauffement supplémentaire. Ainsi, par exemple, des réservoirs de carbone jadis inertes (comme les tourbières tropicales et les énormes quantités de CH₄ emmagasinées par le pergélisol de l'Arctique) peuvent être conduits par la hausse des températures à libérer davantage de CO₂ et/ou de CH₄ dans l'atmosphère. La réduction rapide de la surface occupée par les glaces de l'océan Arctique, surtout en été, peut également affecter le climat car la glace réfléchit la plus grande partie du rayonnement solaire dans l'atmosphère, contrairement à l'eau de mer. Dépourvu de glace, l'océan Arctique peut accumuler le rayonnement solaire et renforcer le réchauffement de la planète.

Les changements climatiques (élévation moyenne du niveau des mers, hausse de la température de l'eau, intensité accrue des tempêtes et des ondes de tempêtes, modifications éventuelles du régime des vagues) peuvent avoir des conséquences graves sur l'infrastructure et les services côtiers, qu'il s'agisse des ports ou d'autres installations et réseaux de navigation côtière. Le fonctionnement quotidien des ports peut être directement touché par les ondes de tempêtes et les refoulements d'eau, qui peuvent les contraindre à la fermeture. Des études récentes ont évalué l'exposition de la population et des biens dans 136 villes portuaires de plus d'un million d'habitants. Il en ressort que des dizaines de millions d'habitants et des biens pour une valeur supérieure à 25 milliards de dollars pourraient être exposés à des inondations côtières d'ici à 2050. Ces inondations auront des effets importants sur les infrastructures de transport côtier car elles les rendront inutilisables pendant toute la durée de l'inondation et occasionneront des dommages aux terminaux, installations de transport intermodal, plates-formes logistiques, zones de stockage et cargaisons, perturbant ainsi pour un temps relativement long les chaînes intermodales d'approvisionnement et les liaisons de transport. Les ports, qui constituent des éléments essentiels pour les réseaux de transport internationaux et qui relient les chaînes d'approvisionnement internationales, seront particulièrement touchés, en raison surtout de la longue durée de vie de leurs infrastructures de base, de leur emplacement exposé le long de côtes et/ou d'estuaires, ainsi que de leur dépendance à l'égard du commerce, du transport maritime et des transports intérieurs, eux aussi vulnérables aux changements climatiques.

Les changements du schéma des précipitations peuvent entraîner des modifications du débit des cours d'eau qui sont susceptibles d'affecter les routes, les voies ferrées, les gares ferroviaires et routières, les installations portuaires et les aéroports. Il peut s'agir de dommages directs qui surviennent pendant l'événement lui-même et nécessitent des interventions d'urgence, mais il peut aussi s'agir d'effets au niveau de l'intégrité structurelle et de l'entretien des routes, des voies ferrées, des ponts, des tunnels, des systèmes d'évacuation des eaux pluviales, des télécommunications et des systèmes de gestion du trafic, qui nécessitent des travaux d'entretien et de réparation plus fréquents. L'augmentation du nombre des cas de fortes précipitations et d'inondations provoquera davantage d'accidents attribuables aux conditions météorologiques et causés par des dommages occasionnés aux véhicules, aux routes et aux voies ferrées, ou par la mauvaise visibilité, ou encore des perturbations du trafic dans des réseaux déjà engorgés. Les ports seront aussi vulnérables aux inondations de courte durée provoquées par la pluie, tandis que les accumulations extrêmes de limon dues aux précipitations risquent de réduire la profondeur des chenaux navigables et de renchérir considérablement les opérations de dragage. Les voies navigables pourront être exposées à la suspension de la navigation, à l'accumulation du limon, à des changements de morphologie du cours d'eau et à des dommages causés aux berges et aux aménagements de protection contre les inondations, alors que des retards ou des annulations de vols causés

par des inondations d'aéroports seront aussi à attendre, de même que des dommages à l'intégrité structurelle des pistes et autres installations aéroportuaires.

Des vents extrêmement violents peuvent endommager les voies ferrées le long des côtes et estuaires, provoquer des dégâts aux installations portuaires (grues et terminaux de chargement), détruire les récoltes (et donc affecter indirectement le secteur des transports), causer des interruptions plus fréquentes du transport aérien et endommager les installations aéroportuaires (équipement, clôtures de sécurité et panneaux indicateurs), endommager les infrastructures routières et ferroviaires (notamment par l'intermédiaire de débris arrachés par le vent) et compliquer les opérations routières et ferroviaires. Les changements de direction des vents (et des vagues provoquées par le vent) peuvent aussi avoir des répercussions importantes au niveau du fonctionnement et de la sécurité des ports maritimes.

Les vagues de chaleur sont également susceptibles d'avoir un impact important sur les services et infrastructures de transport. Un temps chaud et sec peut favoriser les incendies de forêts et compromettre les récoltes, poser des problèmes liés à l'approvisionnement en eau, au stockage des aliments et aux systèmes énergétiques, tout en accroissant les besoins en matière de réfrigération. Les vagues de chaleurs peuvent aussi endommager les routes, déformer les voies ferrées et dessécher les travaux de terrassement provoquant d'importants retards liés aux limitations de vitesse. Les installations, les pistes et le fonctionnement des aéroports seront tout autant affectés, comme le sera le transport par voie navigable. Le déclin de la calotte glaciaire de l'océan Arctique permettra peut-être l'ouverture de nouvelles voies maritimes, mais il aura aussi pour effet d'altérer l'offre et la demande de services de transports régionaux ainsi que d'augmenter considérablement les coûts des liaisons entre les ports de l'Arctique et les principaux réseaux nationaux et internationaux de transport intérieur. Le réchauffement de l'Arctique pourrait également entraîner dans la répartition du pergélisol et dans les cycles gel-dégel des changements susceptibles d'endommager les fondations des bâtiments, de provoquer des soulèvements par le gel sur les routes et les voies ferrées, et de porter atteinte à l'intégrité des ponts et autres structures porteuses.

5.2.2 Effets sur les modes de transport

La demande de services de transport croît au rythme de la croissance de l'économie mondiale, du commerce et de la population. Les transports étant une activité conditionnée par la demande, les modifications engendrées par les changements climatiques dans des domaines tels que la répartition démographique, la production des produits de base (et leur répartition géographique), les habitudes en matière de tourisme, ainsi que les modèles de commerce et de consommation, peuvent également avoir des conséquences importantes au niveau des transports. Les changements climatiques représentent donc un véritable défi pour les transports tant des marchandises que des passagers. Quelques aspects de ce défi sont résumés ci-après pour les différents modes de transport.

Transport routier

Les changements climatiques prévus vont sans aucun doute affecter les infrastructures, le fonctionnement, la sécurité et l'entretien des réseaux routiers et donc aussi tous les gestionnaires et usagers de ces réseaux. Les principaux effets pourront être directs (détérioration et déformation de la chaussée, dégâts et affaissement dans les zones de pergélisol, détérioration structurelle générale, perturbations du trafic et problèmes d'accessibilité aux tunnels et ponts pour cause d'inondation et d'érosion des berges), ou indirects (relatifs à l'économie, à l'environnement, à la démographie et à l'aménagement du

territoire). L'infrastructure routière souffrira également de la déformation et/ou de la fusion de l'asphalte, de la dilatation thermique des joints de ponts, de glissements de terrain, ainsi que de phénomènes d'affouillement ou d'affaiblissement des ponts. Il est donc crucial de s'y préparer, en s'intéressant de plus près au programme Route de la 5e génération/Forever Open Road, qui est adaptable aux changements climatiques (voir Association mondiale de la route (AIPCR) (2012) et annexe II).

Transport ferroviaire

Le secteur ferroviaire est déjà affecté par les changements climatiques, avec des étés plus chauds, des hivers humides, des vents plus violents et des changements de saison soudains qui provoquent davantage de perturbations du trafic et accroissent les coûts d'entretien et d'exploitation ainsi que la consommation d'énergie. Les principaux effets sont la déformation des rails, la surchauffe et la défaillance du matériel roulant, les problèmes de signalisation, la hausse des coûts de construction et d'entretien, l'affaissement des talus et des ouvrages de terrassement, l'affouillement de ponts, des systèmes d'évacuation des eaux pluviales surchargés, des limitations de vitesse, des retards et des interruptions de service. Comme ces effets risquent de s'aggraver au cours des prochaines décennies, il est nécessaire de recourir à des stratégies efficaces d'adaptation aux changements climatiques qui incluent une évaluation et une cartographie de la vulnérabilité, la planification de l'entretien et des mesures d'urgence, des activités ciblées de recherche et de développement, ainsi que l'introduction d'orientations et de protocoles efficaces pour la construction de lignes utilisant des techniques nouvelles améliorées et pour le matériel roulant.

Voies navigables

Comme on ne prévoit pas de grands changements dans le niveau de l'eau des voies navigables d'ici à 2050, les changements climatiques ne devraient pas avoir d'effets significatifs avant le milieu du siècle. Toutefois, la plus grande variabilité temporelle et spatiale des niveaux d'eau à laquelle il faut s'attendre est susceptible de poser, surtout après 2050, des problèmes nécessitant une approche intégrée en matière de planification, d'investissements, d'entretien et de gestion des voies navigables. Il faut s'attendre en particulier à des restrictions et à l'augmentation du coût de la navigation en raison de niveaux d'eau très bas ou très élevés, d'inondations des infrastructures terrestres et de problèmes de sédimentation dans les chenaux de navigation, ou encore de la construction de nouveaux réservoirs d'eau.

Ports maritimes

19. Les ports maritimes, centres névralgiques des réseaux de transport internationaux, subiront quelques-uns des effets les plus graves des changements climatiques en raison de leur emplacement au point de rencontre entre la mer et la terre, de l'élévation possible du niveau des mers et de la fréquence accrue de marées de tempête plus intenses. La majorité des ports maritimes est actuellement exposée au risque d'inondations des côtes, situation qui devrait encore se détériorer à l'avenir. Dans le même temps, les ports situés dans des estuaires sont également exposés aux inondations fluviales (et aux sécheresses). Les principaux effets des changements climatiques sont les dommages causés aux infrastructures, aux équipements et aux cargaisons par les inondations et la force des vagues, l'augmentation de la consommation d'énergie pour refroidir les cargaisons, les changements dans les circuits de transport dus à l'ouverture éventuelle de nouvelles routes maritimes (par exemple les couloirs de l'océan Arctique), la hausse des coûts de construction et d'entretien des ports, les changements de régimes d'écoulement et de sédimentation dans les ports et les chenaux de navigation, sans oublier les questions d'assurance. Une enquête menée récemment

auprès de ses membres par l'Association internationale des ports (AIP) et l'Association américaine des autorités portuaires (AAPA), a révélé que: a) ceux qui avaient répondu étaient très préoccupés par les effets des changements climatiques mais plutôt mal informés; b) les normes de conception des ports ne prennent pas suffisamment en considération les effets des changements climatiques, bien que les ports maritimes comportent des infrastructures très importantes et coûteuses ayant une longue durée de service; et c) la grande majorité des personnes interrogées (97 %) pense qu'elles seront confrontées à de graves problèmes si le niveau de la mer s'élève de 0,5 m ou davantage.

5.3. Recommandations

Dans le secteur des transports, l'adaptation aux changements climatiques ne bénéficie pas encore de toute l'attention voulue. Certains États membres travaillent sur cette question depuis des années, tandis que d'autres viennent de commencer ou prévoient de le faire à l'avenir. Toutefois, la plupart des personnes (>75 %) qui ont répondu au questionnaire soumis dans le cadre de la présente étude estiment que les changements climatiques pourraient avoir des effets importants sur les transports dans les trente prochaines années. Il conviendrait donc, pour éviter de devoir engager des dépenses considérables plus tard, que les décideurs et les intervenants se penchent de manière urgente sur cette question. Pour être en mesure de concevoir, construire et gérer des infrastructures de transport résilientes, il importe avant tout de bien comprendre les effets éventuels des changements climatiques, ainsi que les risques et les vulnérabilités. Il est à relever que dans les économies en développement et peu diversifiées le secteur des transports sera particulièrement exposé, non seulement aux phénomènes extrêmes de grande ampleur et catastrophiques, mais aussi aux tensions de basse intensité liées à la hausse des températures moyennes et à l'élévation du niveau des mers, ainsi qu'aux inondations et/ou sécheresses devenues plus fréquentes.

Les mesures d'adaptation visent à réduire les facteurs de vulnérabilité et à accroître la résilience des systèmes aux effets des changements climatiques. Dans le secteur des transports, on entend par résilience non seulement la force physique et la durabilité d'une infrastructure qui lui permet de supporter des effets néfastes sans que ses fonctions essentielles soient affectées, mais aussi sa faculté de se redresser rapidement et à moindre coût. Il en résulte que les effets des changements climatiques doivent être pris en compte lors de la planification, de la conception, de la construction et de l'exploitation, et plus généralement dans les politiques économiques et de développement qui intéressent le secteur des transports. L'élaboration de stratégies efficaces d'adaptation aux effets des changements climatiques sur les transports internationaux passe par une action des pouvoirs publics, des efforts d'investissement et une collaboration en matière de recherche. Des études de vulnérabilité bien ciblées, des études empiriques et l'évaluation des risques prévus et des coûts connexes doivent constituer une première étape nécessaire pour combler les lacunes dans nos connaissances et pour définir des domaines d'intervention prioritaires.

Les efforts entrepris pour évaluer les risques et les effets éventuels sur le secteur des transports peuvent déboucher sur l'élaboration de pratiques et de recommandations concernant l'adaptation aux effets présents et prévisibles de changements climatiques.

Les recommandations générales ci-après sont basées sur l'expérience acquise à ce jour et sur les effets confirmés scientifiquement et prévisibles des changements climatiques. L'action des pouvoirs publics est considérée comme une condition préalable à l'élaboration

et à la formulation de stratégies efficace d'adaptation aux changements climatiques qui exigent une bonne connaissance et une cartographie systématique des facteurs de vulnérabilité du secteur des transports à ces changements et qui soient déterminées par trois facteurs principaux: la nature et l'ampleur des changements climatiques, la vulnérabilité des systèmes de transport et la nécessaire capacité d'adaptation aux changements. Il est recommandé que:

- (i) Les gouvernements, en collaboration avec les propriétaires et exploitants d'infrastructures de transport (autorités portuaires, compagnies ferroviaires privées) et les organisations internationales, dressent des inventaires des nœuds de transport essentiels et vulnérables pour évaluer où et quand les changements climatiques sont susceptibles d'avoir des conséquences importantes;
- (ii) Les changements climatiques soient pris en compte dans les plans à long terme d'amélioration des immobilisations, dans la conception des installations, dans les travaux d'investissement, dans les pratiques d'entretien, d'exploitation et d'ingénierie, ainsi que dans les plans d'intervention d'urgence;
- (iii) Les infrastructures et services de transport soient soumis à de nombreux règlements; il pourrait donc être nécessaire pour y inclure des mesures d'adaptation aux changements climatiques, de procéder également à des adaptations d'ordre institutionnel et réglementaire. À cet égard, la Directive de l'Union européenne sur l'évaluation et la gestion des risques d'inondation, adoptée en 2007, constitue un bon exemple. En vertu de cette Directive, les États membres de l'UE sont tenus de mettre en vigueur les lois, règlements et procédures administratives pertinents afin de préparer des cartes de zones inondables et de risques, ainsi que des plans de gestion et de mettre en œuvre des mesures applicables aux zones côtières et aux bassins fluviaux de leur territoire;
- (iv) Les planificateurs et concepteurs d'infrastructures de transport, de même que les gestionnaires de ces infrastructures, les exploitants de véhicules et de matériel roulant tiennent compte, dès le stade de la planification, des projections en matière de changements climatiques et de leurs effets éventuels aux niveaux tant mondial que régional. Il importe également d'évaluer les effets des divers objectifs fixés lors de la conception des mesures d'adaptation, afin d'éviter les mesures contradictoires.

S'agissant des stratégies d'adaptation, les recommandations générales sont les suivantes:

- (i) En l'absence de stratégies d'adaptation efficaces, la résilience actuelle des réseaux de transport pourrait s'avérer insuffisante à court et à moyen terme. Il faut donc prendre les devants en adoptant d'urgence des stratégies d'adaptation destinées à renforcer de manière systématique les capacités d'adaptation. De telles stratégies doivent comporter des objectifs et des mesures à court et à long terme, qui tiennent compte des contraintes économiques et dont le mot d'ordre soit «Réceptivité», «Résilience» et «Récupération» («Readiness», «Resilience», «Recovery» – RRR);
- (ii) Il est fortement recommandé que les mesures d'adaptation soient prises dans le cadre de programmes intégrés de gestion des risques naturels. De tels programmes devraient non seulement permettre d'affronter les problèmes et les perturbations d'origine météorologique, mais aussi de concevoir et d'élaborer des mesures à moyen et à long terme d'adaptation aux changements climatiques. De plus, il semble que le fait de tirer parti de systèmes existants qui font déjà face aux effets négatifs liés à la météorologie et au climat facilite la mise sur pied d'un cadre d'adaptation qui fonctionne. Les programmes d'adaptation sans liens avec l'exploitation actuelle risquent de se heurter à de sérieux problèmes d'adoption et de mise en œuvre;

- (iii) Le cœur d'un système efficace de gestion des risques naturels pour le secteur des transports doit être constitué d'une base de données bien structurée et intégrée au plan national et international qui contienne des données numérisées concernant le réseau, les points névralgiques, les incidents, les plans de gestion et d'entretien et les pratiques en matière de gestion des actifs. Cette base de données doit être maintenue et mise à jour et il faut lui fournir les accessoires nécessaires et innovants (logiciels) susceptibles de prévoir les risques futurs afin d'en faire un outil intégré facilitant l'adaptation aux changements climatiques dans le secteur des transports;
- (iv) Les effets éventuels des changements climatiques doivent être envisagés dès le début de la planification et inclus dans les évaluations des facteurs de risque et de vulnérabilité. Lorsqu'on évalue les conditions climatiques futures dans le but d'établir l'ordre de priorité des mesures d'adaptation, les pratiques et méthodes courantes doivent être complétées par des approches plus innovantes et tournées vers l'avenir. La conception et la planification des futurs projets doivent tenir compte des considérations liées aux changements climatiques.

Même si le présent rapport traite de l'adaptation du secteur des transports aux changements climatiques, il ne faut jamais perdre de vue les questions relevant de l'atténuation des changements climatiques:

- (i) L'adaptation n'a pas pour mission de se substituer à la réduction des gaz à effet de serre. La surveillance mondiale des émissions est jugée indispensable pour déterminer le rythme et l'ampleur des changements climatiques et donc pour réduire les coûts et accroître l'efficacité des mesures d'adaptation à ces changements;
- (ii) Beaucoup de décisions capitales concernant tant l'adaptation aux changements climatiques que leur atténuation seront influencées par des analyses coûts-bénéfices. De telles analyses sont actuellement entravées par les incertitudes liées à la quantification des effets environnementaux, sociaux et économiques. Lever ces incertitudes lorsque c'est possible devrait dès lors constituer une priorité urgente de la recherche intégrée;
- (iii) Il conviendrait d'explorer davantage les possibilités d'établir des synergies avec la réduction des émissions de gaz à effet de serre et d'autres objectifs environnementaux. On pourrait également envisager de voir dans quelle mesure la planification des transports multimodaux pourrait aider à atteindre les objectifs de réduction des gaz à effet de serre.

La présente étude a mis en évidence l'existence dans l'information et les connaissances d'importantes lacunes qu'il convient de combler par des recherches appropriées. Les recommandations à cet égard sont les suivantes:

- (i) Pour étudier les effets des changements climatiques et l'adaptation à ces effets il faut mobiliser une vaste gamme de disciplines, parmi lesquelles le droit, les sciences naturelles et sociales, l'ingénierie et l'économie. L'intégration dans le contexte d'un avenir incertain est un défi ambitieux, mais elle est aussi nécessaire pour obtenir des résultats susceptibles d'aider les individus, les collectivités, les gouvernements, les organisations internationales et l'industrie à faire face aux effets néfastes des changements climatiques;
- (ii) Des recherches ciblées doivent être consacrées aux différents effets des changements climatiques. Elles doivent être complétées par des études de cas sur les conséquences économiques, sociales et environnementales que pourraient avoir les solutions possibles en matière d'adaptation, ainsi que sur leurs coûts et avantages. Par exemple, le risque que les inondations fluviales représentent pour

- les réseaux routiers et ferrés pourrait faire l'objet d'études détaillées basées sur la modélisation des risques extrêmes d'inondation dans le région de la CEE selon différents scénarios de changements climatiques et sa transposition aux réseaux routiers et ferroviaires, afin de localiser les «points chauds» en matière d'inondations;
- (iii) Il est possible de procéder à des évaluations initiales des facteurs de vulnérabilité du secteur des transports sans connaître en détail les futurs changements climatiques. De telles évaluations peuvent se fonder sur l'analyse de la vulnérabilité passée à la variabilité du climat et sur la capacité actuelle des systèmes à absorber les perturbations et à s'adapter à des conditions changeantes. Il est donc possible de définir des plages d'adaptation et des seuils critiques. Les scénarios de changements climatiques et socioéconomiques laissent entrevoir toute une gamme de futurs plausibles qui fournissent une base d'évaluation et de gestion des risques à venir. Les incertitudes concernant la nature et l'ampleur des changements climatiques doivent servir à se concentrer sur les mesures d'adaptation portant sur des facteurs de vulnérabilité actuels en élargissant les plages et en renforçant la capacité d'adaptation;
 - (iv) Il convient de souligner qu'en raison de l'interconnexion et de l'interdépendance des économies dans un système d'échanges mondialisé, il faut tenir compte des besoins particuliers des pays en développement et particulièrement de ceux des petits États insulaires en développement;
 - (v) Il est important d'encourager la coopération entre la CEE et d'autres organisations et institutions internationales concernées, notamment la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC) et le Cadre mondial pour les services climatologiques (CMSC) de l'Organisation météorologique mondiale, de façon à instituer une procédure permettant une meilleure communication en vue d'améliorer la communication entre les professionnels des transports, les climatologues et d'autres experts scientifiques, ainsi que de créer un centre d'échange d'informations sur les changements climatiques intéressant les transports. Compte tenu de la nature et des conséquences globales des changements climatiques sur les transports, mais aussi de l'importance qu'il y a à tenir compte de ce phénomène lors de la négociation de normes internationales de transport au sein du CTI et de ses organes subsidiaires, la CEE doit prendre l'initiative d'entrer en relation avec le Comité consultatif des partenaires du CMSC. Le partage des meilleures pratiques face aux effets possibles de la variabilité et des changements climatiques dans le secteur des transports sera ainsi garanti.

Pour ce qui est des différents modes de transport, les recommandations ci-après concernent les:

Transports routiers

- (i) Les maîtres d'ouvrage doivent procéder de manière systématique pour définir les risques et en évaluer les conséquences au niveau du réseau (par exemple en identifiant les zones inondables et les tronçons de réseau vulnérables aux fluctuations de température) et prendre l'initiative d'élaborer des stratégies destinées à atténuer ces risques à moindre coût à l'aide de modèles qui tiennent compte des différents scénarios en matière de changements climatiques;
- (ii) Il faut tenir compte des changements climatiques lors de la conception, de la construction et de l'exploitation des routes, notamment en i) procédant à une évaluation des risques portant sur l'exposition, la vulnérabilité, la résilience et les mesures d'adaptation des réseaux routiers, ii) planifiant des délais qui prennent en considération les effets des changements climatiques, et iii) élaborant des stratégies d'adaptation (y compris les procédures de mise en œuvre);

- (iii) Les politiques nationales en matière de transports routiers doivent comporter des mécanismes de sensibilisation et de mise en commun des bonnes pratiques, ainsi que des approches plus stratégiques et à plus long terme en ce qui concerne l'aménagement du territoire.

Transports ferroviaires

- (i) À long terme, le secteur ferroviaire trouvera peut-être des moyens de contribuer à l'atténuation des effets des changements climatiques attendus en agissant sur les questions de durabilité. Les résultats obtenus pourraient par exemple permettre aux gestionnaires de l'infrastructure ferroviaire de gérer de manière plus efficace le patrimoine existant, de déterminer si de nouvelles normes de conception pourraient être bénéfiques et comment mieux adapter les mesures d'exploitation actuelles;
- (ii) On pourrait commencer par quantifier les répercussions des phénomènes météorologiques imprévus au niveau des risques pour la sécurité et des retards subis. Il faut tenir compte pour cela:
 - Des différents types d'infrastructures vulnérables et de leur distribution spatiale (voies, évacuation des eaux pluviales, caténaires);
 - De données quantitatives rétrospectives concernant, par exemple, les retards causés par des incidents météorologiques;
 - Des valeurs utilisées actuellement dans les modèles de risque pour les précurseurs d'événements dangereux liés à des phénomènes météorologiques et les dommages qu'ils risquent de causer aux personnes;
 - Des évaluations quantitatives disponibles au sujet des changements probables en cas de phénomènes extrêmes, basées sur les niveaux d'intervention en vigueur dans le secteur (température, niveau de crue, vitesse des rafales de vent, etc.);
 - Des progrès en matière d'éducation et de sensibilisation, à commencer par le personnel des chemins de fer;
- (iii) L'infrastructure ferroviaire et le matériel roulant sont en général solides, mais l'exploitation des trains peut néanmoins être affectée par des conditions climatiques extrêmes (qui provoquent par exemple des retards en raison des exigences de sécurité et des limites imposées). Bien que ces risques soient encore limités, il est probable qu'ils augmenteront sous l'effet de changements climatiques susceptibles d'affecter la fréquence et l'intensité des phénomènes climatiques extrêmes;
- (iv) Les effets de la fréquence accrue des tempêtes, des précipitations intenses, des canicules, des inondations et des vents violents sur le réseau ferroviaire peuvent être considérées comme une aggravation de la situation actuelle. Elles ont déjà fait l'objet d'études à des degrés divers, mais le plus souvent dans le but d'évaluer les risques d'accidents au cours du processus de conception plutôt que pour évaluer les effets des changements climatiques ou pour prendre des mesures de précaution;
- (v) L'infrastructure ferroviaire est conçue pour être utilisée longtemps (souvent pendant plus de cent ans). Il paraît donc raisonnable que les besoins en matière d'adaptation aux changements climatiques soient pris en compte bien à l'avance. Un bon exemple à suivre est donné par l'innovation technique qui a permis l'adaptation aux effets du dégel du pergélisol (appelé à s'amplifier sous l'effet de la hausse prévue de la température mondiale) qui se traduit notamment par

des fissures et des soulèvements. La voie de chemin de fer d'altitude la plus longue du monde (la ligne Qinghai-Tibet – appelée aussi «Pergélisol Express» – en Chine) comporte des innovations en matière d'ingénierie et de conception qui la rendent particulièrement adaptée au pergélisol et qui sont susceptibles d'être appliquées sous d'autres cieux.

Voies navigables

Les transports par voie navigable ne seront pas trop affectés par les changements climatiques d'ici à 2050 et l'on dispose donc de suffisamment de temps pour envisager les mesures d'adaptation possibles en matière de conception des ports et des flot es, de planification de voies navigables intégrées ainsi que de gestion et de logistique. Les activités suivantes semblent à cet égard utiles:

- (i) Amélioration et intégration des futures voies navigables;
- (ii) Définition de critères de planification intégrés avec l'aide d'experts de différentes disciplines (navigation, hydrologie, ingénierie, écologie d'eau douce et économie);
- (iii) Élaboration de lignes directrices concrètes pour les activités susceptibles d'aider à appliquer des critères de planification intégrés dans des projets concernant l'infrastructure des voies navigables;
- (iv) Informations sur les pratiques et innovations existantes (et en cours) en matière de conception de bateaux et d'ingénierie fluviale.

Ports maritimes

Les ports maritimes doivent figurer en tête de la liste des priorités parce qu'ils sont exposés à des risques accrus liés aux changements climatiques (comme l'élévation du niveau de la mer), qu'il est presque impossible de les délocaliser et qu'ils constituent des liens indispensables dans la chaîne internationale d'approvisionnement:

- (i) Les installations exposées à des risques gérables auront probablement surtout besoin d'une planification de la gestion des risques et des interventions d'urgence. La désaffectation des installations portuaires ne doit être envisagée qu'en dernier ressort et seulement si leur vulnérabilité est jugée trop importante pour être gérable, ou si le coût de la délocalisation du port est acceptable;
- (ii) Pour comprendre l'importance des risques que les changements climatiques font courir à un port donné, il est nécessaire d'analyser les facteurs qui affectent ses performances et d'évaluer les effets des changements climatiques en tenant compte des facteurs de vulnérabilité existants, des seuils critiques et des évaluations et prévisions en matière de changements climatiques;
- (iii) L'ampleur des effets des changements climatiques variera considérablement d'un port à l'autre, mais tous comportent quelques zones à risque dont il faut tenir compte. Il y aura des différences considérables entre les ports en ce qui concerne la nature et l'ampleur des risques liés aux changements climatiques et les possibilités d'y faire face selon le lieu où ils se trouvent (ports affectés par de longues vagues, ports exposés aux cyclones tropicaux ou subtropicaux, ou encore ports situés dans des zones de pergélisol);
- (iv) Les ports varient considérablement en matière de fonctionnalité. Les effets des changements climatiques peuvent être très différents pour les ports qui s'occupent de manutention et d'entreposage, pour ceux qui assurent exclusivement des services de pilotage, de navigation et de dragage, pour les ports de croisière et de passagers ou encore pour les ports de plaisance et les marinas.



Pont ferroviaire de Putna Seacă (Roumanie) endommagé par des inondations en 2005 © Club Ferroviar

Références

- ACIA, 2005. Arctic Climate Impact Assessment. Cambridge University Press, Cambridge (Royaume-Uni). 1042 pp. <http://www.acia.uaf.edu/pages/scientifi.html>
- Alcamo J, N Dronin, M Endejan, G Golubev et A Kirilenko, 2007. A new assessment of climate change impacts on food production shortfalls and water availability in Russia Federation. *Global Environment Change*, 17, 429-444.
- Allan RP et BJ Soden, 2008, Atmospheric warming and the amplification of precipitation extremes. *Science* 321, 1481-1484.
- Alpa B, 2009. Vulnerability of Turkish coasts to accelerated sea-level rise. *Geomorphology*, 107, 58-63.
- Anisimov OA, AA Velichko, PF Demchenko, AV Yeliseyev, II Mokhov et VP Nechaev, 2004. Impact of climate change on permafrost in the past, present and future. *Physics of Atmosphere and Oceans*, 38(1), 25-39.
- Arkell BP et GJC Darch, 2006. Impact of climate change on London's transport network. *Proceedings of the ICE - Municipal Engineer*, 159(4), 231-237.
- Arumala JO, 2012. Impact of large-scale disasters on the built environment. *Leadership and Management in Engineering*, 12(3), 147-150 (doi: 10.1061/(ASCE)LM.1943-5630.0000175).
- Asariotis R et Benamara H, 2012. *Maritime Transport and the Climate Change Challenge*. Earthscan, Routledge. 327 pp.
- Baker CJ, L Chapman, A Quinn et K Dobney, 2010. Climate change and the railway industry: a review. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part C Journal of Mechanical Engineering Science*, 224, 519-528.
- Barnett TP et al., 2008. Human-induced changes in the hydrology of the Western United States. *Science* 319, 1080-1085.
- Becker A, 2012. Climate change and ports: Qualitative analysis of consequences, plans, and requirements. Exposé à la Conférence internationale de la CEE sur l'adaptation des réseaux de transport aux changements climatiques, Alexandroupolis (Grèce), 24-26 juin 2012. (http://www.unece.org/fileadmin/AM/trans/doc/2012/wp5/15_Mr_Becker.pdf).
- Becker A, M Acciaro, R Asariotis, E Cabrera, L Cretegny, P Crist, M Esteban, A Mather, S Messner, S Naruse, AKY Ng, S Rahmstorf, M Savonis, DW Song, V Stenek et AF Velegrakis, 2013. A note on climate change adaptation for seaports: A challenge for global ports, a challenge for global society. *Climatic Change* (DOI 10.1007/s10584-013-0843-z).
- Beniston M, 2003. Climatic change in mountain regions: a review of possible impacts. *Climatic Change*, 59, 5-31.
- Beniston M et HF Diaz, 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.

Bennet S, 2011. Preparing for the Worst – the Shipowners' Perspective. Exposé lors de la réunion spéciale de la CNUCED «Climate change impacts and adaptation: A challenge for global ports », Genève, 29-30 septembre 2011.

Bertin X, Prouteau E et Letetrel C, 2013. A significant increase in wave height in the North Atlantic Ocean over the 20th century. *Global and Planetary Change* 106, 77–83.

Boeckli L, Brenning A, Gruber S et Noetzi J, 2012. A statistical approach to modelling permafrost distribution in the European Alps or similar mountain ranges. *The Cryosphere* 6(1), 125–140. doi:10.5194/tc-6-125-2012.

Bouch C, Baker C, Chapman L, Hooper L, Jaroszweski D, Quinn A, Avery K, Paulley N, Reeves S, Dijkstra T, Dixon N, Fleming P, Frost M, Ryley T, Wilks J, Zanni A, Dingwall R, Goulden M, Gunn D, Lawley R, Sivell P, et Wade S, 2012. Future Resilient Transport Networks (FUTURENET): Assessing Transport Network Security in the Face of Climate Change. Présenté et publié à l'occasion de la 91^e rencontre annuelle du du Transportation Research Board, 22–26 janvier 2012, Washington DC.

Brohan P, Kennedy JJ, Harris I, Tett SFB et Jones PD, 2006. Uncertainty estimates in regional and global observed temperature changes: a new dataset from 1850. *Journal of Geophysical Research*, 111(D12106), doi:10.1029/2005JD006548.

Brown RD et Robinson DA, 2011. Northern Hemisphere spring snow cover variability and change over 1922–2010 including an assessment of uncertainty. *The Cryosphere*, 5, 219–229.

Caldeira K, 2009. Ocean acidification: Humanity and the environment in geologic time, IOP Conference Series: Earth and Environmental Sciences, 6(3), 462004. <http://www.iop.org/EJ/toc/1755-1315/6/46>.

Callaghan DP, P Nielsen, A Short et R Ranasinghe, 2008. Statistical simulation of wave climate and extreme beach erosion. *Coastal Engineering*, 55, 375–390.

Cambers G, 2009. Caribbean beach changes and climate change adaptation. *Aquatic Ecosystem Health and Management* 12, 168–176.

Canadell JG, Le Quiré C, Raupach MR, Field CR, Buitenhuis E, Ciais P, Conway TJ, Gillett, NP, Houghton RA et G Marland, 2007. Contributions to accelerating atmospheric CO₂ growth from economic activity, carbon intensity, and efficiency of natural sinks. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 104, 18866-18870.

CCIADC, 2004. Climate Change Impacts and Adaptation: A Canadian Perspective. DS Lemmen et FJ Warren (eds), Climate Change Impacts and Adaptation Directorate, Natural Resources Canada Ottawa, Ontario. ISBN: 0-662-33123-0. 174 pp. http://www.glisu.umich.edu/great_lakes_climate/docs/Climate-Change-Impacts-and-Adaptation-a-Canadian-Perspective.pdf (accessed 17/08/2013).

CCSP, 2008. Impacts of Climate Change and Variability on Transportation Systems and Infrastructure: Gulf Coast Study, Phase I. A Report by the U.S. Climate Change Science Program and the Subcommittee on Global Change Research [MJ Savonis, VR Burkett et JR Potter (eds.)]. Ministère américain des transports, Washington (États-Unis), 445 pp.

Challinor A, J Slingo, A Turner et T Wheeler, 2006. Indian Monsoon: Contribution to the Stern Review http://www.hm-treasury.gov.uk/d/Challinor_et_al.pdf.

Choate A, C Evans, M Riley-Gilbert, E Rowan et P Schultz, 2012. Gulf Coast Study, Phase 2—Task 2.4: Assessing the Sensitivity of Transportation Assets to Climate Change in Mobile, Alabama. Rapport du Ministère américain des transports FHWA-HEP-12-054, 42 pages.

Church JA et NJ White, 2011. Sea-level rise from the late 19th to the early 21st Century. *Surveys in Geophysics* 32, 585-602 (doi:10.1007/s10712-011-9119-1).

Chust G, Á Borja, P Liria, I Galparsoro, M Marcos, A Caballero et R Castro, 2009. Human impacts overwhelm the effects of sea-level rise on Basque coastal habitats (N Spain) between 1954 and 2004. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 84, 453-462.

Ciscar JC et al., 2009. Climate change impacts in Europe. Final report of the PESETA research project. JRC Scientific and Technical Reports. European Commission – Joint Research Centre Institute for Prospective Technological Studies, Institut pour l'environnement et le développement durable. (<http://ftp.jrc.es/EURdoc/JRC55391.pdf>).

Coumou D et S Rahmstorf, 2012. A decade of weather extremes. *Nature Climate Change*, 2, 491-496 (doi:10.1038/nclimate1452)

Crist P, 2011. Transport infrastructure and network adaption to climate change: Issues and strategies for ports. Exposé lors de la réunion spéciale de la CNUCED «Climate change impacts and adaptation: A challenge for global ports », Genève, 29-30 septembre 2011.

Crist P, 2012. Mitigating GHG emissions from shipping: Potential costs and strategies. In R. Asariotis and H. Benamara (eds) *Maritime Transport and the Climate Change Challenge*, Earthscan, Routledge, 165-204.

Cronin TM, 2012. Rapid sea-level rise. *Quaternary Science Reviews* 56, 11-30.

Daanen RP, G Grosse, MM Darrow, TD Hamilton et BM Jones, 2012. Rapid movement of frozen debris-lobes: implications for permafrost degradation and slope instability in the south-central Brooks Range, Alaska. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 12, 1521-1537.

Dasgupta S, B Laplante, S Murray et D Wheeler, 2009. *Sea-Level Rise and Storm Surges: A Comparative Analysis of Impacts in Developing Countries*. Policy Research Working Paper 4901, the World Bank Development Research Group, Environment and Energy Team. 41pages.

DEFRA, 2012. *The UK Climate Change Risk Assessment Evidence Report*. Ministère de l'environnement, de la pêche et des affaires rurales. (<http://www.defra.gov.uk/environment/climate/government/>).

Dobinski W, 2011. Permafrost. *Earth Science Reviews* doi:10.1016/j.earscirev.2011.06.007.

Dobney K, CJ Baker, AD Quinn et L Chapman, 2009. Quantifying the effects of high summer temperatures due to climate change on buckling and rail related delays in south-east United Kingdom. *Meteorological Applications*, 6(2), 245–251 (Doi: 10.1002/met.114)

Domingues CM, Church JA, White NJ, Gleckler PJ, Wijffels SE, Barker PM et JR Dunn, 2008. Improved estimates of upper-ocean warming and multi-decadal sea-level rise. *Nature* 453:1090-1094.

Doran KS, Stockdon HF, Sopkin KL, Thompson DM, et Plant NG, 2012, National assessment of hurricane-induced coastal erosion hazards: Mid-Atlantic Coast: U.S. Geological Survey Open-File Report 2013-1131, 28 pages.

Ebersole BA, JJ Westerink, S Bunya, JC Dietrich et MA Cialone, 2010. Development of storm surge which led to flooding in St. Bernard Polder during Hurricane Katrina. *Ocean Engineering*, 37, 91-103.

Commission européenne, 2007. Directive 2007/60/CE relative à l'évaluation et à la gestion des risques d'inondation. Commission européenne (http://ec.europa.eu/environment/water/flood_isk/index.htm).

Commission européenne, 2009 Communication de la Commission au Parlement européen, au Conseil, au Comité économique et social européen et au Comité des régions: Objectifs stratégiques et recommandations concernant la politique du transport maritime de l'UE jusqu'en 2018. Commission des Communautés européennes, COM(2009) 8 final (21.01.2009).

(<http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2009:0008:FIN:FR:PDF>).

Commission européenne, 2012a. Impacts of Climate Change on Transport: A focus on road and rail transport infrastructures (sous la direction de Nemry F et H Demirel). JRC Scientific and Policy Reports. Office des publications de l'Union européenne, Luxembourg, ISBN 978-92-79-27037-6.

Commission européenne, 2012b. Transport: changer de cap. Commission européenne. Office des publications de l'Union européenne. 16 pages. ISBN 978-92-79-22827-8, doi: 10.2832/65952.

Commission européenne, 2013. Les ports: un moteur pour la croissance. Communication de la Commission COM(2013) 295/fina. (<http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2013:0295:FIN:EN:PDF>).

CEPALC, 2011. An assessment of the economic impact of climate change on the transportation sector in Barbados. Commission économique pour l'Amérique latine et les Caraïbes (siègesous-régional pour les Caraïbes) rapport technique de l'ECLAC LC/CAR/L309. 44 pages.

Eddowes MJ, Waller D, Taylor P, Briggs B, Meade T, Ferguson I, 2003. Railway safety implications of weather, climate and climate change. Rail Safety and Standards Board UK.

AEE, 2004. Mapping the impacts of recent natural disasters and technological accidents in Europe. Environmental issue report No 35. Agence européenne de l'environnement, Copenhague.

AEE, 2010. The European environment: State and outlook 2010, Adapting to climate change. Agence européenne de l'environnement, Copenhague, 2010. ISBN 978-92-9213-159-3.

AEE, 2012. Climate change, impacts and vulnerability in Europe 2012. An indicator-based report. Agence européenne de l'environnement, Copenhague, Danemark, 300 pages. (ISBN 978-92-9213-346-7) <http://www.eea.europa.eu/publications/climate-impacts-and-vulnerability-2012>.

Eisenack K, Stecker R, Reckien D, Hoffmann E, 2011. Adaptation to climate change in the transport sector: a review. Potsdam Institute for Climate Research, Report 122. ISSN 1436-0179.

Eisenack K, R Stecker, D Reckien et E Hoffmann, 2012. Adaptation to climate change in the transport sector: a review of actions and actors. *Mitigation Adaptation Strategies Global Change* 17, 451–469.

Emanuel K, 2005: Increasing destructiveness of tropical cyclones over the past 30 years. *Nature* 436, 686-688.

Endler C et Matzarakis A, 2011. Climatic potential for tourism in the Black Forest, Germany — winter season. *International Journal of Biometeorology* 55(3), 339–351. doi:10.1007/s00484-010-0342-0.

EQECAT Inc., 2012. Post-landfall loss estimates—Hurricane Sandy—Nov. 1, 2012.

ERF, 2013. Strategic Research Priorities in the area of Road Safety 2013–2020. European Union Road Federation (ERF), mémorandum, 16 pages (http://www.erf.be/images/Strategic_Research_Priorities_in_the_area_of_Road_Safety.fina.pdf).

Ericson JP, CJ Vörösmarty, SL Dingman, LG Ward, et M Meybeck, 2006. Effective sea-level rise and deltas. Causes of change and human dimension implications. *Global and Planetary Change*, 50, 63-82.

Feyen L, Dankers R, Barredo JI, Kalas M, Bódis K, de Roo A et Lavalley C, 2006. PESETA Flood risk in Europe in a changing climate. Institute of Environment and Sustainability, Joint Research Center, EUR 22313 EN.

Feyen L, Dankers R et Bodis K, 2010. Climate warming and future flood risk in Europe. *Climatic Change*.

Field CB et al., 2007. North America. In: *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (ML Parry, OF Canziani, JP Palutikof PJ van der Linden et CE Hanson (eds.). Cambridge University Press, Cambridge (Royaume-Uni et New York), p. 617-652.

Fink A, T Brücher, A Krüger, G Leckebusch, J Pinto, et U Ulbrich, 2004. The 2003 European summer heatwaves and drought – synoptic diagnosis and impacts. *Weather*, 59.

Galbraith RM, J Price et L Shackman, 2005. Scottish Road Network Climate Change Study. Jacobs Scottish Executive, Scotland, 64 et 43 pages.

Gaslikova L, Schwerzmann A, Raible CC et Stocker TF, 2011. Future storm surge impacts on insurable losses for the North Sea region. *Natural Hazards and Earth System Science* 11(4), 1205 - 1216 (doi:10.5194/nhess-11-1205-2011).

Gbegbelegbe S, Cammarano D, Asseng S, Adam M, Robertson R, Jones J, Boote K, Abdalla O, Payne T, Reynolds M, Shiferaw B, Palazzo A, Robinson S, Nelson G. 2012. Promising Wheat Technologies: A Bio-economic Modeling Approach. Draft Report for 'Global Futures for Agriculture'. Nairobi, Kenya: Centre international d'amélioration du maïs et du blé (CIMMYT).

Greenwood RO et JD Orford, 2008. Temporal patterns and processes of retreat of drumlin coastal cliffs — Strangford Lough, Northern Ireland. *Geomorphology* 94, 153-169.

Grinsted A, Moore JC et Jervejeva S, 2010. Reconstructing sea level from paleo and projected temperatures 200 to 2100 AD. *Climate Dynamics* 34, 461- 472.

Haigh JH, ARWinning, RToumi et JW Harder, 2010. An influence of solar spectral variations on radiative forcing of climate. *Nature*, 467, 696–699 (doi:10.1038/nature09426).

Haigh I, Nicholls R et Wells N, 2010. Assessing changes in extreme sea levels: Application to the English Channel, 1900–2006. *Continental Shelf Research*, 30(9), 1042–1055.

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.

Haveman JD et Shatz HJ, 2006. Protecting the nation's seaports: Balancing security and cost http://www.ppic.org/content/pubs/report/r_606jhr.pdf.

Haydock H et Kollamthodi S, 2009. *Energy Security and the Transport Sector*. Rapport établi dans le cadre du contrat ENV.C.3/SER/2008/0053 entre la DG environnement de la Commission européenne et AEA Technology plc (www.eutransportghg2050.eu).

Heyndrickx C et T Breemersch, 2012. Climate change and adaptation to inland waterways. Exposé à la Conférence internationale de la CEE sur l'adaptation des réseaux de transport aux changements climatiques, Alexandroupolis (Grèce), 24-26 juin 2012 (http://www.unece.org/fileadmin/AM/trans/doc/2012/wp5/11_Mr_Heyndrickx.pdf).

Hein L, MJ Metzger et A Moren, 2009. Potential impacts of climate change on tourism; a case study for Spain. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 1, 170-178.

Hill N. et al., 2011. The role of GHG emissions from infrastructure construction, vehicle manufacturing, and ELVs in overall transport sector emissions. Rapport «Task 2» établi dans le cadre du contrat entre la DG Environnement de la Commission européenne et AEA Technology plc (www.eutransportghg2050.eu).

Hinkel J et RJT Klein, 2009. Integrating knowledge to assess coastal vulnerability to sea-level rise: The development of the DIVA tool. *Global Environmental Change*, 19, 384-395.

Hooper E et L Chapman, 2012 The Impacts of Climate Change on National Road and Rail Networks. In T Ryley et L Chapman (ed.): *Transport and Climate Change, Transport and Sustainability*, Vol. 2), Emerald Group Publishing Ltd, 105–136. [http://dx.doi.org/10.1108/S2044-9941\(2012\)0000002008](http://dx.doi.org/10.1108/S2044-9941(2012)0000002008).

Horsburgh KJ et Wilson C, 2007. Tide-surge interaction and its role in the distribution of surge residuals in the North Sea. *Journal of Geophysical Research*, 112(C8), C08003. doi:10.1029/2006JC004033

Horton R, Herweijer C, Rosenzweig C, Liu J, Gornitz V, et Ruane AC, 2008. Sea level rise projections for current generation CGCMs based on the semi-empirical method. *Geophysical Research Letters* 35 DOI: 10/1029/2007GL032486.

HSRTE, 2013. Hurricane Sandy: Rebuilding Strategy. Hurricane Sandy Rebuilding Task Force. 198 pp. http://portal.hud.gov/hudportal/HUD?src=/press/press_releases_media_advisories/2013/HUDNo.13-125.

Hudecz, A, 2012. Climate change adaptation: A report on Climate Change adaptation measures for low volume roads in the Northern Periphery. ROADEx. 95 pp.

[http://www.roadex.org/uploads/publications/Climate%20Change%20Adaptation%20\(2012\).pdf](http://www.roadex.org/uploads/publications/Climate%20Change%20Adaptation%20(2012).pdf).

Huggel C, Clague JJ et Korup O, 2012. Is climate change responsible for changing landslide activity in high mountains? *Earth Surface Processes and Landforms* 37(1), 77–91. doi:10.1002/esp.2223.

Hunt A, R Boyd, T Taylor, S Kovats, K Lachowyx, P Watkiss et L Horrocks, 2006. Report on the costs of the hot summer of 2003, DEFRA – Climate change impacts and adaptation: Cross regional research programme, Metroeconomica Limited, 95pp.

AIP, 2010. Impacts of climate change on seaports, AIP/AAPA Survey, July 2010.

AIE, 2012. Key World Energy Statistics 2012. Agence internationale de l'énergie. Paris. 80 pages. (<http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/kwes.pdf>)

Infrastructure Canada, 2006. Adapting infrastructure to climate change in Canada's cities and communities: A literature Review. Research & Analysis Division, Infrastructure Canada. 21 pp. ([ipcc-wg2.gov/nj-lite_download.php?id=6305.pdf](http://www.ipcc-wg2.gov/nj-lite_download.php?id=6305.pdf)).

Inoue S, 2012. Climate initiatives of the world's ports. In R. Asariotis et H. Benamara (eds) *Maritime Transport and the Climate Change Challenge*, Earthscan, Routledge, 225-240.

Inturri, G et Ignaccolo M, 2009. Adapting transport systems to climate change. Policy Guidelines Summary, GRaBS. (http://www.grabs-eu.org/downloads/PGS_Transport%20FINAL.pdf).

GIEC, 2013. Changements climatiques 2013: Les éléments scientifique . Résumé à l'intention des décideurs http://www.climatechange2013.org/images/report/WG1AR5_SPM_brochure_fr.pdf.

GIEC, 2007a. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (Solomon S, D Qin, M Manning, Z Chen, M Marquis, KB Averyt, M Tignor et HL Miller (eds)). Cambridge University Press, Cambridge (Royaume-Uni et New York), 996 pages.

GIEC, 2007b. Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Cambridge University Press, Cambridge (Royaume-Uni) for Intergovernmental Panel on Climate Change.

GIEC, 2001. Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Cambridge University Press, Cambridge (Royaume-Uni).

Jevrejeva S, Moore JC 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 JC 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 Rietveld et 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.

Kaddouri A, 2012. Mobility and climate change, what does it mean for a sustainable mobility provider. Exposé à la Conférence internationale de la CEE sur l'adaptation des réseaux de transport aux changements climatiques, Alexandroupolis (Grèce), 24-26 juin 2012.

(http://www.unece.org/fileadmin/AM/trans/doc/2012/wp5/05_Mr_Kaddouri.pdf).

Kafalenos RS et al., 2008. What are the implications of climate change and variability for Gulf coast transportation? In: *Impacts of Climate Change and Variability on Transportation Systems and Infrastructure: Gulf Coast Study, Phase I*. (Savonis MJ, VR Burkett et JR Potter (eds.). Synthesis and Assessment Product 4.7. U.S. Ministère des transports, Washington, pp. 4-1 to 4F-27 (104 pages).

Kamburow C, 2011. Climate Change Adaptation at European Railway Infrastructure Companies. Results of the UIC ARISCC project. Deuxième session du Groupe d'experts chargés d'étudier les effets des changements climatique et l'adaptation à ces changements dans les réseaux de transport, CEE-ONU Genève, 8 novembre 2011.

Karim FM et N Mimura, 2008. Impacts of climate change and sea-level rise on cyclonic storm surge floods in Bangladesh. *Global Environmental Change*, 18, 490-500.

Karl TR, Melillo JM et Peterson TC (eds.), 2009. *Global Climate Change Impacts in the United States*. Cambridge University Press www.globalchange.gov/usimpacts.

Katsman CA, Sterl A, Beersma JJ, Brink HW, Church JA, Hazeleger W, Kopp RE, Kroon D, Kwadijk J, Lammersen R, Lowe J, Oppenheimer M, Plag HP, 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.

Kawagoe S et Kazama S, 2009. Slope failure risk evaluation due to global warming. *Global Environmental Research*, 14(2) 143-152.

Kjellström E, Nikulin G, Hansson U, Strandberg G et Ullerstig A, 2011. 21st century changes in the European climate: uncertainties derived from an ensemble of regional climate model simulations. *Tellus A* 63(1), 24–40. doi:10.1111/j.1600-0870.2010.00475.

Knapp KR, Kruk MC, Levinson DH, Diamond HJ, Neumann CJ, 2010. The International Best Track Archive for Climate Stewardship (IBTrACS): unifying tropical cyclone best track data. *Bulletin of American Meteorological Society* 91, 363–376.

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)

Krekt AH, TJ van der Laan, RAE van der Meer, B Turpijn, E Bolt, O Jonkeren, A van der Toorn, E Mosselman, J van Meijeren et T Groen, 2010. Climate change and inland waterway transport: effects on the inland waterway sector, the Port of Rotterdam and potential solutions.

Kunkel KE et al., 2008. Observed changes in weather and climate extremes. In: Weather and Climate Extremes in a Changing Climate: Regions of Focus: North America, Hawaii, Caribbean, and U.S. Pacific Islands. In TR Karl et al (eds): Synthesis and Assessment Product 3.3. U.S. Climate Change Science Program, Washington, DC, pp. 35-80.

Kurz WA et al., 2008. Mountain pine beetle and forest carbon feedback to climate change. *Nature* 452, 987-990.

Lantuit H et WH Pollard, 2008. Fifty years of coastal erosion and retrogressive thaw slump activity on Herschel Island, southern Beaufort Sea, Yukon Territory, Canada. *Geomorphology*, 95, 84-102.

Larsen PH, S Goldsmith, O Smith, ML Wilson, K Strzepek, P Chinowsky et B Saylor, 2008. Estimating future costs for Alaska public infrastructure at risk from climate change. *Global Environmental Change*, 18(3), 442-457.

Lawrence DM et AG Slater, 2005. A projection of severe near-surface permafrost degradation during the 21st century. *Geophysical Research Letters*, 32, L24401

Le TVH, HN Nguyen, E Wolanski, T C Tran, et S Haruyama, 2007. The combined impact on the flooding in Vietnam's Mekong River delta of local man-made structures, sea level rise, and dams upstream in the river catchment. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 71, 110-116.

Lenton TM, 2013. What early warning systems are there for environmental shocks? *Environmental Science & Policy*, 27, Supplement 1, S60-S75.

Lenton TM, Held H, Kriegler E, Hall JW, Lucht W, Rahmstorf S, et Schellnhuber HJ, 2008. Tipping elements in the Earth's climate system. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 105 (6): 1786-1793.

Lenton TM, A Footitt et A Dlugolecki, 2009. Major Tipping Points in the Earth's Climate System and Consequences for the Insurance Sector. WWF, Gland, Switzerland et Allianz SE, Munich, Germany.

Leuxe A, 2011. Infrastructures et services de transport : Concertation nationale et adoption d'un premier plan national d'adaptation au changement climatique Présentation à la deuxième session du Groupe d'experts chargés d'étudier les effets des changements climatiques et l'adaptation à ces changements dans les réseaux de transport. Genève, 8 novembre 2011.

Leuxe A, 2012. Adaptation au changement climatique : Les actions de la France. Exposé à la Conférence internationale de la CEE sur l'adaptation des réseaux de transport aux changements climatiques, Alexandroupolis, 24-26 juin 2012.

(http://www.unece.org/fileadmin/AM/trans/doc/2012/wp5/21_Mr_Leuxe.pdf).

Lindgren J, DK Jonsson et A Carlsson-Kanyama, 2009. Climate Adaptation of Railways: Lessons from Sweden. *European Journal of Transport and Infrastructure Research (EJTIR)* 9 (2), 164-181.

Lobell D, Sibley A et Ortiz-Monasterio JI, 2012. Extreme heat effects on wheat senescence in India. *Nature Climate Change* (published online 31 January 2012).

Lochman L, 2012. Climate Change Adaptation: impact and requirements for the rail sector. Exposé à la Conférence internationale de la CEE sur l'adaptation des réseaux de transport aux changements climatiques, Alexandroupolis (Grèce), 24-26 juin 2012 (http://www.unece.org/fileadmin/AM/trans/doc/2012/wp5/04_Mr_Lochman.pdf)

López-Moreno JI, Goyette S et Beniston M, 2009. Impact of climate change on snowpack in the Pyrenees: Horizontal spatial variability and vertical gradients. *Journal of Hydrology* 374(3–4), 384–396. doi:10.1016/j.jhydrol.2009.06.049

Losada IJ, Reguero BJ, Méndez FG, Castanedo S, Abascal AJ, et Mínguez R, 2013. Long-term changes in sea-level components in Latin America and the Caribbean. *Global and Planetary Change* 104, 34–50.

Lowe JA et JM Gregory, 2006. Understanding projections of sea level rise in a Hadley Centre coupled climate model. *Journal of Geophysical Research*, 111, C11014, 12 pp. (doi:10.1029/2005JC003421).

Lowe JA, 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). <http://ukclimateprojections.defra.gov.uk/media>.

Lyman J, Good SA, Gouretski VV, Ishii M, Johnson GC, Palmer MD, Smith DM et Willis JK, 2010. Robust warming of the global upper ocean. *Nature* 465, 334-337.

Marcos M et Tsimplis MN, 2008. Comparison of results of AOGCMs in the Mediterranean Sea during the 21st century. *Journal of Geophysical Research*, 113(C12). doi:10.1029/2008JC004820.

Marcos M, MNTsimplis et AGP Shaw, 2009. Sea level extremes in southern Europe. *Journal of Geophysical Research-Oceans*, 114, C01007.

Marcos M, Jordü G, Gomis D et Pirez 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.

McEvoy D et Mullett J, 2013. Enhancing the resilience of seaports to a changing climate: research synthesis and implications for policy and practice. Enhancing the resilience of seaports to a changing climate report Series, National Climate Change Adaptation Research Facility, Gold Coast.

McEvoy D, Mullett J, Millin S, Scott H et Trundle A, 2013. Understanding future risks to ports in Australia, Enhancing the resilience of seaports to a changing climate report Series, National Climate Change Adaptation Research Facility, Gold Coast. ISBN: 978-1-921609-84-8 NCCARE.

McGranahan G, D Balk et B Anderson, 2007. The Rising Tide: Assessing the Risks of Climate Change and Human settlements in Low Elevation Coastal Zones. *Environment & Urbanization*, Institut international pour l'environnement et le développement (IIED). Vol 19(1): 17–37. doi: 10.1177/0956247807076960.

McKee Smith J, MA Cialone, TV Wamsley et TO McAlpin, 2010. Potential impact of sea level rise on coastal surges in southeast Louisiana. *Ocean Engineering* 37, 37–47.

McLeod E, A Green, E Game, K Anthony, J Cinner, SF Heron, J Kleypas, CE Lovelock, JM Pandolfi, RL Pressey, R Salm, S Schill et C Woodroffe, 2012. Integrating Climate and Ocean Change Vulnerability into Conversation Planning. *Coastal Management*, 40(6), 651-672.

Meizhu C, G Xu, S Wu et S Zheng, 2010. High-temperature Hazards and Prevention Measurements for Asphalt Pavement. Actes de l'International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering (MACE), Wuhan (Chine), 26-28 juin 2010. Institute of Electrical and Electronics Engineers, New York, pp. 1341-1344 (doi:10.1109/MACE.2010.5536275).

Menendez M et PL Woodworth, 2010. Changes in extreme high water levels based on a quasi-global tide-gauge data set. *Journal of Geophysical Research*, 115, C10011, (doi:10.1029/2009JC005997).

Messner S et Moran L, 2013. Climate change and sea level rise impacts at ports and a consistent methodology to evaluate vulnerability and risk. *WIT Transactions on Ecology and the Environment* 169, doi:10.2495/13CP0131.

Mizukami Y, 2012). Natural hazard experiences and countermeasures in the Japanese railways Exposé à la Conférence internationale de la CEE sur l'adaptation des réseaux de transport aux changements climatiques, Alexandroupolis (Grèce), 24-26 juin 2012 (http://www.unece.org/fileadmin/AM/trans/doc/2012/wp5/03_Mr_Mizukami.pdf).

Milly PCD, J Betancourt, M Falkenmark, RM Hirsch, ZW Kundzewicz, DP Lettenmaier et RJ Stouffer, 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*, <http://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.

National Geospatial-Intelligence Agency, 2011. World Port Index, 21st Edition. http://msi.nga.mil/MSISiteContent/StaticFiles/NAV_PUBS/WPI/wpi.zip (accessed 15/09/2012). 280 pages.

National Research Council, 2008. Potential Impacts of Climate Change on US Transportation. Transportation Research Board and Division on Earth and Life Studies, National Research Council of the National Academies Special Report 290. Washington (États-Unis). ISBN 978-0-309-11306-9. 280 pages. (<http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/sr/sr290.pdf>)

Needham HF, BD Keim, D Sathiaraj et M. Shafer, 2012. Storm Surge Return Periods for the United States Gulf Coast. In ED Loucks (ed.): *World Environmental and Water Resources Congress 2012: Crossing Boundaries*.

Network Rail, 2011. Network Rail Climate Change Adaptation Report, 30/04/2011. (<http://archive.defra.gov.uk/environment/climate/documents/adapt-reports/06road-rail/network-rail.pdf>).

Nicholls RJ, PP Wong, VR Burkett, JO Codignotto, JE Hay, RF McLean, S Ragoonaden, et CD Woodroffe, 2007. Coastal systems and low-lying areas. In: *Climate change 2007: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment*

Report of the Intergovernmental Panel of Climate Change. [Parry M, OF Canziani, JP Palutikof, PJ Van der Linden, et CE Hanson (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge (Royaume-Uni), 315-356.

Nicholls RJ, S Hanson, C Herweijer, N Patmore, S Hallegatte, J Corfee-Morlot, J Château, et R Muir-Wood, 2008. Ranking Port Cities With High Exposure And Vulnerability to Climate Extremes: Exposure Estimates. OECD ENV/WKP 2007-1, 62 pages.

Nicholls, R. J., Marinova, N., Lowe, J. A., Brown, S., Vellinga, P., de Gusmao, D., Hinkel, J. et Tol, R. S. J., 2011. Sea level rise and its possible impacts given a “beyond 4 C world” in the twenty first century. *Philosophical Transactions of the Royal Society (A)*, 369(1 934), 161–181. doi:10.1098/rsta.2010.0291.

Nolte R, C Kamburow et J Rupp, 2011. ARISCC Adaptation of Railway Infrastructure to Climate Change, Final Report, 6th Draft, UIC Project, Berlin, July 2011. 60 pages.

Nott JS, J Smithers, K Walsh et E. Rhodes, 2009. Sand beach ridges record 6000 year history of extreme tropical cyclone activity in northeastern Australia. *Quaternary Science Reviews*, 28, 1511–1520.

ONERC, 2009. Changement climatique: coûts des impacts et lignes d’adaptation. Observatoire national sur les effets du réchauffement climatique. Rapport au Premier ministre et au Parlement, 139 pages.

O’Toole R, 2008. Does Rail Transit Save Energy or Reduce Greenhouse Gas Emissions? Policy Analysis No 615. CATO Institute, Washington (États-Unis), 23 pages.

Pacheco B.G. et A. Lewis-Cameron, 2010. Weathering the Storm – Crisis Marketing for Small Island Tourist Destinations. *Marketing Island Destinations, Concepts and Cases*, 149-164.

Parker, A., Saad Saleem M., et Lawson, M., 2013. Sea-level trend analysis for coastal management. *Ocean & Coastal Management* 73 (2013) 63-81.

Pascal M, 2008. Commentary: Our next challenge in heatwave prevention. *International Journal of Epidemiology*, 37,1365–1366.

Peduzzi P, Velegrakis AF, Estrella M et Chatenoux B, 2013. Integrating the role of ecosystems in disaster risk and vulnerability assessments: Lessons from the Risk and Vulnerability Assessment Methodology Development Project (RiVAMP) IN Negril Jamaica. In FG Renaud, K Sudmeier-Rieux et M Estrella (eds): *The role of Ecosystems in Disaster Risk Reduction*, United Nations University Press ISBN 978-9280812213, 109-139.

Perherin C, A Roche, F Pons, I Roux, G Desire et C Boura, 2010. Vulnérabilité du territoire national aux risques littoraux. XI^{èmes} Journées Nationales Génie Côtier – Génie Civil, Les Sables d’Olonne, 22-25 juin 2010, DOI:10.5150/jngcgc.2010.072-P,

Pethick J, 2001. Coastal management and sea-level rise. *Catena*, 42, 307-322.

Pfeffer W, Harper J et O’ Neel S, 2008. Kinematic constraints on glacier contributions to 21st century sea-level rise. *Science* 321, 1340–1343. (doi:10.1126/science.1159099)

Phillips, M.R. et A.L. Jones, 2006. Erosion and tourism infrastructure in the coastal zone: Problems, consequences and management. *Tourism Management*, 27, 517-524.

PIANC, 2006. Climate Change and Navigation: Waterborne transport, ports and waterways: A review of climate change drivers, impacts, responses and mitigation, PIANC-EnviCom - Task Group 3, 58 pp.

AIPCR, 2012. Prendre en compte les effets du changement climatique sur les chaussées routières. Association mondiale de la route (AIPCR). Comité technique D.2 «Chaussées routières», 146 pages (ISBN: 2-84060-247-4) <http://www.piarc.org/en/order-library/16862-en-Dealing%20with%20the%20effects%20of%20climate%20change%20on%20road%20pavements.htm>.

Pickering MD, Wells NC, Horsburgh KJ et Green JAM, 2012. The impact of future sea-level rise on the European Shelf tides. *Continental Shelf Research* 35, 1–15.

Port de San Diego, 2013. The Climate mitigation and adaptation plan of the port of San Diego. <http://www.portofsandiego.org/climate-mitigation-and-adaptation-plan.html> (consulté le 15/06/2013).

Post E, MC Forchhammer, MS Bret-Harte, TV Callaghan, TR Christensen, B Elberling, AD Fox, O Gilg, DS Hik, et TT Hoye, 2009. Ecological dynamics across the Arctic associated with recent climate change, *Science*, 325, 1355-1358.

Potter J, 2012. U.S. Transportation and Climate Change: Addressing the Adaptation Challenge. Exposé à la Conférence internationale de la CEE sur l'adaptation des réseaux de transport aux changements climatiques, Alexandroupolis (Grèce), 24-26 juin 2012.

(http://www.unece.org/fileadmin/AM/trans/doc/2012/wp5/08_Ms_Potter.pdf)

Potter JR, VR Burkett, et MJ Savonis, 2008. Executive summary. In: *Impacts of Climate Change and Variability on Transportation Systems and Infrastructure: Gulf Coast Study, Phase I* (Savonis M J, VR Burkett, et JR Potter (eds.)). Synthesis and Assessment Product, Ministère américain des transports, Washington (États-Unis), p ES-1 à ES-10.

Qingbai W, Cheng Guodong, Ma Wei et Liu Yongzhi, 2008. Railway Construction Techniques: Adapting to Climate Warming in Permafrost Regions. State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chine.

Rahmstorf S, 2007. A semi-empirical approach to projecting future sea-level rise. *Science* 315, 368-370.

Rahmstorf S, 2011. Climate Change-The State of Science. Exposé lors de la réunion spéciale de la CNUCED «Climate change impacts and adaptation: A challenge for global ports», Genève, 29-30 septembre 2011.

Rahmstorf S, 2012. Climate Change: State of Science. In R. Asariotis et H. Benamara (eds) *Maritime Transport and the Climate Change Challenge*, Earthscan, 3-11.

Rahmstorf S, Cazenave A, Church JA, Hansen JE, Keeling RF, Parker DE, et RCJ Somerville, 2007. Recent climate observations compared to projections. *Science* 316, 709-709.

Ramieri E, Hartley A, Barbanti A, Duarte Santos F, Laihonon P, Marinova N, Santini M, 2011. Methods for assessing coastal vulnerability to climate change. ETC CCA Background Paper, Copenhagen (Danemark) 8-9 juin 2011. European Topic Centre on Climate Change Impacts, Vulnerability and Adaptation European Environment Agency, 76 pages. (<http://www.oannes.org.pe/>)

Ranasinghe R, Duong TM, Uhlenbrook S, Roelvink D, et Stive M, 2013. Climate-change impact assessment for inlet-interrupted coastlines. *Nature Climate Change*, DOI: 10.1038/NCLIMATE1664.

Reeve DE et H Karunaratna, 2009. On the prediction of long-term morphodynamic response of estuarine systems to sea level rise and human interference. *Continental Shelf Research*, 29, 938-950.

Rigall-Torrent R, M Fluvià, R Ballester, A Saló, E Ariza et J-M Espinet, 2010. The effects of beach characteristics and location with respect to hotel prices. *Tourism Management*, doi:10.1016/j.tourman.2010.10.005.

Richardson K, W Steffen, HJ Schellnhuber, J Alcamo, T Barker, D M Kammen, R Leemans, D Liverman, M Munasinghe, B Osman-Elasha, N Stern et O Ole Wæver., 2009. Rapport de synthèse. Changement climatique: Risques, défis et décisions au niveau mondial. Université de Copenhague, 39 pages http://climatecongress.ku.dk/pdf/Synthesis_Report_-_French_-_ISBN.pdf.

Rignot E, Velicogna, MR van den Broeke, A Monaghan et J Lenaerts, 2011. Acceleration of the contribution of the Greenland and Antarctic ice sheets to sea level rise. *Geophysical Research Letters*, 38, 5 pp. (doi:10.1029/2011GL046583).

Robertson, IN, SYim et TTran, 2011. Case Study of Concrete Bridge Subjected to Hurricane Storm Surge and Wave Action ASCE, Solutions to Coastal Disasters Conference 2011, [http://dx.doi.org/10.1061/41185\(417\)63](http://dx.doi.org/10.1061/41185(417)63).

Rohling E, Grant K, Hemleben C, Siddall M, Hoogakker B, Bolshaw M et Kucera M, 2008. High rates of sea-level rise during the last interglacial period. *Nature Geosciences* **1**, 38–42. (doi:10.1038/ngeo.2007.28)

Dora J, 2011. Climate Change Adaptation and Transport – UK and Rail. Exposé à la deuxième session du Groupe d'experts chargés d'étudier les effets des changements climatique et adaptation à ces changements dans les réseaux de transport, CEE-ONU, Genève, 8 novembre 2011.

Rosegrant MR, C Ringler, TB Sulser, M Ewing, A Palazzo, T Zhu, GC Nelson, J Koo, R Robertson, S Msangi et M Batka, 2009. Agriculture and Food Security under Global Change: Prospects for 2025/2050. Background note for supporting the development of CGIAR Strategy and Results Framework. Washington (États-Unis): Institut international de recherche sur les politiques alimentaires (IFPRI).

Rossouw M et Theron A, 2012. Investigation of potential climate change impacts on ports and maritime operations around the S. African coast. In R. Asariotis et H. Benamara (eds) *Maritime Transport and the Climate Change Challenge*, Earthscan, Routledge, 286-304.

Rothengatter W, 2009. Economic Aspects of Transport and Climate Change. Rapport pour la CEE-ONU. 34 pages.

Rotterdam Climate Initiative, 2013. (<http://www.rotterdamclimateinitiative.nl>) (consulté le 21/06/2013).

RSSB, 2003. Safety implications of weather, climate and climate change. Rail Safety and Standards Board (RSSB) Research Programme Engineering. AEAT/RAIR/76148/R03/005 Issue 2. 141 pages.

RSSB, 2010. Tomorrow's railway and climate change adaption. Rail Safety and Standards Board, Research brief T925. 4 pages.

Ruggiero P, PD Komar et JC Allan, 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.

Savonis MJ, Burkett VR et Potter JR, 2008. Gulf coast study: Phase I – Impacts of climate change and variability on transportation systems and infrastructure, United States Climate Change Science Program.

Schlenker W et MJ Roberts, 2009. Nonlinear temperature effects indicate severe damages to U.S. crop yields under climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 106 (37), 15594–15598.

Scholze M, W Knorr, NW Arnell et IC Prentice, 2006. A climate-change risk analysis for world ecosystems. *Proceedings of the National Academy of Science* 103, 13116.

Scott Wilson, 2009. The Effect of Climate Change on 3CAP's Highway Network Policies and Standards Final Report.

Shanahan TM et al., 2009. Atlantic forcing of persistent drought in West Africa. *Science* 324, 377-382.

Shakun JD, Clark PU, He F, Marcott SA, Mix AC, 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, 49-54.

Shennan I, T Coulthard, R Flather, B Horton, M Macklin, J Rees, et M Wright, 2003. Integration of shelf evolution and river basin models to simulate Holocene sediment dynamics of the Humber Estuary during periods of sea-level change and variations in catchment sediment supply. *The Science of The Total Environment*, 314-316, 737-754.

Sherstyukov AB, 2009. Climate Change and Its Impact in the Russia Federation Permafrost Zone. RIHMI-WDC, Obninsk, 127 pages.

Siedl N, 2012. Waterway infrastructure adaptation. Exposé à la Conférence internationale de la CEE sur l'adaptation des réseaux de transport aux changements climatiques, Alexandroupolis (Grèce), 24-26 juin 2012 (http://www.unece.org/fileadmin/AM/trans/doc/2012/wp5/09_Ms_Siedl.pdf)

Snoussi, M, T Ouchani et S Niazi, 2008. Vulnerability assessment of the impact of sea-level rise and flooding on the Moroccan coast: The case of the Mediterranean eastern zone. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 77, 206-213.

Solomon S, GK Plattner, R Knutti et P Friedlingstein, 2009. Irreversible climate change due to carbon dioxide emissions. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 106 : 1704-1709.

Soncini A et Bocchiola D, 2011. Assessment of future snowfall regimes within the Italian Alps using general circulation models. *Cold Regions Science and Technology* 68(3), 113–123. doi:10.1016/j.coldregions.2011.06.011.

SREX, 2012. *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change IPCC* [Field CB, V Barros, TF Stocker, D Qin, DJ Dokken, KL Ebi, MD Mastrandrea, KJ Mach, GK Plattner, SK Allen, M Tignor, et PM Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge (Royaume-Uni et New York), 582 pages.

Standley S, K Miller, S Okamura, D Wynn, S Greenhalgh et L Horrocks, 2009. *Wild weather warning: A London climate impacts profil* , Greater London Authority, Londres, 85pages. <http://www.london.gov.uk/lccp/publications/docs/wild-weatherwarning.pdf>

Steffen W, 2009. *Climate Change 2009: Faster Change and More Serious Risks. Report to the Department of Climate Change, Gouvernement australien.*

Stenek V et al., 2011. *Climate Risk and Business: Ports – Terminal Marítimo Muselles el Bosque Cartagena, Colombia.* International Finance Corporation (IFC). Groupe Banque mondiale, avril 2011. 190 pages.

Stockdon HF, Doran KJ, Thompson DM, Sopkin KL, Plant NG, et Sallenger AH, 2012, *National assessment of hurricane-induced coastal erosion hazards: Gulf of Mexico: U.S. Geological Survey Open-File Report 2012-1084*, 51 pages.

Stott PA, DA Stone et MR Allen, 2004. Human contribution to the European heatwave of 2003. *Nature*, 432, 610–614.

Streletskiy DA, NI Shiklomanov et FE Nelson, 2012. Spatial variability of permafrost active-layer thickness under contemporary and projected climate in Northern Alaska. *Polar Geography*, 35 (2), 95-116.

Supit I, van Diepen CA, de Wit AJW, Kabat P, Baruth B, et Ludwig F, 2010. Recent changes in the climatic yield potential of various crops in Europe. *Agricultural Systems* 103: 683-694.

Thornton P et L Cramer (eds.), 2012. *Impacts of climate change on the agricultural and aquatic systems and natural resources within the CGIAR's mandate.* CCAFS Working Paper 23. CGIAR Research Program on Climate Change, Agriculture and Food Security (CCAFS). Copenhagen, Danemark. Disponible à l'adresse www.ccafs.cgiar.org.

Trenberth KE et al., 2007. *Observations: Surface and Atmospheric Climate Change.* In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* (Solomon S, D Qin, M Manning, Z Chen, M Marquis, KB Averyt, M Tignor et HL Miller (eds.)). Cambridge University Press, Cambridge (Royaume-Uni).

Tsampoulas D, 2012. *Impacts and Adaptation Requirements of Road Networks.* Exposé à la Conférence internationale de la CEE sur l'adaptation des réseaux de transport aux changements climatiques, Alexandroupolis (Grèce), 24-26 juin 2012 http://www.unece.org/fileadmin/AM/trans/doc/2012/wp5/07_Mr_Tsamboulas.pdf

Tsimplis MN et Shaw A, 2010. Seasonal sea level extremes in the Mediterranean Sea and at the Atlantic European coasts. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 10, 1457–1475.

Turpjin B, 2012. Climate Change and Inland Waterways; the issue of morphology and subsidence. Exposé à la Conférence internationale de la CEE sur l'adaptation des réseaux de transport aux changements climatiques, Alexandroupolis (Grèce), 24-26 juin 2012 (http://www.unece.org/fileadmin/AM/trans/doc/2012/wp5/10_Mr_Turpjin.pdf).

UK Highways Agency, 2009. Climate Change Adaptation Strategy and Framework, Revision B (Nov. 2009) (http://assets.highways.gov.uk/about-us/climate-change/CCAF_Strategy_and_Vol_1_Rev_B_Nov.pdf).

UK Highways Agency, 2011. Climate Change Risk Assessment (http://assets.highways.gov.uk/about-us/climate-change/HA_Climate_Change_Risk_Assessment_August_2011_v2.pdf).

UK Royal Academy of Engineering, 2011. Infrastructure, Engineering and Climate Change Adaptation – ensuring services in an uncertain future.

CNUCED, 2011. Climate change impacts and adaptation: a challenge for global ports. Note d'information du secrétariat de la CNUCED. UNCTAD/DTL/TLB/2011/2, Genève 2011.

CNUCED, 2012. Étude sur les transports maritimes 2012. Rapport technique de la Conférence des Nations Unies sur le commerce et le développement, UNCTAD/RMT/2012. Publication des Nations Unies, ISBN 978-92-1-112860-4, e-ISBN 978-92-1-055950-8 (http://unctad.org/en/PublicationsLibrary/rmt2012_en.pdf).

CEE-ONU, 2011. Transport for sustainable development in the ECE region. Division des transports de la CEE, Genève 2011.

USARC, 2003. Climate Change, permafrost, and impacts on civil infrastructure. Special Report 01-03, U.S. Arctic Research Commission, Arlington (Virginie), 61 pages.

Ministère américain des transports, 2012a. 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 (eds.)]. Department of Transportation, Washington (États-Unis), 470 pages.

Ministère américain des transports, 2012b. U.S. Department of Transportation Climate Adaptation Plan: Ensuring Transportation Infrastructure and System Resilience, 22 pages (www.dot.gov/sites/dot.dev/files/docs/D_T%20Adaptation%20Plan.pdf).

Vafeidis AT, Nicholls RJ, McFadden L, Tol RSJ, Hinkel J, Spencer T, Grashoff PS, Boot G et Klein RJT, 2008. A new global coastal database for impact and vulnerability analysis to sea-level rise. *Journal of Coastal Research*, 24, 917–924.

Vajda A, H Tuomenvirta et P Jokinen, 2012. Observed and future changes of extreme winter events in Europe with implication for road transportation. Actes de la 16^e conférence de la SIRWEC, Helsinki (Finlande), 8 pages (ID: 0040).

Van de Wetering B, 2011. Towards adaptation to climate change. Towards adaptation to climate change. Commission internationale pour la protection du Rhin contre la pollution (CIPR). Exposé à télécharger à l'adresse http://www.unece.org/fileadmin/AM/env/water/meetings/Core_group_pilots/1st_meeting/Presentations/Rhine.pdf.

Vecchi GA et al., 2006. Weakening of tropical Pacific atmospheric circulation due to anthropogenic forcing. *Nature* 441, 73-76.

Velegrakis AF, 2012. Climate change related impacts on the transportation of the Caribbean SIDS. Exposé à la Conférence internationale de la CEE sur l'adaptation des réseaux de transport aux changements climatiques, Alexandroupolis (Grèce), 24-26 juin 2012 (http://www.unece.org/fileadmin/AM/trans/doc/2012/wp5/01_Mr_Velegrakis.pdf).

Velegrakis AF, M Vousdoukas, O Andreadis, E Pasakalidou, G Adamakis et R Meligonitis, 2008. Impacts of dams on their downstream beaches: A case study from Eresos coastal basin, Island of Lesbos, Greece. *Marine Georesources and Geotechnology*, 26, 350-371.

Velicogna I, 2009. Increasing rates of ice mass loss from the Greenland and Antarctic ice sheets revealed by GRACE. *Geophysical Research Letters*, 36, 4pp. (doi:10.1029/2009GL040222).

Vellinga P *et al.* 2008. Exploring high-end climate change scenarios for flood protection of the Netherlands. International Scientific Assessment for the Delta Committee. Scientific report WR-2009-05. KNMI, Alterra (Pays-Bas) <http://www.knmi.nl/bibliotheek/knmipubWR/WR2009-05.pdf>.

Vellinga T et De Jong M, 2012. Approaches to climate change adaptation in the Port of Rotterdam. In: Asariotis R et Benamara, H. (eds) *Maritime Transport and the Climate Change Challenge*. Earthscan/ Routledge, New York, 305-319.

Verlaan M, Zijderveld A, de Vries H et Kroos J, 2005. Operational storm surge forecasting in the Netherlands: developments in the last decade. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 363, 1441-1453

Vermeer M et Rahmstorf S 2009 Global sea level linked to global temperature. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 106, 21527-21532. (doi:10.1073/pnas.0907765106).

Viles HA et AS Goudie, 2003. Interannual, decadal and multidecadal scale climatic variability and geomorphology. *Earth-Science Reviews*, 61, 105-131.

Vött A, 2007. Relative sea level changes and regional tectonic evolution of seven coastal areas in NW Greece since the mid-Holocene. *Quaternary Science Reviews*, 26, 894-919.

Wang, M, Overland JE et Stabeno P, 2012. Future climate of the Bering and Chukchi Seas projected by global climate models. *Deep Sea Research Part II* 65-70, 46-57.

Wang S, R McGrath, J Hanafin, P Lynch, T Semmler et P Nolan, 2008. The impact of climate change on storm surges over Irish waters. *Ocean Modelling*, 25, 83-94.

Wamsley TV, MA Cialone, JM Smith, JH Atkinson et JD Rosati, 2010. The potential of wetlands in reducing storm surge. *Ocean Engineering*, 37, 59-68.

Webster PJ, GJ Holland, JA Curry et H-R Chang, 2005. Changes in tropical cyclone number, duration, and intensity in a warming environment. *Science*, 309, 1844-1849.

Willway T, L Baldachin, S Reeves, M Harding et al, 2008. The effects of climate change on highway pavements and how to minimise them: Technical report PPR184, ISBN 978-1-84608-734-9.

Woodworth PL et DL Blackman, 2004. Evidence for Systematic Changes in Extreme High Waters since the Mid-1970s. Evidence for Systematic Changes in Extreme High Waters since the Mid-1970s, 17, 1190-1197.

Wright L, P Chinowsky, K Strzepek, R Jones, R Streeter, JB Smith, JM Mayotte, A Powell, L Jantarasami and 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)

Xu S et Huang W, 2013. Effects of sea level rise on frequency analysis of 1 % annual maximum water levels in the coast of Florida. Ocean Engineering, <http://dx.doi.org/10.1016/j.oceaneng.2013.01.013i>.

Zhang Y, X Wang, R Fraser, I Olthof, W Chen, D Mclennan, D Ponomarenko et WWu, 2012. Modelling and mapping climate change impacts on permafrost at high spatial resolution for a region with complex terrain. The Cryosphere Discussions, 6, 4599–4636.

Zimov SA, EAG Schuur et FS Chapin, 2006. Permafrost and the global carbon budget. Science, 312, 1612-1618.



ANNEXES

Annexe I: Sélection d'études sur les effets des changements climatiques sur les transports

L'amélioration de la résilience des réseaux de transport internationaux aux changements climatiques nécessite de mieux comprendre les effets spécifiques que peuvent avoir les changements climatiques sur les infrastructures, ainsi que sur les services et le fonctionnement des divers modes de transport. Or, malgré la multitude des répercussions potentiellement importantes que les effets néfastes des changements climatiques pourraient avoir sur les transports, il semble qu'il y ait actuellement peu de travaux détaillés sur le sujet accessibles au public. En outre, bien que plusieurs études aient abordé les effets des changements climatiques sur les infrastructures de transport en général, et les mesures d'adaptation possibles (aux États-Unis, au Canada, dans l'Union européenne, au Royaume-Uni, en France et en Australie), la plupart n'étaient pas propres à un mode de transport en particulier ou ne s'intéressaient pas aux réseaux de transport internationaux.

S'agissant de l'adaptation aux changements climatiques dans le secteur des transports, un revue générale récente des publications sur le sujet, réalisée par l'Institut de recherche de Postdam sur les effets des changements climatiques (Eisenack *et al.*, 2011), révèle que la majorité des mesures d'adaptation possibles concernent le transport routier en particulier et, à un degré moindre, le transport ferroviaire. De surcroît, il s'avère que ces mesures d'adaptation sont rarement spécifiques eu égard à des solutions technologiques particulières, aux cadres de planification, aux stratégies de contrôle, à la fourniture d'informations, au développement de capacités de recherche et de formation, au financement et à l'investissement dans la construction ou la modification des infrastructures; de même, peu de propositions sont émises concernant les instruments de l'action publique, à l'exception de l'aménagement du territoire.

Quelques-unes de ces études parmi les plus pertinentes sont présentées brièvement dans la présente annexe. Il s'agit d'études et de monographies qui portent, en particulier, sur certains modes de transport précis comme le transport routier, ferroviaire ou fluvial, ou sur les infrastructures portuaires, ainsi que d'études qui procèdent d'une vision plus globale.

1.1. Étude des effets des changements climatiques sur le réseau routier écossais (Galbraith *et al.*, 2005)

À la suite de nombreux glissements de terrain en 2004, le Ministère écossais des transports a fait réaliser deux études pour examiner les questions soulevées par ces phénomènes. Son présentés ci-après les résultats de la seconde de ces deux études, qui concernent l'évolution possible des changements climatiques en Écosse et la manière dont celle-ci pourrait affecter le réseau routier.

Le rapport passe en revue l'évolution historique des données dont on dispose sur ces phénomènes climatiques extrêmes et la manière dont celles-ci ont été prises en considération dans la conception/l'exploitation du réseau routier. Il évalue ensuite les implications des prévisions de changements climatiques actuelles et les travaux diligents

spécialement pour l'étude. Des variables climatiques déterminantes (températures et pluies, par exemple), qui peuvent avoir des incidences notables sur les réseaux routiers, ont été intégrées dans des modèles à partir desquels on a établi des prévisions à intervalles d'une trentaine d'années, à savoir pour les années 2020, 2050 et 2080. La conclusion générale est que, même si les changements climatiques censés intervenir en Écosse dans un avenir proche (en l'espèce, dans les années 2020) sont relativement mineurs, ils pourraient néanmoins justifier que l'on modifie notablement les pratiques actuelles. En outre, le rapport fait observer que les changements climatiques seront sans doute plus notables à plus long terme. Toutefois, comme l'incertitude qui entoure ces prévisions augmente avec le temps, les recommandations énoncées portent, en priorité, sur la réponse aux changements climatiques pronostiqués pour un avenir proche.

Les conclusions du rapport quant aux tendances des changements climatiques examinées sont, dans les grandes lignes, les suivantes: les températures devraient être plus élevées, avec plus de chaleur en été et moins de gel en hiver. Les précipitations devraient peu évoluer globalement, mais les pluies d'hiver devraient augmenter, celles d'été diminuer, de même que les chutes de neige. Les vitesses des vents devraient augmenter légèrement et les épisodes de brouillard diminuer, mais ces prévisions comportent un haut degré d'incertitude. Les inondations côtières devraient être plus fréquentes, en particulier si l'on inclut les ondes de tempête dans l'évaluation.

L'augmentation prévisible des pluies d'hiver inquiète particulièrement car il pourrait en résulter une défaillance des réseaux d'évacuation des eaux pluviales. Face à cette inquiétude, des recommandations ont été formulées: (i) modifier en conséquence les paramètres de ruissellement appliqués au calcul des systèmes d'évacuation des eaux de surface; (ii) revoir les paramètres de ruissellement appliqués à la conception des buses et des ponts; (iii) identifier les sites connus pour la fréquence des inondations de routes et d'évaluer les solutions possibles en fonction de leurs coûts et de leurs avantages, en donnant la priorité aux zones fréquemment inondées; (iv) dégager à titre préventif les débris des canaux de drainage et des cours d'eau dans les zones plus exposées au risque d'inondation; (v) entreprendre de plus amples travaux de recherche pour mieux estimer les écoulements des bassins versants de façon à fournir des indications sur la conception des ouvrages à partir d'une analyse des risques, et évaluer d'autres solutions possibles en fonction d'une analyse coûts-avantages.

Par ailleurs, en reconnaissance des possibilités qu'offrent la proposition d'étendre le réseau des panneaux de signalisation à messages variables (PMV) et les technologies de prévisions météorologiques en cours de développement, il est recommandé «... d'examiner la possibilité d'utiliser les PMV pour assurer une meilleure information locale auprès des usagers de la route sur les phénomènes météorologiques violents prévus et sur les probabilités qu'ils surviennent». Le rapport relève que des actions sont déjà en place pour traiter certaines des questions identifiées, comme l'élaboration d'une stratégie d'alerte en cas de coup de vent (*High Winds Strategy*) pour le réseau routier principal. Enfin, le rapport suggère que des accords sont nécessaires avec les autres autorités britanniques gestionnaires du réseau routier pour traiter globalement certaines questions comme celle d'une évolution des normes de construction.

I.2. Effets des changements climatiques sur les politiques et les normes du réseau autoroutier 3CAP (Scott Wilson, 2009)

Ce rapport présente une synthèse des conclusions d'un projet commandité par trois comtés du Royaume-Uni (réunis en un consortium sous le nom de «3 Counties Alliance Partnership», ou «3CAP») pour évaluer les effets des changements climatiques sur leurs politiques et normes applicables à leur réseau autoroutier. Le projet fait appel aux projections de changements climatiques de l'UKCIP (UK Climate Impacts Programme), établies pour 2050, et à des stratégies de gestion des risques et probabilités. Les principales projections de l'UKCIP sur les changements climatiques au Royaume-Uni sont reprises dans le projet, en l'espèce: (i) les températures moyennes annuelles vont augmenter; (ii) les étés vont devenir plus chauds et plus secs; (iii) les hivers vont devenir plus doux et plus humides; (iv) les sols vont globalement s'assécher; (v) les chutes de neige seront moins fréquentes; (vi) les épisodes pluvieux intenses et extrêmes vont se multiplier; (vii) les épisodes de vents extrêmes et les tempêtes pourraient être plus nombreux.

Les prévisions ci-dessus devraient avoir des incidences notables sur la construction et l'entretien du réseau autoroutier géré par les autorités locales. Des étés plus secs et plus chauds provoqueront une dégradation, voire un affaissement des chaussées, tandis que des hivers plus humides et des précipitations plus fréquentes auront pour effet d'accroître la fréquence des inondations dans les zones de faible altitude et les plaines alluviales et le risque de glissements de terrain. Ces changements nuiront également à la qualité et à la résilience des chaussées, à leur capacité d'évacuation des eaux pluviales et à leur état, aux réseaux et aux structures et ouvrages autoroutiers tels que les ponts, les buses, la signalisation routière et l'éclairage. L'accroissement de l'activité orageuse et les épisodes de vents extrêmes pourront également avoir des implications pour la sécurité et augmenteront le risque de voir se déposer sur les chaussées des débris provenant des structures et des arbres endommagés sur les bas-côtés. Cette étude a permis de constater que les politiques et les normes de construction et d'entretien des réseaux autoroutiers reposent habituellement sur l'évolution historique des données climatiques. Afin de garantir la résilience du réseau routier dans un contexte de changements climatiques, il faudra que les prévisions climatiques soient, à l'avenir, intégrées dans les politiques comme dans les cadres normatifs.

Les autorités locales doivent prendre en considération les caractéristiques physiographiques et géologiques et les risques propres à leur région au moment d'élaborer leur plan d'adaptation. Le projet a permis de fournir une analyse complète, en fonction des risques et des probabilités au niveau local, des facteurs de vulnérabilité aux changements climatiques, actuels et futurs, et d'identifier des mesures d'adaptation efficace pour que les autorités locales puissent atteindre les niveaux visés de l'indicateur national (NI 188) de préparation des autorités locales à l'adaptation aux changements climatiques.

Une analyse des risques et probabilités des effets des changements climatiques sur le réseau autoroutier a pointé ceux qui exposent ce réseau à des risques majeurs: (i) fragilisation des chaussées exposées pendant longtemps à des températures élevées; (ii) allongement de la période de végétation, conduisant à une période de croissance végétale plus longue et/ou plus rapide sur les accotements végétalisés; (iii) insuffisance de la capacité du système d'évacuation des eaux pluviales et inondation du réseau; (iv) dégâts de surface sur les structures en raison d'étés plus chauds et plus secs; (v) érosion des structures sous l'effet de pluies plus intenses/d'inondations; (vi) endommagement des couches de surface des chaussées sous l'effet de pluies plus intenses; (vii) affaissement et gonflement

des chaussées sous l'effet de pluies plus intenses; (viii) érosion et endommagement des structures sous l'effet de vents plus violents et d'un accroissement de l'activité orageuse; (ix) endommagement sérieux des structures légères sous l'effet de vents plus violents et d'un accroissement de l'activité orageuse; (x) réduction des interruptions de trafic dues à la neige et au gel grâce à des hivers plus chauds.

Ces risques (parmi d'autres) ont été repris pour évaluer et classer par priorité les mesures à prendre dans le cadre d'un plan d'adaptation dans sept domaines d'intervention des pouvoirs publics: (1) ponts et autres structures; (2) évacuation des eaux pluviales; (3) désherbage; (4) matériaux; (5) réfection des chaussées (6) entretien des arbres et des haies; (7) maintenance d'hiver. Les mesures d'adaptation, élaborées en réponse aux risques répertoriés, ont été passées individuellement au crible d'une analyse structurée en 13 critères, parmi lesquels le coût de l'investissement initial, la faisabilité technique, la faisabilité pratique, l'admissibilité politique de la mesure, sa viabilité à long terme, le niveau de risque encouru en l'absence d'intervention, l'échelle et l'impact de la mesure d'adaptation et la disponibilité des ressources/compétences/savoir-faire nécessaires pour sa mise en œuvre. Les mesures obtenant le meilleur score ont été examinées par les autorités locales du 3CAP, dont les conclusions ont permis de concevoir un plan d'adaptation aux changements climatiques (plan qui correspond au niveau 3 de l'indicateur NI 188) pour la région, ainsi qu'un calendrier de réalisation.

1.3. Prendre en compte les effets des changements climatiques sur les chaussées routières (AIPCR, 2012)

Cette étude a été définie dans le cadre du plan stratégique 2008-2011, approuvé par le Conseil de l'Association mondiale de la route (AIPCR). En 2008, le Comité technique C4.5 (Terrassements) de l'AIPCR a produit un rapport intitulé «*Anticiper les effets des changements climatiques sur les ouvrages géotechniques routiers*». Plusieurs de ses observations et recommandations ont été reproduites dans le rapport de 2012.

Le rapport analyse les effets des changements climatiques sur les infrastructures routières et donne des orientations sur: (a) l'évaluation de la vulnérabilité des chaussées routières aux effets directs des changements climatiques; (b) l'identification et la hiérarchisation des mesures d'adaptation possibles, qui pourraient être appliquées immédiatement et/ou progressivement afin d'éviter les conséquences négatives des changements climatiques sur la viabilité des réseaux routiers. Le rapport examine les effets des évolutions des précipitations, des températures, du niveau des mers, des ondes de tempête et de l'intensité des vents sur l'intégrité structurelle, la solidité et la portance des réseaux.

Une enquête par questionnaire, destinée à évaluer le degré de préoccupation et le niveau de préparation des répondants du secteur routier dans 21 pays, a révélé que ceux-ci s'inquiètent à la fois de l'augmentation et de la diminution des précipitations. De fortes précipitations peuvent nuire à l'intégrité des structures des chaussées et nécessiter des restrictions de charge, occasionner des glissements de terrain et des fermetures de routes, tandis que des sécheresses peuvent assécher les sous-couches et nuire à la durabilité des chaussées. Les pays côtiers s'inquiètent également de la montée du niveau des mers qui, alliée à des ondes de tempête, peut causer des inondations et des fermetures de routes. En outre, des préoccupations ont été évoquées concernant la fréquence accrue des cycles de gel-dégel, qui pourrait conduire à des soulèvements de chaussées par le gel, à une fissuration et à la formation de nids de poule. Enfin, des inquiétudes sont exprimées eu égard à des températures plus élevées qui pourraient accroître les phénomènes d'orniérage et de ressuage des enrobés bitumineux pendant les vagues de chaleur.

Des orientations sont données sur les procédures d'évaluation des risques et de la vulnérabilité. Cinq étapes principales sont proposées: (i) identification des effets éventuels des changements climatiques; (ii) évaluation des incidences des changements climatiques sur les chaussées routières; (iii) évaluation des risques et identification des solutions et stratégies possibles pour remédier aux facteurs de vulnérabilité; (iv) mise en œuvre de plans et de stratégies d'adaptation efficaces (v) suivi et évaluation des mesures. En outre, le rapport suggère des moyens pour améliorer les compétences d'encadrement nécessaires. D'autres questions sont abordées: les implications pour l'action publique en réponse aux incidences possibles des changements climatiques, la gestion de l'incertitude et des risques, l'adaptation des règles de conception et des spécification, la gestion de la circulation et la sécurité.

Les principales conclusions du rapport sont les suivantes:

- Les effets à court et long terme des changements climatiques pourraient nécessiter des travaux plus fréquents d'entretien, de réfection et de reconstruction, qui auront des répercussions sur le budget des propriétaires et exploitants de réseaux routiers.
- Les propriétaires et exploitants de réseaux routiers devraient mettre en place une démarche systématique pour définir les risques et en évaluer les conséquences au niveau de leur réseau, et élaborer des stratégies pour atténuer ces risques au meilleur rapport coût-efficacité, en appliquant des modèles de prévision des coûts qui intègrent les scénarios des changements climatiques.
- Il conviendrait d'appliquer, en lien avec les projections les plus récentes sur les changements climatiques, la méthode des analogues pour mieux connaître les solutions techniques possibles qui pourraient être empruntées ailleurs.
- Il convient de faire une distinction entre infrastructures existantes et nouvelles. Les résultats des analyses de risques peuvent suggérer des actions concernant la conception d'infrastructures nouvelles qui nécessitent une attention immédiate (le redimensionnement des systèmes d'évacuation des eaux pluviales, par exemple). Pour ce qui est des infrastructures existantes et dans l'hypothèse où le climat n'évoluerait que progressivement, les stratégies d'adaptation pourraient être échelonnées dans le temps, à l'occasion des travaux d'entretien et de réfection périodiques des réseaux routiers, par exemple.
- Outre qu'il faut préserver la valeur des infrastructures routières, la sécurité des usagers et des travailleurs de la route devrait être une question prépondérante dans les évaluations des risques climatiques et dans les stratégies de réponse.
- En plus d'adapter les règles et cahiers des charges pour la conception de chaussées routières nouvelles et performantes, les réponses opérationnelles aux phénomènes climatiques extrêmes pourraient également devoir être améliorées afin de réagir efficacement aux situations d'urgence, d'imposer les limitations de tonnage nécessaires, d'évacuer les débris/détourner le trafic et de mettre en place des stratégies de communication performantes pour informer les usagers.

Le rapport conclut que dans les régions qui sont vulnérables aux changements climatiques, les répercussions pour les coûts d'exploitation des réseaux ainsi que pour les usagers pourront être notables. Il convient de poursuivre sans délai les efforts de planification des effets climatiques déjà connus et de ceux qui sont prévisibles.

I.4. Les répercussions des phénomènes météorologiques, du climat et des changements climatiques sur la sécurité ferroviaire (RSSB, 2003)

Ce rapport a été demandé par le Conseil de la sécurité et des normes ferroviaires (RSSB), dans le cadre du programme de recherche sur la sécurité ferroviaire. L'étude a pour principal objet d'aider les membres du Groupe des chemins de fer à mieux comprendre les répercussions que les changements climatiques peuvent avoir sur leur fonctionnement. L'étude avait vocation à: (i) faire un état des lieux des connaissances sur les incidences des changements climatiques sur la sécurité ferroviaire et pointer les lacunes dans ce domaine; (ii) définir les travaux à réaliser pour combler ces lacunes; (iii) préciser les travaux nécessaires pour déterminer les modalités de réponse du secteur ferroviaire aux menaces que font planer les changements climatiques.

Le rapport présente: (a) une synthèse des informations et des travaux de recherche actuels, qui met en lumière les dernières évolutions de la recherche mondiale, régionale et locale, sur le climat; (b) la documentation et les bases de données dont disposent Network Rail et RSSB; (c) une analyse qualitative des effets des scénarios de changements climatiques envisagés sur l'infrastructure ferroviaire. Le rapport dresse également, à titre de références, une liste de personnes, d'organisations, de sites web, de rapports et de bases de données traitant de la question des changements climatiques.

Les éléments particulièrement intéressants de la réponse du RSSB sont détaillés ci-après, à toutes fins utiles:

S'il existe des incertitudes autour des changements climatiques, le RSSB estime que le programme UKCIP (UK Climate Impacts Program) fournit une série d'hypothèses plausibles. Les projections empruntées à ce programme ont été établies pour la décennie 2080, c'est-à-dire à la fin de la durée de vie théorique de la plupart des infrastructures existantes. Les principales prévisions reprises sont les suivantes:

- Hausse des températures moyennes d'au moins 1 à 2°C;
- Diminution des précipitations de 5 à 15 % globalement, mais avec des épisodes pluvieux plus intenses en hiver et moins intenses en été et éventuellement, des précipitations plus extrêmes;
- Augmentation des vitesses de vent moyennes de 4 à 10 %, avec une augmentation possible du nombre de phénomènes météorologiques violents;
- Montée de 0,2 à 0,6 m du niveau des mers, selon le scénario d'émissions et le rythme d'inclinaison NO/SE du sol au Royaume-Uni.

Le rapport renferme des informations d'ordre qualitatif sur les effets probables de ces changements. Il est admis que les principales infrastructures vulnérables aux changements climatiques sont:

- Les voies ferrées (vulnérables aux températures extrêmes);
- Les ouvrages de terrassement (vulnérables aux précipitations extrêmes);
- Les systèmes d'évacuation des eaux pluviales (vulnérables aux précipitations extrêmes);
- Les équipements des lignes électriques aériennes (vulnérables aux vents extrêmes);
- Les digues de protection des côtes et des estuaires (vulnérables à la montée du niveau des mers).

Le rapport fait observer qu'en raison des nombreux travaux de recherche menés sur la météorologie, le climat et les changements climatiques, il est difficile de pointer précisément les lacunes dans les connaissances plus susceptibles de concerner l'infrastructure ferroviaire. Toutefois, celles-ci sont recensées principalement dans les domaines suivants:

- L'incertitude des prévisions futures (qui varie en fonction des éléments météorologiques);
- La probabilité d'une fréquence et d'une intensité accrues des phénomènes extrêmes;
- Les travaux en lien direct avec le secteur ferroviaire;
- Les incidences possibles de la montée du niveau des mers, qui devraient, selon les prévisions, être considérables et aggravées, dans certaines régions, par l'inclinaison NO/SE continue du sol au Royaume-Uni et par les ondes de tempête.

On notera que certains sites ferroviaires pourraient être touchés plus que d'autres par les changements climatiques. Il conviendra de les identifier systématiquement.

Recommandations pour l'action future

L'infrastructure ferroviaire et le matériel roulant sont en général solides, mais l'exploitation des trains peut néanmoins être affectée par des conditions climatiques extrêmes. Bien que ces risques soient généralement limités, il est probable qu'ils ne sont pas suffisamment mineurs pour être considérés comme négligeables, en particulier si la fréquence et l'intensité des phénomènes météorologiques extrêmes augmente. Il y a donc matière à de plus amples recherches.

Il faudrait établir des liens plus formels entre RSSB et les administrations et organismes de recherche concernés (avec l'Agence pour l'environnement, par exemple, et le Ministère de l'environnement, de la pêche et des affaires rurales – DEFRA) pour faire le point en continu sur les travaux en cours au niveau national. Le secteur bénéficierait pour y trouver davantage car RSSB serait alors en mesure d'influer davantage sur les spécificités de ces travaux et leur logique. Il conviendrait aussi de resserrer les liens avec les acteurs qui travaillent sur la réduction des émissions de gaz à effet de serre (gaz à effet de serre) dans le transport ferroviaire et sur d'autres questions de développement durable. RSSB pourrait servir de plate-forme d'information sur les changements climatiques à l'intention des membres du Groupe des chemins de fer.

Il est admis que la démarche la plus constructive pour aller de l'avant est de commencer par quantifier les changements que les phénomènes météorologiques extrêmes pourraient induire pour la sécurité et les retards de circulation. Les éléments ci-après devraient être pris en compte à cet effet:

- Les différents types d'infrastructures et leur degré de dispersion (voies, systèmes d'évacuation des eaux pluviales, lignes électriques aériennes, etc.);
- L'analyse rétrospective chiffrée des retards occasionnés par des incidents climatiques;
- Les valeurs actuellement appliquées dans le modèle de risques de RSSB aux facteurs précurseurs d'événements dangereux et les prévisions du préjudice humain en résultant;
- Les meilleures estimations chiffrées des évolutions probables dans les phénomènes extrêmes, à partir des niveaux d'intervention actuels dans le secteur (température de l'air, niveau de crue, vitesse des rafales de vent).

Les évaluations des résultats en termes de sécurité pourraient reposer sur les méthodes et les modèles actuellement élaborés pour évaluer les effets du vandalisme sur la sécurité ferroviaire. Il conviendrait d'engager des projets de recherche spécifiques sur les

changements climatiques pour: (a) mieux comprendre les effets de ces changements sur la végétation en bordure des voies; (b) mettre plus clairement en évidence la manière dont la montée du niveau des mers affectera le plus vraisemblablement les sites ferroviaires. Il conviendrait également d'étudier comment le secteur ferroviaire pourrait le mieux contribuer à l'atténuation des changements climatiques prévus, éventuellement en lien avec d'autres entreprises de transport.

Les propositions ci-dessus sont considérées comme un moyen efficace pour faire progresser la recherche, en fournissant plus d'évaluations chiffrées des effets probables des changements climatiques sur la sécurité et en acquérant des connaissances plus précises dans certains domaines. À plus long terme, le secteur ferroviaire pourrait contribuer à atténuer les effets des changements climatiques prévus, par exemple en abordant les questions du développement durable. Les résultats de ces travaux ultérieurs pourraient, par exemple, aider les membres du Groupe des chemins de fer à déterminer comment gérer au mieux les actifs ferroviaires existants, s'il serait utile de réviser le cadre normatif pour la construction des nouvelles infrastructures et comment adapter au mieux l'exploitation.

1.5. Tour d'horizon des effets des changements climatiques sur le secteur ferroviaire (Baker et al., 2010)

Cet article examine le rôle que les chemins de fer pourraient jouer dans la réduction des émissions globales de gaz à effet de serre et s'intéresse aux effets des changements climatiques sur le fonctionnement du transport ferroviaire au Royaume-Uni, au cours des prochaines décennies, et aux mesures d'adaptation qui seront nécessaires. Certaines des grandes questions évoquées sont présentées ci-après.

Des étés chauds et secs devraient avoir des effets sur le réseau ferroviaire national, notamment: (i) des phénomènes accrus de flambage des voies; (ii) un dessèchement des ouvrages de terrassement de voies; (iii) des sollicitations supplémentaires des systèmes de climatisation; (iv) des difficultés supplémentaires pour ventiler les réseaux ferroviaires souterrains; (v) la multiplication des problèmes de chute de feuilles, du fait d'un allongement des périodes de végétation. La plupart de ces questions sont considérées comme étant bien comprises sur le plan technique.

Des hivers chauds et humides plus nombreux pourraient avoir des effets négatifs sur le réseau ferroviaire national, notamment: (i) des inondations du réseau plus fréquentes et des contraintes supplémentaires sur les systèmes d'évacuation des eaux pluviales; (ii) l'instabilité des ouvrages de terrassement et des accotements gorgés d'eau; (iii) des problèmes de circuits de voies. Mais ils pourraient avoir aussi certains effets bénéfiques, notamment une diminution des incidents occasionnés par la neige, le gel et les températures très basses. La plupart de ces questions sont, comme il a été dit, bien comprises sur le plan technique. Des voix s'élèveront toujours pour accroître le niveau de protection contre les inondations et il faudra trouver un équilibre entre le coût de cette protection supplémentaire et des travaux d'amélioration des systèmes d'évacuation des eaux pluviales et celui, parfois considérable, des crues elles-mêmes.

L'article relève que les effets d'une fréquence accrue des phénomènes extrêmes, en particulier, des précipitations intenses et des vents extrêmes, sur le réseau ferroviaire ne sont, au fond, qu'une escalade des effets des phénomènes extrêmes actuels. Les effets de vents violents sont les suivants: (i) un risque accru de décâblage; (ii) un risque accru de

déraillement des rames; (iii) des accidents ou des interruptions de circulation en raison de chutes d'arbres ou de débris sur les voies. Ces effets ont été plus ou moins étudiés, certains à fond, mais le plus souvent dans le cadre d'une évaluation des risques d'accident pendant le processus de conception, plutôt que dans celui d'une réflexion liée aux changements climatiques. Il a été également établi qu'une montée de seulement 0,3 à 0,4 m du niveau de la mer pourrait avoir de sérieuses conséquences pour le réseau ferroviaire dans les estuaires et sur les côtes. La nécessité de mieux protéger les liaisons souterraines, comme le métro londonien, est évidente, notamment parce que le niveau de protection assuré par le système anti-crués actuel (par la première barrière de la Tamise, par exemple) devrait diminuer notablement au cours des prochaines décennies.

L'article relève en outre que si les questions techniques sont plutôt bien maîtrisées, il manque un cadre global pour quantifier les incidences probables sur le secteur ferroviaire, de même qu'une méthode de hiérarchisation permettant de décider quels sont les effets les plus critiques auxquels il convient d'allouer en priorité des ressources.

En conclusion, l'article affirme qu'eu égard aux effets des changements climatiques sur le réseau ferroviaire, un modèle systémique est nécessaire pour évaluer correctement les risques majeurs que font peser les changements climatiques sur le fonctionnement des chemins de fer et établir des priorités dans l'emploi des ressources. Il est également fait mention du champ et de l'objet de certaines études en cours. L'article relève, en outre, qu'il convient d'évaluer les incidences possibles d'une altération majeure des aléas météorologiques sur l'ensemble des modes de transport, pas seulement sur le rail. À cet effet, les auteurs écrivent: *«Une telle évaluation doit être guidée par les avantages économiques d'un réseau de transport national performant, par les coûts des interruptions de trafic et par la conjonction entre la durée de vie de nombreuses évolutions à court terme dans les infrastructures et l'horizon dans lequel s'inscrivent les changements climatiques. Il convient également de prendre en considération l'évolution technologique du réseau de transport lui-même. Les incidences des changements climatiques ne sont pas simplement fonction des événements climatiques, mais aussi de la vulnérabilité du réseau. Par ailleurs, toute nouvelle évaluation des incidences des changements climatiques est entachée d'une sérieuse faiblesse si elle se contente de postuler par défaut que les changements climatiques à venir se produiront dans un monde où la société et l'économie sont celles d'aujourd'hui. Cependant, les déterminants de la demande de transport ne sont pas très bien connus, et encore moins leur vulnérabilité aux changements climatiques».*

1.6. Projet ARISCC d'adaptation de l'infrastructure ferroviaire aux changements climatiques (Nolte et al., 2011)

L'IZT (Institut d'études prospectives et d'évaluation technologique) a analysé un scénario d'adaptation aux changements climatiques pour le compte de l'Union internationale des chemins de fer (UICV), en collaboration avec quelques-unes des plus grandes entreprises ferroviaires européennes (voir www.ariscc.org), dans le cadre du projet ARISCC.

Le projet UIC-ARISCC avait pour but de préparer l'infrastructure ferroviaire aux risques météorologiques et climatiques. Le postulat premier du projet ARISCC est que les chemins de fer ont une durée de vie très longue (et sont construits pour résister à des risques naturels, tels que celui de crue centennale estimé au stade de la conception) et qu'il est probable que l'accroissement, sous l'effet des changements climatiques, de la fréquence et de l'intensité des phénomènes extrêmes mette à l'épreuve la capacité de résistance du système ferroviaire et en majore les coûts.

L'une des principales conclusions du projet est que les mesures d'adaptation doivent s'inscrire dans un cadre intégré de gestion des risques naturels. Un tel cadre doit être à même non seulement d'anticiper les difficultés et les discontinuités d'aujourd'hui liées aux phénomènes météorologiques, mais aussi d'étudier et de concevoir des mesures d'adaptation aux changements climatiques à moyen et long terme. Seules les solutions qui remédient aux dysfonctionnements quotidiens actuels des chemins de fer sont mises en œuvre. Ainsi que le montrent la majorité des exemples de bonnes pratiques, s'inspirer de systèmes de gestion qui traitent déjà des incidences météorologiques et climatiques d'aujourd'hui est, sans doute, le meilleur moyen de constituer un cadre d'adaptation fonctionnel; ainsi que l'ont confirmé des entretiens avec des spécialistes, les programmes d'adaptation aux changements climatiques qui n'ont aucun lien avec le fonctionnement quotidien actuel de l'activité ferroviaire n'auront guère de chances d'être appliqués.

Les résultats du projet sont les suivants: (i) actualisation et élargissement de l'enquête actuelle sur le stade de préparation des chemins de fer européens aux changements climatiques; (ii) production d'un guide sur la gestion intégrée des aléas naturels; (iii) recueil d'un grand nombre de cas de bonnes pratiques; (iv) deux monographies faisant appel à des modèles climatiques régionaux pour calculer les charges climatiques futures dans la région et les facteurs actuels de vulnérabilité dans les infrastructures ferroviaires.

Le guide ARISCC sur la gestion intégrée des risques naturels à l'intention des gestionnaires des infrastructures ferroviaires aborde les thématiques suivantes: (1) informations et alertes météorologiques; (2) consignation par écrit des événements survenus et évaluation; (3) cartographie des aléas naturels; (4) suivi et consignation par écrit de l'état des infrastructures; (5) cartographie des points de vulnérabilité; (6) évaluation et gestion des risques; (7) modèles climatiques régionaux et calculs des charges climatiques futures; (8) recommandations pour les mesures d'adaptation.

Le rapport énonce une série de recommandations, générales ou spécifiques, parmi lesquelles:

- Sans une stratégie d'adaptation et des mesures dans ce sens, la résilience actuelle de l'infrastructure ferroviaire pourrait se révéler insuffisante dans un proche avenir. En conséquence, il est recommandé d'élaborer une stratégie active pour mettre systématiquement en place des capacités d'adaptation. Cette stratégie doit fixer des objectifs et des mesures à court et long terme et tenir compte des contraintes économiques. Elle doit être inspirée par trois principes: préparation et résilience aux catastrophes, et redressement post-catastrophe.
- À titre d'option de court à moyen terme, les spécifications techniques doivent être revues pour améliorer la résilience des réseaux ferroviaires, y compris l'efficacité des systèmes d'évacuation des eaux pluviales et de la protection contre les inondations et contre les vagues de chaleur. Il ne s'agit pas de viser certains actifs ferroviaires en particulier, mais d'améliorer la résilience globale de l'infrastructure.
- Une base de données bien structurée et intégrée pour la gestion de l'infrastructure, la maintenance programmée, les interruptions de service, les données de réseau numérisées et les incidents, constitue le cœur de tout système efficace de gestion des aléas naturels. S'agissant du fonctionnement actuel du réseau, les mesures d'adaptation aux changements climatiques doivent être intégrées à la maintenance programmée courante. Pour ce qui est des projets futurs, les mesures d'adaptation seront intégrées dans la conception de l'infrastructure. Cette intégration peut se faire aux premiers stades du processus de planification actuel. Il existe tout un éventail de

mesures d'adaptation pratiques, depuis les systèmes d'alerte et de contrôle jusqu'à l'amélioration des normes de maintenance, au renforcement des structures de protection et à l'évolution du cadre normatif. La hiérarchisation des mesures et leur combinaison optimale pour un projet ou une liaison ferroviaire donnés dépendent de multiples facteurs tels que le type d'infrastructures, l'horizon temporel, l'importance de la liaison, les contraintes financières, le rapport coûts-avantages, etc. Les mesures non axées sur l'infrastructure comme le contrôle en temps réel des sections de réseau vulnérables et les systèmes d'alerte rapide présentent parfois des avantages bien supérieurs à leur coût, comparativement à des solutions techniques qui les sont davantage.

- Le déploiement d'un système de gestion intégrée des aléas naturels commence comme un processus de développement de capacités pour adapter l'entreprise ferroviaire aux changements climatiques. Ce processus a tout à gagner d'une meilleure transmission des informations et de la connaissance.

1.7. Incidences des changements climatiques en particulier sur l'infrastructure routière et ferroviaire (CE, 2012a)

Ce rapport (préparé par le Centre commun de recherche CCR-IPTS de la Commission européenne) constitue la première évaluation, à l'échelle de l'Union européenne, de la vulnérabilité prévisible des réseaux de transport aux changements climatiques et s'intéresse en particulier à l'infrastructure routière et ferroviaire. Il passe en revue les différents types d'incidences climatiques qui devraient accroître le stress climatique des réseaux de transport, et évalue les risques et dommages éventuels, compte tenu d'évolutions climatiques plausibles obtenues par modélisation pour différents scénarios. Quatre études de cas ont été retenues. L'analyse a porté sur l'exposition future, la vulnérabilité et l'adaptation, eu égard à différents aspects des changements climatiques (précipitations extrêmes et inondations, stress thermique, montée du niveau des mers) et à différents types d'infrastructures (routes, voies ferrées, ponts). La cohérence a été systématique entre les méthodes et indices d'évaluation des risques (température maximale de chaussée sur 7 jours, nombre de jours au-delà des seuils critiques pour évaluer les phénomènes de flambage de voies, risques d'inondation, etc.). Les régions et infrastructures exposées aux risques – ou infrastructures essentielles – ont été identifiées et une cartographie en a été établie.

Enfin, il a été procédé à une analyse technico-économique à l'échelle de l'UE en combinant différents types d'informations et de projections, notamment:

- Données climatiques et facteurs de stress (température de voies et de chaussées, précipitations extrêmes);
- Informations sur les transports pour les 27 États membres de l'UE (infrastructures, réseaux, activité de transport, modèle prévisionnel TRANSTOOL, cartes numériques TELEATLAS, SIG GISCO);
- Informations et projections physiques (montée du niveau des mers, ondes de tempête et hauteurs de vagues, données de topographie côtière (DIVA), données hydrologiques (CRR/Institut de l'environnement et du développement durable – IES), données pédologiques (base de données ESDB));
- Données techniques et informations sur les dégradations sous-jacentes et les mécanismes d'endommagement, les pratiques de maintenance et les coûts (principalement à partir de sources d'information de l'UE et des États-Unis).

Ci-après quelques-unes des conclusions de cette étude:

- Le stress climatique représente 30 à 50 % des coûts actuels d'entretien des routes en Europe (soit 8 à 13 milliards d'euros par an); 10 % de ce montant (soit 0,9 milliard d'euros/an) est lié aux seuls phénomènes météorologiques extrêmes, en particulier à de fortes précipitations et inondations.
- Au niveau global de l'UE-27, la dégradation future des réseaux routiers, du fait des variations dans les précipitations moyennes, ne progressera que légèrement; toutefois, les pluies et inondations pronostiquées pour différentes régions européennes devraient entraîner un surcoût (de 50 à 192 millions d'euros/an pour la période 2040-2100 – scénario A1B), tandis que l'on prévoit par ailleurs une diminution des coûts d'entretien en raison d'une plus grande douceur prévisible des hivers dans certaines régions.
- La hausse moyenne des températures pourrait nécessiter des changements dans les opérations et pratiques d'entretien et entraîner un surcoût pour les mesures d'adaptation.
- Les changements climatiques se traduiront par une hausse des températures moyennes et par des extrêmes de températures élevées plus fréquents, ce qui pourrait accroître le risque de déformation et de flambage des voies ferrées, endommager le matériel roulant et entraîner des limitations de vitesse.
- Des épisodes plus fréquents de précipitations extrêmes sont prévus dans plusieurs régions d'Europe; ces derniers devraient avoir des incidences sur l'infrastructure routière, multiplier les risques d'affouillement des piles de ponts et d'instabilité des remblais et des accotements et accroître le nombre d'accidents.
- Les coûts des mesures d'adaptation routière (chaussées et ponts), selon le scénario A1B, ont été estimés de 314 à 560 millions d'euros/an; les coûts des dommages qui pourraient être évités grâce à ces mesures d'adaptation pourraient être plusieurs fois supérieurs (ainsi, le coût d'un effondrement de pont pourrait être de 2 à 10 fois supérieur au coût de l'ouvrage lui-même).
- Il a été constaté que les limitations de vitesse, qui sont les mesures les plus couramment appliquées pour atténuer le risque de déraillement en cas de déformation des voies par flambage sous l'effet de la chaleur, n'occasionnent que des retards et des coûts supplémentaires mineurs; dans l'hypothèse où les pratiques d'entretien resteraient inchangées, les surcoûts résultant d'étés plus chauds seraient de 20 à 28 millions d'euros/an à l'horizon 2040-2070, et d'environ 50 à 130 millions d'euros/an à l'horizon 2070-2100, ces chiffres ne variant que très peu quel que soit le scénario d'émissions.
- Il pourrait se révéler nécessaire, dans les prochaines décennies, de protéger les piles de ponts, à hauteur d'environ 20 % du parc total, afin d'atténuer les risques d'affouillement liés à l'accroissement du débit des cours d'eau; les coûts prévisibles de ces mesures de protection ont été estimés entre 0,38 et 0,54 milliard d'euros/an (80 % de ponts routiers et 20 % de ponts ferroviaires)²⁵.

Dans l'hypothèse d'une élévation du niveau des mers d'un mètre, 5 400 kilomètres de routes côtières en Europe (soit 4 % environ du réseau routier côtier) seraient menacés d'un risque d'inondation permanente ou temporaire, les pays ou régions de faible altitude (Pays-Bas, Belgique, nord de l'Allemagne, par exemple) étant exposés à un risque plus important;

²⁵ Il est intéressant d'observer que les coûts estimés dans l'UE-27 sont bien inférieurs (de deux à trois fois) à ceux estimés aux États-Unis (voir étude I.13 [Wright et al., 2012]). La raison tient peut-être à des différences de taille et d'autres particularités de ces parcs entre l'UE et les États-Unis.

compte tenu d'un coût moyen de 6 millions d'euros/kilomètre pour la reconstruction d'une route, la valeur totale des actifs routiers menacés d'inondation permanente a été estimée à 18,5 milliards d'euros.

I. 8. Changements climatiques et navigation: transport par voie d'eau, ports et voies navigables (AIPCN, 2006)

Cette étude passe en revue les incidences des changements climatiques sur la navigation maritime et fluviale, notamment la montée du niveau des mers, l'action des vents et des vagues, la propagation des ondes de tempête, les tempêtes, la circulation des océans, l'état des glaces, l'alimentation en eau fluviale et sa qualité, les situations hydrologiques extrêmes et enfin, l'hydrodynamique et la morpho-dynamique sur les côtes et dans les estuaires et les cours d'eau. Les mesures d'adaptation et d'atténuation possibles sont répertoriées. L'étude examine le rôle de la navigation dans les émissions de gaz à effet de serre et les possibilités qui s'offrent de contribuer à la réduction des émissions de gaz à effet de serre anthropiques et d'autres polluants grâce à l'utilisation d'autres énergies.

S'agissant de la navigation fluviale, le rapport fait observer que ce secteur est plus capable que le secteur maritime de réagir aux facteurs déterminants des changements climatiques car, très souvent, il existe une infrastructure appropriée pour contrôler le débit des cours d'eau. Dans le même temps, il semble que des facteurs politiques, sociaux et environnementaux complexes influent sur l'équilibre à trouver entre le cahier des charges de la navigation fluviale et la concurrence des besoins d'alimentation en eau, de maîtrise des crues, de production hydro-électrique et d'irrigation.

En vertu de ce rapport, les précipitations et la température de l'air sont les principaux facteurs de changements climatiques qui influent directement sur la navigation fluviale: ces facteurs, et leurs effets, sont examinés plus avant. Le rapport indique que les effets des changements climatiques sur les cours d'eau, les chenaux et les canaux peuvent être atténués en modifiant le contrôle des flux d'opérations et/ou les chenaux. Il est précisé, notamment, que les modifications opérationnelles correspondantes nécessitent une analyse juridique et environnementale car il existe des liens et une concurrence entre la navigation fluviale et les autres usagers des voies navigables. L'intérêt des mesures de contrôle des crues, d'une modification des pratiques actuelles de maintenance (stabilisation des chenaux et des berges, dragage, etc.) et d'un renforcement de l'automatisation est également examiné.

Le rapport conclut sur l'idée que certaines mesures d'adaptation impliqueront des investissements supplémentaires et/ou entraîneront une hausse des coûts d'exploitation (et pourraient se heurter à des contraintes économiques ainsi qu'à des limites juridiques et/ou techniques). Aussi les coûts et avantages de chaque mesure susceptible de constituer la panoplie devront-ils être évalués soigneusement.

I.9. Risques climatiques et activité portuaire – Terminal Marítimo Muselles el Bosque, Carthagène, Colombie (Stenek et al., 2011)

Cette étude a été réalisée à la demande de la Société financière internationale (SFI) dans le but de développer les connaissances, les outils et les méthodes pour l'analyse des risques et des opportunités et l'évaluation des mesures d'adaptation, en s'intéressant en particulier au cas du *Terminal Marítimo Muelles El Bosque* (MEB), à Carthagène, en Colombie. L'étude analyse les risques et opportunités des changements climatiques auxquels est exposé le port de *Muelles el Bosque*, client de la SFI, et fournit une analyse quantitative des incidences climatiques et des mesures d'adaptation correspondantes. Si l'étude s'intéresse en particulier à ce port, elle analyse également brièvement la manière dont les changements climatiques pourraient affecter les autres ports de Colombie et d'ailleurs. Le rapport relève que les infrastructures et les activités de transport comptent parmi les secteurs les plus exposés aux changements climatiques et que ceux-ci sont essentiels à la bonne santé économique, à la croissance et au développement des pays. Les ports jouent un rôle primordial dans l'économie mondiale puisqu'ils permettent d'acheminer par mer pas moins de 80 % des marchandises échangées dans le monde, cependant que les ports des pays en développement traitent plus de 40 % du trafic conteneurisé total dont une part non négligeable correspond à des exportations de marchandises produites dans le pays. Aussi les effets des changements climatiques sur les infrastructures portuaires auront-ils probablement des répercussions socio-économiques bien plus vastes.

Ci-après quelques-unes des conclusions de cette étude:

- (a) En règle générale, les infrastructures et les activités portuaires présentent un haut niveau de vulnérabilité aux changements climatiques. Les changements climatiques pourraient: (i) modifier le niveau ou les itinéraires de la navigation maritime; (ii) accroître les inondations et compromettre ainsi le bon fonctionnement des ports et le stockage des marchandises; (iii) réduire la navigabilité des chenaux d'accès; (d) avoir d'autres conséquences sur l'activité. Toutefois, les ports capables de résister aux perturbations dues à certains événements météorologiques et climatiques pourraient en tirer des avantages commerciaux. En outre, un relèvement des températures peut bénéficier aux infrastructures portuaires situées dans des régions froides en allongeant la saison des expéditions maritimes. Pour bien comprendre l'importance des risques liés aux changements climatiques pour un port en particulier, il convient d'analyser les clés de sa réussite et d'évaluer les incidences climatiques en tenant compte des facteurs de vulnérabilité, des seuils critiques et des projections de changements climatiques.
- (b) L'analyse réalisée aux fins de l'étude a montré que les incidences des changements climatiques sont plus ou moins importantes, même s'il existe des risques essentiels que tous les ports doivent prendre en considération. On observera des différences considérables dans la nature et le niveau des risques et opportunités liés aux changements climatiques entre les différents ports selon qu'ils se situent dans des zones exposées aux cyclones tropicaux ou subtropicaux, par exemple, ou dans des zones de pergélisol. Par ailleurs, il existe une grande variabilité entre les ports selon leur fonction. Les effets des changements climatiques sur les ports affectés à la manutention de marchandises et à l'entreposage pourraient être très différents des effets exercés sur les ports qui assurent exclusivement des services de pilotage, de navigation et de dragage, et sur les ports de croisière et de transport de passagers.

- (c) L'analyse réalisée pour le cas étudié a montré que les changements climatiques peuvent avoir d'importantes répercussions économiques. Même s'il est probable que les risques analysés dans cette étude de cas sont propres au port étudié, certains pourraient tout de même présenter un grand intérêt pour l'ensemble du secteur.

À partir des résultats de l'étude du port de Muelles el Bosque et d'un examen exhaustif des publications sur le sujet, une liste de contrôle a été préparée pour aider les opérateurs portuaires à identifier les risques climatiques et les solutions d'adaptation possibles:

- Classer les risques d'incidence et les opportunités liés aux changements climatiques en fonction des principales opérations effectuées dans les ports de fret (navigation, stationnement, transbordement de marchandises, etc.) et d'autres facteurs de performances portuaires comme la demande, l'existence de garanties d'assurance et les performances environnementales et sociales.
- Donner une idée d'ensemble des facteurs de sensibilité aux changements climatiques et des seuils applicables aux ports de fret en général, et esquisser les grandes lignes de certaines incidences plus spécifiques aux infrastructures portuaires situées dans tel ou tel environnement (dans les régions tropicales, les régions polaires, etc.).
- Fournir une liste de mesures d'adaptation susceptibles de constituer, pour les opérateurs, une réponse aux risques et opportunités liés aux changements climatiques: il s'agit de mesures qui aident à constituer les capacités d'adaptation requises, comme l'amélioration du contrôle des incidences des changements climatiques, et du déploiement de mesures d'adaptation physiques comme la modification de l'infrastructure portuaire.

I.10. Les réseaux de transport résilients du futur (FUTURENET): Une évaluation de la sécurité des réseaux de transport face aux changements climatiques (Bouch et al., 2012)

L'étude repose sur le postulat suivant: même si les réseaux de transport vont se trouver confrontés à la menace grandissante des changements climatiques, il n'est pas réaliste de vouloir identifier et protéger la totalité des infrastructures vulnérables. L'étude propose une démarche autre, fondée sur une évaluation de la résilience des réseaux. Elle propose, en conséquence, d'élaborer une méthodologie d'évaluation de cette résilience.

Le projet FUTURENET est un projet de recherche multidisciplinaire mené en partenariat, qui a pour but d'élaborer une méthodologie suffisamment généraliste pour être appliquée à tous les réseaux de transport. Le projet se fonde sur les changements climatiques pronostiqués pour 2050 et évalue leurs incidences sur les principaux modes de transport, à savoir la route, le rail et l'air. Il comporte un certain nombre de volets: (i) analyse de l'influence que les changements climatiques pourraient avoir sur la demande et les comportements de mobilité; (ii) modélisation des modes de défaillance des transports, des facteurs déclencheurs et des seuils; (iii) simulation et application de phénomènes climatiques et météorologiques aux réseaux de transport en vue d'étudier leur vulnérabilité; (iv) développement d'une méthodologie d'évaluation de la résilience des réseaux; (v) application des techniques de l'analyse système à ce développement.

I.11. Initiative de l'Union européenne pour l'intégration des réseaux transeuropéens de transport (RTE-T)

L'infrastructure de transport est une condition préalable fondamentale au bon fonctionnement et à l'intégration du marché intérieur de l'Union européenne. L'UE-27 totalise 5 millions de kilomètres de chaussées revêtues (dont 65,1 milliers de kilomètres d'autoroutes), 212,8 milliers de kilomètres de voies ferrées (dont 110,5 milliers de kilomètres de voies électrifiées) et 42,7 milliers de kilomètres de voies fluviales navigables. L'investissement total dans les infrastructures de transport s'est établi à 859 milliards d'euros entre 2000 et 2006. Étant donné que ces infrastructures ont été développées en majorité en vertu de politiques nationales, il est nécessaire de mettre en place un réseau multimodal unique, qui intègre le transport terrestre, maritime et aérien. Aussi une politique de réseaux transeuropéens de transport a-t-elle été conçue pour mettre en place les maillons manquants de ces réseaux, éliminer les goulets d'étranglement et garantir la viabilité future des réseaux en prenant en considération les besoins d'efficacité énergétique et les enjeux des changements climatiques. C'est dans ce contexte qu'a été créée, en 2006, l'Agence exécutive du réseau transeuropéen de transport (AE RTE-T) pour gérer les grands projets d'infrastructure, en étroite collaboration avec la Direction générale de la mobilité et des transports de la Commission européenne. L'Agence assure la gestion et la mise en œuvre du programme RTE-T, qui bénéficie du soutien financier de l'UE (*via* le programme RTE-T, le Fonds de cohésion, le Fonds européen de développement régional (FEDER) et les prêts et garanties accordés par la Banque européenne d'investissement).

Les besoins d'investissement pour achever et/ou moderniser les réseaux transeuropéens de transport, d'un montant considérable, ont été estimés à plus de 1,5 milliard de milliards d'euros pour la période 2010-2030. Le réseau RTE-T a besoin d'environ 550 milliards d'euros d'ici 2020 (dont 215 milliards pour éliminer les goulets d'étranglement). Compte tenu de l'ampleur de ces investissements, une meilleure coordination de la planification et du développement des réseaux est nécessaire au niveau européen, en étroite collaboration avec les autorités nationales. À partir des propositions des États membres, 30 axes et projets prioritaires (PP) ont été identifiés et figurent dans les orientations de l'Union européenne à titre de projets d'intérêt européen. Ces projets devront avoir été menés à terme d'ici 2020. Ils concernent en majorité le rail et le transport combiné rail-route; deux portent sur des axes fluviaux et un, sur le transport maritime. Cinq de ces projets prioritaires, de grande envergure, sont d'ores et déjà achevés (PP5-2007, PP9-2001, PP10-2001, PP11-2000 et PP14-2009, voir http://tentea.ec.europa.eu/en/ten-t_projects/30_priority_projects/).

Il est intéressant d'observer que bien que l'action menée cherche à garantir la viabilité future des réseaux de transport en prenant en considération les enjeux des changements climatiques, il semble que l'évaluation de ces enjeux et l'étude de mesures d'adaptation ne soient pas des priorités dans ces projets, à l'exception notable de deux d'entre eux qui concernent des voies fluviales (PP18 Axe fluvial Rhin /Meuse-Main-Danube et PP30 Canal fluvial Seine-Escaut). Ces deux projets, classés «projets complexes», visent à relier entre eux tous les grands bassins fluviaux (Rhin/Meuse-Main-Danube, Seine-Escaut) dans le but d'intégrer les voies navigables dans le réseau de transport de l'UE (voir aussi Annexe II). Ces deux projets sont particulièrement sensibles aux variations de niveau des voies fluviales (à cause des inondations et des sécheresses), de sorte que les questions relatives à ces risques, et à l'étude et au déploiement de mesures d'adaptation, sont jugées importantes et traitées en conséquence.

I.12. Changements climatiques, incidences et vulnérabilité dans l'Europe de 2012. Rapport établi à partir d'indicateurs (AEE, 2012)

Ce rapport de l'Agence européenne de l'environnement (AEE), publié en 2012, fait le point sur les changements climatiques passés et futurs et sur leurs incidences en Europe, à partir d'une série d'indicateurs. Il fait suite à deux études de l'AEE (2004 et 2008) sur les incidences des changements climatiques et la vulnérabilité, également réalisées à partir d'indicateurs. Chaque fois que possible, des indicateurs portant sur un large éventail de thématiques et de secteurs sont présentés pour les 32 États membres de l'AEE. Ces indicateurs sont établis à partir de mesures in situ et de télémessures, de projets de recherche nationaux et européens et d'initiatives mondiales. Le rapport évalue en outre la vulnérabilité de la société et de la santé humaine en Europe, ainsi que des écosystèmes, et identifie les régions européennes les plus exposées aux risques liés aux changements climatiques. Est également abordée la question de l'incertitude entourant les indicateurs. La finalité première de ce rapport est de fournir une base de connaissances pour l'élaboration et le déploiement de stratégies et de mesures d'adaptation au niveau national et à l'échelle de l'UE (voir aussi le système de gestion des indicateurs de l'AEE et la plate-forme européenne d'adaptation aux changements climatiques ADAPT: <http://climate-adapt.eea.europa.eu>).

Un chapitre de ce rapport (chapitre 4.6) est consacré aux incidences des changements climatiques sur les services et les infrastructures de transport. Il y est observé que les changements climatiques ont des incidences, pour l'essentiel, négatives, et seulement quelques-unes positives, comme la réduction de la couverture de glace des pôles, qui pourrait permettre l'ouverture de nouveaux itinéraires de transport maritime. Un tableau est proposé, qui recense les principales incidences des changements intervenant dans le régime des températures, des précipitations, du vent, de la foudre et des orages, et les facteurs influant sur la végétation. Les messages clés sont, notamment, les suivants:

Les données sur les incidences climatiques passées sur les réseaux de transport sont limitées, pour l'essentiel, à des phénomènes extrêmes isolés. Leur imputation aux changements climatiques n'est pas simple.

L'offre d'informations sur les risques futurs des changements climatiques pour le transport en Europe s'est améliorée depuis peu grâce à certains projets de recherche de l'UE sur les changements climatiques, les événements météorologiques extrêmes et le transport fluvial.

Les changements climatiques devraient avoir des effets négatifs (mais aussi bénéfiques) sur les réseaux de transport, selon la région, tandis que des projections par mode de transport donnent à penser que les phénomènes météorologiques extrêmes coûteront le plus cher (en pourcentage) au rail et que les régions les plus sérieusement touchées devraient être le Royaume-Uni, l'Europe centrale, la France, l'Europe orientale et la Scandinavie.

Enfin, l'étude fait état de trois grands projets de l'UE (ECCONET, WEATHER et EWENT, réalisés dans le cadre du 7^e programme-cadre de recherche) sur les incidences des changements climatiques sur les réseaux de transport. Leurs résultats sont présentés à l'annexe II, mais aussi dans le corps principal, du rapport.

I. 13. Étude de la côte du golfe du Mexique aux États-Unis

Cette étude a pour but de fournir une analyse complète de la manière dont les changements climatiques auront des répercussions sur le transport dans le golfe du Mexique, aux États-Unis, une zone qui abrite des infrastructures portuaires d'une importance essentielle pour le pays (et pour ses importations et exportations de produits industriels, commerciaux et agricoles, de pétrole et de gaz). L'objectif ultime de cette étude, qui doit être réalisée en trois phases distinctes, est d'apporter des connaissances et de proposer des démarches pouvant permettre aux responsables de la planification et de la gestion des réseaux de transport de mieux appréhender les risques, les stratégies d'adaptation et les arbitrages qu'impliquent les décisions de planification, d'investissement, de conception et d'exploitation.

L'objectif de la phase I (achevée en 2008) consistait à réaliser une analyse préliminaire des risques et facteurs de vulnérabilité du transport dans une partie de la côte du golfe du Mexique, en compilant et en recueillant des informations diverses – physiographie, hydrologie et hydrodynamique côtière, occupation des sols et couvert terrestre, analyse rétrospective et prospective du climat, démographie actuelle et tendances, infrastructure de transport. Le but de la phase II de l'étude était de procéder à une analyse approfondie des risques pour le transport en certains points précis du golfe et de rendre compte de leurs implications pour la planification à long terme et de leurs effets sur la sécurité, le fonctionnement et l'entretien des infrastructures. La phase II avait également pour but de proposer une méthode d'évaluation et des techniques d'identification des risques afin d'intégrer les données climatiques et environnementales aux décisions de la politique de transport; son objectif a donc été d'améliorer l'aptitude des décideurs régionaux à mieux comprendre les incidences de ces risques sur certains éléments essentiels de l'infrastructure et d'évaluer les mesures d'adaptation possibles. La phase III, enfin, aura pour but de trouver et d'analyser des stratégies d'adaptation et des réponses et de mettre au point des outils d'évaluation de ces stratégies, tout en déterminant et en évaluant les besoins futurs de la recherche.

I.13.1 Étude de la côte du golfe du Mexique, Phase I (CCSP, 2008)

Le rapport présente les résultats de la phase I de l'évaluation des incidences possibles des changements climatiques sur les réseaux de transport de la partie centrale du golfe du Mexique, entre Galveston, au Texas, et Mobile, en Alabama, qui abrite des infrastructures multimodales d'une importance essentielle pour les services de transport régionaux et nationaux. Le rapport examine certaines questions comme les effets du climat sur la conception, la construction, la sécurité, le fonctionnement et la maintenance des infrastructures et réseaux de transport, y compris des questions primordiales sur la manière dont les changements intervenant dans le régime des températures, des précipitations, des tempêtes et d'autres variables climatiques peuvent avoir des répercussions sur les réseaux routiers, les voies ferrées, les aéroports, les systèmes de transit, les gazoducs et oléoducs, les ports maritimes et les voies navigables.

Les tendances historiques et des analyses prospectives ont été reprises pour définir le contexte dans lequel examiner les effets éventuels des changements climatiques sur tous les grands modes de transport dans la région. Parmi les prévisions de changements climatiques pour les 50 à 100 prochaines années dans la partie centrale de la côte du golfe du Mexique, aux États-Unis, il convient de citer l'élévation du niveau de la mer, un réchauffement des températures, des changements dans le régime des précipitations et

une intensité accrue des tempêtes. Les effets de la montée du niveau de la mer devraient être aggravés par l'affaissement rapide des terres dans le delta du Mississippi, dont il est tenu compte dans cette analyse. L'importance de ces facteurs climatiques pour les réseaux de transport a été évaluée.

Ci-après les principaux résultats de cette évaluation:

Le réchauffement des températures devrait accroître le coût de la construction, de la maintenance et du fonctionnement des réseaux de transport. La multiplication des phénomènes de précipitations extrêmes pourrait occasionner des interruptions de services à cause des inondations. Une élévation relative plus rapide du niveau de la mer dans la zone (de plus de 9 mm/an actuellement en certains points de la côte) pourrait entraîner une plus forte exposition des infrastructures actuelles à un risque d'inondation permanente et/ou fréquente sous l'effet des tempêtes tropicales et des ondes de tempête – 27 % du réseau routier principal, 9 % des voies ferrées et 72 % des infrastructures portuaires sont construites sur des terres en surélévation de 1,2 m, voire moins. Aussi, un regain d'intensité des tempêtes pourrait endommager ces infrastructures et occasionner des interruptions de trafic: plus de la moitié des principales autoroutes de la région (64 % du réseau autoroutier inter-états, 57 % des grands axes), près de la moitié du réseau ferré, 29 aéroports et la quasi-totalité des ports maritimes sont à moins de 7 m de hauteur et donc sujets à des inondations et à des dégâts possibles en cas d'ondes de tempête provoquées par un ouragan.

I.13.2 Étude sur la côte du golfe du Mexique, Phase II (Ministère américain des transports, 2012)

Si la phase I du projet adoptait une vision générale de toute la partie centrale de la côte du golfe du Mexique et présentait un «panorama» des enjeux climatiques, la phase II s'est intéressée exclusivement à une seule région, relevant de la compétence de Mobile Metropolitan Planning Organisation (agence d'urbanisme Mobile-MPO), en Alabama.

La finalité de cette deuxième phase a été de déterminer les éléments de l'infrastructure de transport les plus essentiels au fonctionnement économique et social et d'évaluer leur vulnérabilité aux phénomènes météorologiques et aux évolutions climatiques à long terme. Cette phase II a également permis d'élaborer des outils et des stratégies que la Commission SARPC (South Alabama Regional Planning Commission, dont Mobile-MPO est membre) et les autres exploitants de réseaux publics et privés peuvent appliquer pour déterminer les réseaux qu'il y a lieu de protéger et comment adapter au mieux l'infrastructure aux incidences possibles des changements climatiques. Compte tenu du fait que de nombreux modes de transport sont représentés dans cette étude, le Ministère des transports a l'intention de créer une procédure d'évaluation modèle, qui pourrait être reproduite dans d'autres régions du pays.

Ci-après les activités menées au titre de la phase II:

- Identification des infrastructures de transport essentielles dans le comté de Mobile;
- Évaluation des effets des changements climatiques prévus (évolution du régime des températures et des précipitations, ondes de tempête et montée du niveau de la mer) pour le comté de Mobile;
- Analyse des relations entre les changements climatiques et leurs incidences sur les infrastructures;
- Croisement entre les informations sur les infrastructures essentielles et celles sur le climat pour évaluer les sources de vulnérabilité;

- Évaluations techniques détaillées et évaluations de risques pour les infrastructures les plus vulnérables, analyse coûts-avantages des stratégies d'adaptation;
- Exploitation des enseignements tirés de ce travail afin d'élaborer des outils et des méthodes d'examen généralistes, susceptibles d'être employés par d'autres régions pour recenser les réseaux à protéger et les modalités de protection et d'adaptation de ces réseaux.

Les principaux résultats de l'étude (à ce jour) sont récapitulés ci-après:

- La hausse des températures moyennes entraîne une dégradation plus rapide des chaussées et nécessite donc de modifier les calendriers de réfection et d'entretien, cependant que l'accroissement en durée et en fréquence des phénomènes de températures extrêmes peut accroître les déformations par flambage des voies, l'orniérage et l'apparition de bourrelets dans les chaussées.
- Le regain de fréquence et d'intensité des phénomènes de fortes précipitations peut occasionner des dégâts dans l'immédiat, ainsi que des problèmes d'intégrité structurelle et d'entretien des routes, ponts, réseaux d'évacuation des eaux pluviales et tunnels, impliquant des travaux de réfection et de reconstruction plus fréquents.
- Les interconnexions des réseaux intermodaux – y compris l'acheminement des marchandises vers/ depuis les ports maritimes – peuvent être interrompues, même si les routes ou voies ferrées sont inondées seulement sur de courts tronçons.
- Des précipitations violentes peuvent occasionner des retards dans le transport aérien.
- Les variations d'écoulement des cours d'eau produisent sans doute leurs effets les plus remarquables sur les routes, mais peuvent aussi avoir des incidences sur les lignes ferroviaires, les opérations portuaires, les installations aéroportuaires et les gares routières et ferroviaires.
- Les infrastructures de transport essentielles dans la région de Mobile se révèlent très peu exposées à des valeurs moyennes d'élévation du niveau moyen de la mer comprises entre 0,3 et 0,75 m, puisque 0 à 2 % seulement de ces actifs essentiels sont exposés pour chaque mode de transport, tandis que dans l'hypothèse de valeurs plus élevées (montée de 2 m), entre 2,6 et 50 % des infrastructures essentielles de chaque mode de transport seraient exposées.
- Le degré d'inondation par onde de tempête des infrastructures de transport essentielles sera largement supérieur au degré d'inondation par la montée à long terme du niveau de la mer, laquelle aggraverait toutefois l'inondation par onde de tempête.
- Les ondes de tempête peuvent avoir de sérieuses conséquences pour les réseaux de transport car les infrastructures essentielles (routes, ponts, voies ferrées, aéroports, ports, etc.) peuvent devenir impraticables, ou leur capacité de charge peut avoir diminué, même après le retrait des eaux, en raison de dégâts sérieux occasionnés à ces ouvrages, aux équipements logistiques (services publics, télécommunications, etc.) et/ou aux voies d'accès.
- S'agissant du degré d'exposition, les installations portuaires essentielles se sont révélées, proportionnellement, les plus vulnérables puisque 74 à 100 % d'entre elles seraient inondées en cas d'ondes de tempête (selon le scénario).
- Les liaisons ferroviaires essentielles seraient également très vulnérables du fait de leur emplacement le long du littoral, avec 57 à 80 % de kilomètres de voies essentielles qui seraient exposés à un risque d'inondation.

- Les gazoducs/oléoducs présentent, proportionnellement, le plus faible degré d'exposition (3 à 16 % du linéaire serait exposé), tandis que le degré d'exposition du réseau routier essentiel est variable (16 à 62 % de la longueur du réseau essentiel).
- L'un des deux équipements de transit essentiels, GM & O Transportation Center, et l'un des deux aéroports essentiels, Mobile Downtown Airport, seraient exposés à un risque d'inondation, quel que soit le scénario d'onde de tempête retenu.

I.14. Méthode polonaise d'évaluation de la sensibilité aux changements climatiques (Barbara RYMSZA)

L'article présenté ici²⁶ est l'aboutissement d'un travail de recherche et d'analyse effectué en Pologne, dans le but d'identifier les changements climatiques susceptibles d'avoir des effets sur le fonctionnement du transport routier, ferroviaire, aérien et fluvia.

Aux fins de l'analyse, des catégories climatiques ont été définies par convention (CCC), ainsi qu'une échelle de sensibilité des réseaux de transport aux effets climatiques (tableaux 1 et 2).

Tableau 1. Catégories climatiques définies par convention ayant une influence notable sur le secteur du transport

| N° | CCC | Description simplifiée des facteurs constitutifs de la catégorie |
|----|------------|---|
| 1 | 2 | 3 |
| 1. | Gel | Température très basse, sols gelés, couche de glace sur les cours d'eau, verglas |
| 2. | Neige | Chutes intenses à basse température, tempêtes de neige, enneigement, tempêtes de grêle |
| 3. | Pluies | Chute de pluies intenses à température positive, inondation ou submersion |
| 4. | Vent | Vents très violents et décharges atmosphériques (tempête, ouragan, tourbillon de vent, différences de pression atmosphérique, turbulence) |
| 5. | Chaleur | Température très élevée, ensoleillement |
| 6. | Brouillard | Visibilité limitée, brume, plafond nuageux bas, poussières (cendres) volcaniques |

Tableau 2. Échelle de sensibilité du secteur des transports aux effets climatiques

| Degré | Conditions | Caractéristique de l'influence exercé |
|-------|--------------|--|
| 1 | 2 | 3 |
| 0 | Neutres | Conditions climatiques favorables ou neutres |
| 1 | Gênantes | Conditions climatiques gênantes: conditions perceptibles qui gênent le fonctionnement du secteur |
| 2 | Limitatives | Conditions très difficiles; des difficultés sont constatées, mais aussi des dégâts qui limitent le fonctionnement du secteur |
| 3 | Paralysantes | Conditions qui rendent impossible le fonctionnement du secteur |

²⁶ Cet article est l'aboutissement du projet KLIMADA, «Développement et mise en œuvre d'un plan d'adaptation stratégique des secteurs et zones sensibles aux changements climatiques», réalisé par l'Institut de la protection de l'environnement, institut national de recherche, à la demande du Ministre de l'environnement et financé par le Fonds national de protection de l'environnement et de gestion de l'eau.

Effets des changements climatiques et adaptation à ces changements dans les réseaux de transport internationaux

À partir d'une analyse des publications et d'enquêtes par questionnaire, on a déterminé le degré de faisabilité des prestations de services de transport dans le contexte des effets climatiques observés actuellement. Les résultats sont consignés dans le tableau 3.

Tableau 3. Degré d'influence des CCC sur le secteur des transports

| Numéro | CCC | Infrastructures | Moyens de transport | Confort pour la collectivité |
|--|------------|-------------------------|----------------------------|------------------------------|
| Sensibilité du transport routier | | | | |
| 1. | Gel | 2 | 2 | 2 |
| 2. | Neige | 3 | 1 | 2 |
| 3. | Pluies | 3 | 1 | 1 |
| 4. | Vent | 3 | 2 | 1 |
| 5. | Chaleur | 2 | 1 | 2 |
| 6. | Brouillard | 1 | 0 | 2 |
| Sensibilité du transport ferroviaire | | | | |
| 1. | Gel | 3 | 1 | 1 |
| 2. | Neige | 3 | 1 | 1 |
| 3. | Pluies | 3 | 0 | 1 |
| 4. | Vent | 3 | 0 | 0 |
| 5. | Chaleur | 1 | 0 | 1 |
| 6. | Brouillard | 0 | 0 | 2 |
| Sensibilité du transport par voie navigable | | | | |
| 1. | Gel | 3 | 2 | 3 |
| 2. | Neige | 2 | 2 | 0 |
| 3. | Pluies | 2 | 0 | 1 |
| 4. | Vent | 2 | 2 | 2 |
| 5. | Chaleur | 0 | 2 | 1 |
| 6. | Brouillard | 0 | 2 | 2 |
| Sensibilité du transport aérien | | | | |
| 1. | Gel | 2 | 2 | 1 |
| 2. | Neige | 3 | 1 | 1 |
| 3. | Pluies | 1 | 1 | 1 |
| 4. | Vent | 2 | 2 | 2 |
| 5. | Chaleur | 1 | 2 | 1 |
| 6. | Brouillard | 0 | 2 | 1 |
| 0 – Conditions neutres | | 1 – Conditions gênantes | 2 – Conditions limitatives | 3 – Conditions paralysantes |

Incidences des changements climatiques

La conclusion de l'étude est que les équipements de transport (qu'il s'agisse des matériels et de leur conception, des conditions d'exploitation, des sources d'énergie et des consommables utilisés), ainsi que le confort pour la collectivité (mesuré par l'efficacité du service, la fiabilité, la ponctualité, la sécurité, le confort des passagers/voyageurs, le service et le fret), peuvent être adaptés en continu à l'évolution des conditions. En revanche, l'adaptation aux changements climatiques doit être progressive, principalement pour ce qui est de l'infrastructure, construite pour une longue durée de service (avoisinant une centaine d'années).

La Pologne est un pays au climat modéré. Les modalités d'influence du climat sur l'infrastructure de transport sont prises en compte et définies par des normes de construction (y compris par les normes Eurocodes). Celles-ci renferment des annexes nationales qui décrivent les zones climatiques à l'aune de différents critères: surcharges dues à la neige et aux vents, profondeur de congélation des sols, température de l'air (en été et en hiver), précipitations.

Les zones climatiques telles que définies dans les textes normatifs, ainsi que les valeurs des paramètres qui décrivent les incidences du climat sur les ouvrages bâtis, ont évolué à l'issue de longues années de recherche. Leurs valeurs types ont été étalonnées par l'équipe de l'ICM (Interdisciplinary Center for Mathematical and Computational Modeling) de l'université de Varsovie pour le territoire polonais et ce, jusqu'en 2090.

Les simulations exécutées ont permis de suivre les variations (valeur médiane et 90^e centile) des paramètres qui décrivent les différentes CCC. Un exemple de résultat est présenté au tableau 4 et dans les graphiques 1 et 2, sous forme de cartes, pour des périodes consécutives de 20 ans.

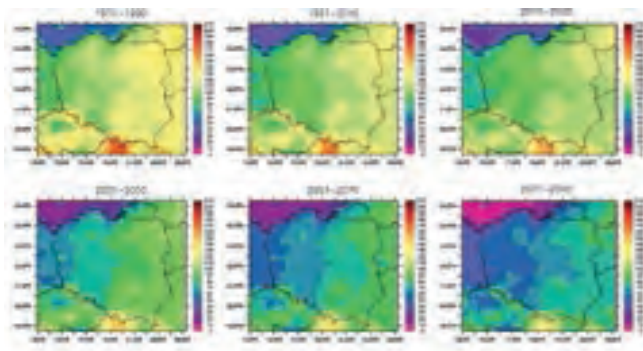


Figure 1. Variation du nombre de jours avec une température $T_{\min} < 0^{\circ}\text{C}$ (médiane)

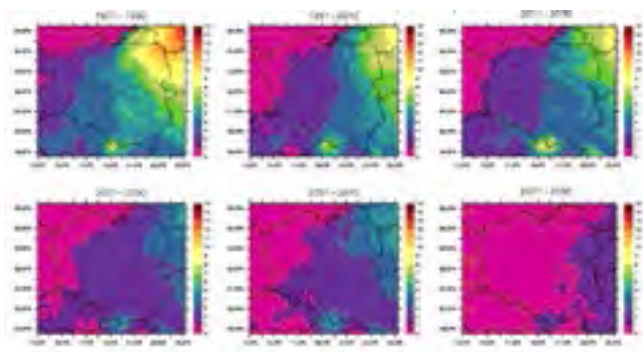


Figure 2. Variation du nombre de jours avec une température $T_{\min} < -20^{\circ}\text{C}$ (90^e centile)

Tableau 4. Valeurs moyennes prévues des facteurs climatiques décrivant les changements climatiques en Pologne

| CCC | Paramètre de description | Valeur moyenne | | | |
|------------|---|----------------|-------|-------|-------|
| | | 2010 | 2030 | 2050 | 2070 |
| Gel | Nombre de jours par an où $T_{\min} < 0^{\circ}\text{C}$ | 101,70 | 96,82 | 81,93 | 72,15 |
| | Nombre de jours par an où $T_{\min} < -10^{\circ}\text{C}$ | 13,39 | 11,12 | 7,56 | 6,38 |
| | Nombre de jours par an où $T_{\min} < -20^{\circ}\text{C}$ | 0,7 | 0,68 | 0,34 | 0,3 |
| | Nombre de degrés-jour par an où $T_{\text{seuil}} < 17^{\circ}\text{C}$ | 3379 | 3236 | 3005 | 2803 |
| Neige | Nombre de jours par an d'enneigement | 75,37 | 63,43 | 51,16 | 43,6 |
| Pluies | Précipitations maximales par jour [mm/j] | 28,59 | 31,11 | 32,17 | 32,93 |
| | Durée maximale des épisodes pluvieux avec des précipitations de 1 mm/j [en jours] | 8,72 | 8,77 | 8,84 | 8,66 |
| | Nombre d'épisodes pluvieux, de plus de 5 jours, avec des précipitations de plus de 1 mm/j [-] | 2,77 | 2,99 | 3,11 | 2,91 |
| | Nombres de jours par an avec des précipitations de moins de 10 mm | 9,96 | 9,76 | 10,35 | 10,53 |
| | Nombres de jours par an avec des précipitations de plus de 20 mm | 1,76 | 2 | 2,2 | 2,24 |
| Vent | Vitesse moyenne quotidienne du vent v [m/s] | 4,22 | 4,22 | 4,22 | 4,21 |
| | Nombre de jours par an où $v_{\max} > 10$ m/s] | 43,1 | 42,88 | 42,66 | 42,51 |
| | Nombre de jours par an où $v_{\max} > 15$ m/s | 6,58 | 6,34 | 6,37 | 6,33 |
| | Nombre de jours par an où $v_{\max} > 20$ m/s | 0,76 | 0,74 | 0,78 | 0,77 |
| Chaleur | Température quotidienne moyenne T [$^{\circ}\text{C}$] | 8,11 | 8,63 | 9,33 | 10,10 |
| | Nombre de jours par an où $T_{\max} > 25^{\circ}\text{C}$ | 29,80 | 35,56 | 37,49 | 46,28 |
| Brouillard | Absence de paramètres d'estimation | - | - | - | - |

Une analyse des changements climatiques prévus donne les indications suivantes:

- Il se produira un réchauffement, mesuré par une augmentation de la température quotidienne moyenne et une diminution du nombre de jours frais.
- La durée d'enneigement des sols sera plus brève.
- Les précipitations, mesurées par une augmentation des précipitations quotidiennes maximales et du nombre de jours de précipitations extrêmes, augmenteront.
- Les paramètres climatiques retenus dans l'étude afficheront une forte variabilité par rapport à leurs valeurs extrêmes.

Les résultats présentés montrent que des changements climatiques sont envisagés d'ici la fin du 21^e siècle, qui consisteront en un réchauffement progressif, mais que la plus grande menace risque de venir de précipitations extrêmes. Les prévisions concernant les vents sont sujettes à caution car elles n'indiquent aucune variation dans leurs effets, en termes de valeurs moyennes. S'agissant de la durée d'enneigement, les prévisions tablant sur une diminution notable de cette durée sont à considérer avec une grande prudence. En dépit du réchauffement climatique, les hivers pourraient être également neigeux, une donnée qui doit être prise en compte, en particulier pour le climat d'Europe centrale.

Les résultats de cette analyse des changements climatiques ont été exprimés sous la forme d'une échelle de sensibilité des infrastructures de transport, selon le mode de transport, ainsi qu'il ressort du tableau 5.

Tableau 5. Sensibilité des infrastructures de transport à l'influence du clima

| Numéro | CCC | Sensibilité des infrastructures | | | |
|------------------------|------------|---------------------------------|----------------------------|------------------------------|------------------|
| | | Transport routier | Transport ferroviaire | Transport par voie navigable | Transport aérien |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 1. | Gel | 2 | 3 | 3 | 2 |
| 2. | Neige | 3 | 3 | 2 | 3 |
| 3. | Pluies | 3 | 3 | 2 | 1 |
| 4. | Vent | 3 | 3 | 2 | 2 |
| 5. | Chaleur | 2 | 1 | 0 | 1 |
| 6. | Brouillard | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 0 – Conditions neutres | | 1 – Conditions gênantes | 2 – Conditions limitatives | 3 – Conditions paralysantes | |

Telle qu'elle ressort de ce tableau, l'analyse de sensibilité des infrastructures de transport montre que la route et le rail sont le plus sensible à la neige, aux pluies et au vent, tandis que le gel peut empêcher le fonctionnement du transport ferroviaire et par voie navigable.

Les mesures d'adaptation, destinées à réduire les incidences négatives des changements climatiques sur le secteur des transports, devraient porter en particulier sur:

- l'ajustement aux changements climatiques des normes appliquées à la conception des ouvrages bâtis;
- le suivi des coûts de prévention et de réparation des dégâts d'origine climatique;
- l'observation des changements climatiques effectifs.

Annexe II: Conférence internationale sur l'adaptation des réseaux de transport aux changements climatiques (juin 2012, Alexandroupolis, Grèce)

Sont regroupés dans l'annexe II les résumés des présentations proposées à l'occasion de la Conférence internationale de la CEE sur l'adaptation des réseaux de transport aux changements climatiques, organisée les 25 et 26 juin 2012 à Alexandroupolis, en Grèce, ainsi que les conclusions et les recommandations formulées cette occasion. Les actes de la Conférence, y compris les présentations originales et l'ensemble des documents de la Conférence, peuvent être consultés sur le site web de la CEE, à l'adresse suivante: http://www.unece.org/trans/main/wp5/wp5_conf_2012_june.html

II.1. Changements climatiques: vue d'ensemble du contexte scientifique et des incidences possible sur le transport

(A.F. Velegrakis, Département des sciences de la mer, université de la mer Égée, Grèce)

Tous les éléments scientifiques dont on dispose donnent à penser que d'importants changements sont intervenus dans les conditions climatiques depuis le XIX^e siècle, qui ont été attribués à des facteurs aussi bien naturels que liés à l'activité humaine (comme l'accroissement des émissions de gaz à effet de serre). Bien que ces changements présentent une forte variabilité dans le temps et dans l'espace, la température moyenne a augmenté de 0,8 °C et le niveau des mers est monté, au niveau mondial, d'environ 0,2 m depuis 1880. Il est établi que ces tendances se poursuivront ainsi bien plus longtemps, à un rythme qui sera sans doute fonction des émissions futures de gaz à effet de serre et, *in fin*, des évolutions socio-économiques et des choix politiques. Les changements dans les valeurs moyennes des paramètres climatiques peuvent également induire des changements dans la fréquence, l'intensité, la couverture spatiale, la durée et la période des phénomènes météorologiques et climatiques extrêmes, pouvant éventuellement conduire à des situations extrêmes sans précédent, lesquelles peuvent, à leur tour, modifier le schéma et la distribution des conditions climatiques futures et engendrer des rétroactions climatiques et, éventuellement, des «points de basculement» catastrophiques.

Les changements climatiques auront des incidences notables sur les zones côtières (élévation du niveau moyen et extrême des océans, entraînant une plus forte érosion des littoraux et des inondations) et sur les plaines inondables (crues plus intenses du fait de phénomènes de précipitations extrêmes). Les vagues de chaleur, les sécheresses et le dégel du pergélisol dans les régions arctiques devraient également gagner en fréquence et en durée, tandis que des changements devraient intervenir, dans certaines régions, dans la fréquence et/ou la violence destructrice des tempêtes. Ces changements climatiques auront des incidences notables sur les infrastructures comme sur le fonctionnement des transports. Les infrastructures essentielles à longue durée de vie et les opérations sont concentrées dans des zones qui seront probablement très touchées. Des incidences considérables sur les infrastructures et le fonctionnement des transports sont donc attendues pour les régions côtières liées à un accroissement de l'érosion des côtes, à une augmentation des crues et des inondations, à une hausse des coûts de construction et de maintenance des infrastructures portuaires, à l'évolutions des structures sédimentaires dans les ports et les

chenaux de navigation, à des modifications dans l'implantation ou la réimplantation des populations et des activités économiques, à des pénuries de main-d'œuvre et à des problèmes d'assurance. Dans les plaines fluviales inondables, des risques accrus de crues et d'inondations et/ou d'endommagement d'ouvrages vitaux pour les transports comme les ponts, ainsi que des incidences sur la navigation par voie fluviale, sont également envisagés pour certaines régions. Parallèlement, les vagues de chaleur et les sécheresses extrêmes prévues en certains points du globe risquent d'endommager les voies ferrées et les chaussées routières, entraînant une plus forte consommation d'énergie dans les ports et les terminaux en général, rendant difficile l'exploitation des voies fluviales, affectant la fiabilité des services de divers modes de transport et majorant les coûts d'investissement, de fret et de maintenance. Dans les régions polaires, des difficultés apparaîtront pour les réseaux et structures de transport du fait de la fonte de la banquise arctique et du dégel du pergélisol. Enfin, comme le transport est un secteur tiré par la demande, les changements climatiques pourraient également avoir des incidences indirectes (des fluctuations pourraient être observées dans la demande de transport de l'agriculture et du tourisme, par exemple).

Il semble que depuis peu, les enjeux des changements climatiques pour les transports suscitent plus d'intérêt. Des études ont été demandées dans la région de la CEE pour évaluer les effets de la dynamique du climat sur les différents modes et infrastructures stratégiques de transport. Cependant, il semble que bien plus doive être fait pour évaluer les risques et décider de mesures d'adaptation d'un bon rapport coût-efficacité, les concevoir et les mettre en œuvre.

II.2. Sensibilisation à l'adaptation des réseaux de transport internationaux: le rôle du secrétariat de la CCNUCC (E. Resende, Programme d'adaptation, CCNUCC)

Les négociations de la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC) sur l'élaboration des politiques publiques d'adaptation aux changements climatiques ont été renforcées avec la mise en place du Cadre de l'adaptation de Cancún. Ce Cadre reprend trois axes de travail importants de la Conférence de Cancún (2010): le programme de travail sur les pertes et préjudices, le comité de l'adaptation et les plans nationaux d'adaptation. Ce mécanisme historique a permis d'élargir les discussions sur des outils et des mécanismes efficaces pour aider les pays, en particulier les plus vulnérables aux effets néfastes des changements climatiques. Les Parties élaborent des actions pour rendre ces nouveaux axes de travail pleinement opérationnels et continueront ainsi. Chaque axe de travail devrait déboucher sur un soutien cohérent et efficace à l'adaptation au niveau international, national, régional et local.

Avant la mise en place du Cadre de l'adaptation de Cancún, les connaissances sur l'adaptation aux changements climatiques se sont développées et ont été diffusées grâce au programme de travail de Nairobi sur les incidences des changements climatiques, la vulnérabilité et l'adaptation à ces changements. Ce programme avait/a pour objectif d'aider les pays, en particulier les plus vulnérables aux effets néfastes des changements climatiques, à prendre des décisions éclairées dans leurs initiatives visant à améliorer leur capacité de résilience et d'adaptation. Le programme de travail de Nairobi repose sur un partenariat, à titre gracieux, entre près de 300 organisations parmi lesquelles des ONG, des établissements de recherche et des entreprises privées du monde entier, qui produisent et diffusent des connaissances sur l'adaptation. Il s'agit d'une plate-forme d'une importance majeure, qui permet aux organisations de faire de leur action en faveur de l'adaptation un enjeu public

grâce à des engagements à agir, tout en informant les Parties à la Convention de leurs initiatives et en faisant connaître leur action auprès d'autres organisations. Le programme de travail de Nairobi comporte également une initiative consacrée spécialement au secteur privé (PSI). La PSI a pour but de sensibiliser à l'importance de ce secteur pour l'adaptation en général et de mettre en évidence la nécessité, pour les entreprises privées, de s'adapter de manière durable et rentable aux changements climatiques (pour plus de précisions sur le programme de travail de Nairobi et l'initiative PSI, voir unfccc.int/nwp et adhérer gratuitement au programme).

Les programmes d'action nationaux aux fins de l'adaptation (PANA) constituent également un autre instrument décisif, qui offre un processus permettant aux pays les moins développés d'identifier les actions prioritaires qui répondent à la nécessité urgente et immédiate de s'adapter aux changements climatiques – ceux pour lesquels tout retard serait synonyme de plus de vulnérabilité et/ou de surcoûts à un stade ultérieur. Voir la page unfccc.int/4583 pour la liste de tous les projets.

- (a) L'Union internationale des chemins de fer a entrepris une vaste étude de faisabilité pour analyser les incidences des changements climatiques sur l'infrastructure de transport ferroviaire et dresser l'inventaire des travaux actuels et futurs sur l'adaptation aux changements climatiques dans les entreprises ferroviaires européennes, canadiennes, australiennes et indiennes, qui inclut des études de cas sur la ligne West Coast Main Line au Royaume-Uni et sur la vallée du Rhin, en Allemagne. Cette étude a abouti à l'élaboration du projet d'adaptation de l'infrastructure ferroviaire aux changements climatiques (projet ARISCC) (voir aussi I.10), qui fournit des données sur les coûts d'adaptation et les dommages possibles. ARISCC est une boîte à outils qui aide à identifier les infrastructures et les sites vulnérables à un horizon temporel donné, et à évaluer les options normatives possibles pour protéger les infrastructures neuves et anciennes des effets des changements climatiques.
- (b) Le programme RIMAROCC (Gestion des risques liés aux changements climatiques pour les axes routiers) a pour but de développer une méthode européenne, financée par onze directions nationales de réseau routier, dans le cadre du programme européen d'ERA-Net Road. Cette méthode, à vocation généraliste, est conçue pour répondre aux besoins communs des propriétaires et exploitants de réseaux routiers en Europe. Elle cherche à présenter un cadre commun et une approche globale de l'adaptation aux changements climatiques.
- (c) ÖBB, l'entreprise ferroviaire nationale autrichienne, a conçu et mis en œuvre un système d'information et d'alerte météorologique. Son portail en ligne, InfraWeather, donne accès à des informations météorologiques générales, à des prévisions ainsi qu'à des alertes. Une carte au niveau de l'interface utilisateur donne une vue d'ensemble du réseau ferré autrichien. Grâce à de nouveaux modèles de prévisions et à la technologie des radars, les phénomènes météorologiques extrêmes peuvent être prévus à une échelle de 10 km, voire parfois à une échelle plus fine dans certains cas, là où il existe des lignes de partage météorologiques et/ou géographiques importantes (crêtes montagneuses, vallées, etc.). Les prévisions de crues intègrent le niveau des eaux fluviales à des données météorologiques, et des alertes peuvent être envoyées 12 heures à l'avance. Les prévisions de neige incluent les hauteurs de chute de neige au cours des 24 à 72 heures à venir pour chaque point d'alerte.

Pour résumer:

- Le secteur des transports est considéré comme contribuant notablement au réchauffement mondial.
- Des mesures d'adaptation sont primordiales pour ce secteur.
- Le secteur de transports est un acteur essentiel des projets d'adaptation.
- Des occasions existent de souligner la vulnérabilité de ce secteur et son potentiel de participation à la lutte contre les changements climatiques, *via* le secrétariat de la CCNUCC.

Eu égard à ce dernier point, il existe des possibilités de coopération avec le secrétariat de la CCNUCC pour sensibiliser à l'adaptation aux changements climatiques en:

- S'engageant auprès du programme de travail de Nairobi et en devenant une organisation partenaire.
- Soumettant des engagements à agir au programme de travail de Nairobi.
- S'engageant auprès de l'initiative PSI du programme de travail de Nairobi.
- Évaluant les PANA des pays les moins développés et en leur apportant une aide.

II.3. L'expérience des aléas naturels et des mesures préventives dans les chemins de fer japonais (Y. Mizukami, Japan Railway East, JR East)

Créée en 1987 et constituée d'un réseau de 70 lignes, comptant 7 512 kilomètres de voies ferrées et 1 689 gares, la compagnie JR East achemine 17 millions de passagers par jours (13 000 rames/jour). Ses investissements sont consacrés pour moitié à la sécurité. Il est notable qu'en 2010, 20 % de ses dépenses de sécurité aient été investies dans des mesures de protection contre les aléas naturels, pour un montant d'environ 40 000 euros/km. Les risques naturels pouvant menacer JR East sont: (i) de fortes précipitations, provoquant des inondations, des phénomènes d'affouillement, une élévation de la nappe phréatique et des glissements de terrain; (ii) des vents violents, provoquant des déraillements; (iii) une intense activité des vagues sur les côtes, provoquant une érosion des littoraux et l'effondrement des digues de protection le long des voies ferrées côtières; (iv) de fortes précipitations de neige, provoquant des avalanches et des chutes d'arbres; (v) des tremblements de terre, des vagues de chaleur et des orages.

Les principales mesures de protection étudiées et mises en œuvre par JR East sont les suivantes:

Le renforcement de la résilience de son réseau aux fortes précipitations (consolidation des talus, dispositifs de protection contre l'affouillement), aux vents violents (pose de brise-vent et d'écrans, mise en culture de brise-vent boisés) et aux fortes chutes de neige (dispositifs paravalanches, mobilisation et utilisation d'une plus large flotte d'engins de déneigement, mesures anti-neige sur les rames et mise en culture de forêts de protection contre la neige).

L'installation de systèmes de contrôle, consistant en divers capteurs environnementaux et techniques (anémomètres, échelles d'étiage, pluviomètres, nivomètres et thermomètres, détecteurs d'affouillement et de glissement de terrain et sismographes), qui livrent en temps réel des informations à des centres de contrôle opérationnel qui prescrivent des limitations de vitesse et/ou des suspensions de trafic chaque fois que nécessaire.

Des dispositifs d'éducation et de formation à l'intention des personnels de la compagnie.

Des activités de recherche et développement dans son laboratoire spécialisé dans la prévention des catastrophes, qui consistent à étudier les mécanismes de ces catastrophes, à fournir des évaluations de risques, à mettre au point des méthodes d'observation et de détection, des mesures de lutte et des normes techniques et à concevoir des dispositifs pratiques à partir de l'expérience acquise.

II.4. Adaptation aux changements climatiques: incidences et cahier des charges pour le secteur ferroviaire (L. Lochman, Communauté européenne du rail et des compagnies d'infrastructures - CER)

En 2009, la Commission européenne a publié un livre blanc intitulé «Adaptation au changement climatique: vers un cadre d'action européen», qui définissait la stratégie d'intégration de l'adaptation aux changements climatiques dans les politiques publiques de l'UE et de ses États membres et introduisait des critères d'admissibilité à un financement de l'UE en la matière. Le document faisait peu de place aux incidences des changements climatiques sur les transports. Toutefois, après plusieurs appels à remédier à cette défaillance, le secteur des transports devrait figurer au cœur de la stratégie européenne d'adaptation aux changements climatiques (la «Stratégie 2013»). La CER, qui a d'ores et déjà inauguré un groupe de travail spécial sur la question, permettant au secteur ferroviaire d'échanger sur les bonnes pratiques, les politiques possibles, le cadre normatif et les possibilités de financement, est désormais membre du groupe de pilotage mis en place par la Commission européenne pour l'adaptation aux changements climatiques, lequel conseille et soutient les travaux de la Commission sur les préparatifs de sa Stratégie 2013, dont l'objet premier est de renforcer la résilience de l'UE aux changements climatiques. La Stratégie 2013 devrait reposer sur les éléments suivants: (i) l'évaluation des coûts, avantages et effets de l'adaptation aux changements climatiques; (ii) la consolidation des connaissances en la matière; (iii) l'incitation à appliquer des cadres normatifs et des principes directeurs; (iv) le recueil et le partage des bonnes pratiques.

Le Livre blanc 2011, intitulé «Feuille de route pour un espace européen unique des transports», envisage un secteur ferroviaire modernisé, qui sera en mesure d'accroître sa part de marché dans le transport de voyageurs et le fret sur moyenne distance (plus de 300 km) à l'horizon 2050. À cette fin, il est projeté de mettre en place un «réseau de base» RTE-T multimodal totalement fonctionnel pour 2030, avec un réseau à grande vitesse, de haute qualité et de grande capacité, pour 2050. À cet égard, le secteur du rail s'engage à une plus grande résilience climatique du réseau, dont la capacité accrue permettra d'absorber le surcroît de trafic occasionné par les transports intermodaux.

Le secteur ferroviaire est déjà touché par les changements climatiques avec des étés plus chauds, des hivers plus humides, des vents forts et de brusques changements de saison qui occasionnent plus d'interruptions de trafic et plus de consommation énergétique. Comme ces incidences devraient se multiplier au cours des prochaines décennies, des stratégies d'adaptation efficaces, des activités de R-D spécifiques, des programmes d'entretien, une cartographie des points de vulnérabilité et la mise en place de cahiers des charges climatiques pour le matériel roulant sont nécessaires. L'adaptation aux changements climatiques est une question de très grande importance pour le secteur ferroviaire et des groupes de travail et/ou des stratégies spécifiques sont déjà en place, de même que des activités de R-D. Ainsi, le projet ARISCC (voir aussi partie I.6) propose un large éventail d'exemples de bonnes pratiques dans la gestion intégrée des aléas naturels.

L'atténuation des changements climatiques, mais aussi des mesures d'adaptation, sont nécessaires. À l'heure actuelle, le transport est le seul secteur de l'UE qui voit ses émissions de CO₂ progresser. Toutefois, le secteur ferroviaire réduit ses émissions de gaz à effet de serre alors que c'est un mode de transport à faible intensité de carbone. Il s'est engagé unilatéralement à de nouvelles réductions de ses émissions de CO₂, de respectivement 30 % et 50 % (par rapport à 1990) d'ici 2020 et 2030, et vise à long terme un fonctionnement sans carbone à l'horizon 2050.

Le cadre normatif actuel doit être modifié pour que le réseau ferroviaire européen s'adapte aux changements climatiques. Le principal message du secteur est qu'un état des lieux complet des normes et réglementations actuelles s'impose pour identifier les lacunes entre l'existant et un réseau ferroviaire résilient. Des activités de recherche-développement bien ciblées sont également nécessaires, par exemple dans le cadre de la stratégie Horizon 2020. Si l'on tient compte de la longue durée de vie des composantes d'un réseau ferroviaire (habituellement de 20-30 ans pour les rames, de 30 ans pour le ballast et de 75 ans pour les ponts), le travail de normalisation doit alors faire l'objet d'une large adhésion et commencer au plus vite. Les composantes importantes à prendre en considération sont le ballast, les caténaires, les ouvrages de terrassement, les voies sans traverses, les systèmes d'évacuation des eaux pluviales, les conduites d'eau et les ponts.

Le secteur ferroviaire aide les institutions européennes et les principales parties prenantes à identifier les mesures et priorités pour renforcer la résilience des réseaux ferroviaires aux changements climatiques. La CER continuera d'encourager les échanges de bonnes pratiques entre ses membres et d'aider les décideurs à trouver les meilleures solutions pour intégrer l'adaptation aux changements climatiques dans les politiques, les normes et les mécanismes de financement de l'UE. Parmi les possibilités qu'offre le prochain cadre financier pluriannuel de l'UE pour promouvoir l'adaptation, il convient de citer la réforme des RTE-T/le Mécanisme pour l'interconnexion en Europe (CEF) (qui majore de 10 % le taux de cofinancement des actions permettant d'améliorer la résilience aux changements climatiques), la politique de cohésion et le programme-cadre pour la recherche-développement (2014-2020) et l'innovation de la stratégie Horizon 2020.

II.5. Mobilité et changements climatiques: quel sens pour un prestataire de mobilité durable? (A. Kaddouri, SNCF, contact Climat & Énergie, Direction du développement durable)

En 2011, le chiffre d'affaires de la Société nationale des chemins de fer français (SNCF) s'est établi à 32,6 milliards d'euros, un chiffre qui se répartit entre cinq branches: (1) SNCF INFRA (Plate-forme d'appui aux actifs et à l'infrastructure), qui assure la gestion du réseau ferré, la maintenance opérationnelle pour le compte de Réseau Ferré de France (qui gère notamment les lignes à grande vitesse) et l'ingénierie des infrastructures ferroviaires. Une partie de cette activité est réalisée en France et une partie des activités d'ingénierie en Europe, en Asie, au Moyen-Orient, en Afrique et sur le continent américain (pour un chiffre d'affaires de 5,3 milliards d'euros); (2) SNCF Proximités, qui assure le transport urbain, péri-urbain et régional pour les trajets quotidiens domicile-travail. Cette branche comprend également le réseau de transport express régional (TER), les services du Transilien (dans la région de Paris-Île de France) et les services Intercités en France, en Europe, aux États-Unis, au Canada et en Australie (12,3 milliards d'euros); (3) SNCF VOYAGES, qui assure le transport de voyageurs à grande vitesse en Europe (7,3 milliards d'euros); (4) SNCF GEODIS, qui s'occupe

de transport multimodal et de logistique de marchandises dans le monde, dans 120 pays et sur les cinq continents (9,4 milliards d'euros); (5) SNCF GARES & CONNEXIONS, qui assure, indépendamment de l'activité de transport, la gestion et le développement d'un réseau de quelque 3 000 gares françaises. Enfin, le bureau d'études AREP, filiale de la SNCF, opère à l'international (1,2 milliard d'euros).

Le réchauffement prévu des températures, l'allongement des vagues de chaleur en été, des hivers plus froids et des phénomènes extrêmes plus fréquents auront inévitablement des incidences sur les activités de la SNCF, les déplacements, les conditions de travail, les opérations d'entretien et la réglementation. En mars 2012, un sondage indiquait que plus de 40 % des Français considéraient les changements climatiques comme le risque environnemental le plus important, 7 sondés sur 10 se déclarant sensibilisés à cette question et à la menace que les changements climatiques font peser sur leurs activités (sondage de l'Institut français d'opinion publique IFOP pour le compte de WWW France). À la SNCF, les changements climatiques sont étudiés depuis 2009 (depuis la législation adoptée dans le cadre du «Grenelle de l'environnement»).

La SNCF a décidé de participer à l'élaboration du plan national français de lutte contre les changements climatiques pour trois raisons essentielles:

- La SNCF investit massivement dans le matériel roulant (entre autres), dont «l'espérance de vie» est d'une quarantaine d'années, et dans les gares (espérance de vie plus longue), de sorte que tous ces actifs doivent pouvoir résister raisonnablement aux changements climatiques à long terme.
- La SNCF veut réduire les risques d'exploitation.
- Une meilleure résilience aux changements climatiques peut induire des changements de comportement et offrir de nouvelles opportunités.

Selon la méthode décrite par de Perthuis *et al.* (Economic Aspects in Adaptation for Climate Change, 2010), la SNCF s'efforce d'identifier toutes les incidences climatiques intéressant ses activités, ainsi que les facteurs de vulnérabilité et des calendriers d'adaptation. Forte de ces informations, la SNCF pourra proposer des solutions d'adaptation pour chaque type d'incidence, en prenant en considération celles qui s'inscrivent dans une logique globale: des actions à court terme aux effets à longue échéance (comme la normalisation), des réponses souples pour améliorer la robustesse du réseau ferroviaire compte tenu des scénarios climatiques possibles (solutions de mobilité virtuelle ou alternative, gestion de crise dans un contexte d'évolution du climat, etc.), des actions à long terme (adaptation de la gouvernance aux aléas climatiques) et des réponses qui ne donneront pas matière à des regrets, quoi qu'il arrive («no-regrets»). Chaque branche du Groupe SNCF doit définir son propre projet et se coordonner avec la gouvernance globale. Le plan d'adaptation de la SNCF aux changements climatiques prévoit également des points qui concernent la réduction des émissions de gaz à effet de serre. Ce plan implique de cartographier avec précision les risques et leurs incidences locales pour les mesures d'adaptation, tout en s'attaquant à des aspects plus globaux concernant l'atténuation. Il importe que tous les acteurs partie prenante à la planification, la conception, la construction et l'exploitation du réseau ferroviaire comprennent bien les modalités d'action du climat futur sur ces fonctions.

Les décisions relatives à l'adaptation peuvent se ranger en deux catégories: (a) les actions liées au calendrier des changements climatiques et à la construction d'infrastructures, de gares et de matériel roulant neufs; (b) les actions visant à renforcer la résistance aux changements climatiques à l'aide de mesures de rénovation et de protection contre les risques climatiques existants.

Le plan de la SNCF a défini des cahiers des charges pour remédier aux incidences des changements climatiques et des mesures d'adaptation sont en cours de déploiement à divers échelons de gouvernance. Le projet «Climat D Rail» a permis de livrer certaines études intéressantes concernant cette adaptation. En octobre 2011, les incidences climatiques, les points de vulnérabilité et les calendriers d'adaptation étaient identifiés, et en janvier 2012, des solutions d'adaptation à ces incidences étaient répertoriées. En mars 2012, la SNCF a examiné divers scénarios de prospective (sur les incidences sociales, économiques, environnementales et sur la mobilité). En juin 2012, enfin, l'entreprise a élaboré des plans individuels pour chacune de ses branches et pour la gouvernance globale.

Le plan d'adaptation de la SNCF prévoit, en bref:

De cartographier les risques et les opportunités;

D'intégrer la résistance au climat dans les décisions d'investissement et la conception, la révision du cadre normatif des inspections et de l'entretien, l'actualisation des plans de prévention et de gestion de crise et l'élaboration de solutions de mobilité alternative;

De mobiliser les parties prenantes autour de la gouvernance climatique, de sensibiliser les autorités régionales, d'élaborer une communication autour du climat avec la clientèle et enfin, des exercices de gestion de crise climatique.

La SNCF investit approximativement 2 milliards d'euros par an dans les rames, les gares et les lignes à grande vitesse (RFF). L'éco-conception des trains et des gares, la résilience des outils de production et la gestion de crise constituent les enjeux de demain. Les opportunités qui résultent d'une nouvelle demande touristique (sur courte et moyenne distance), par exemple, et les avantages d'une faible émission de gaz à effet de serre et d'une faible consommation énergétique sont pointés. Enfin, il convient de noter que même en l'absence de changements climatiques, il sera nécessaire d'agir sur la demande et l'offre actuelles de transport, les infrastructures et les conditions de voyage, en raison des évolutions attendues dans les destinations touristiques, la distribution des populations et la production agricole.

II.6. Mesures d'adaptation et cahier des charges pour prévenir les incidences des changements climatiques sur les réseaux routiers – Le cas de l'autoroute Attica Tollway (D. Mandalozis, Attikes Diadromes SA)

Les relevés thermiques témoignent d'une élévation importante des températures, qui a déjà des effets notables sur le climat, lesquels devraient s'amplifier dans les décennies à venir. En Grèce, un réchauffement de 2 °C du climat devrait entraîner une diminution d'environ 30 % des chutes de pluies en été, plus de deux semaines par an de vague de chaleur dans les îles du nord de la mer Égée, plus de six semaines par an de risques d'incendie de forêts, de stress hydrique sur l'agriculture et la menace globale de près de 50 % des espèces végétales. L'adaptation aux incidences des changements climatiques semble donc une nécessité absolue. S'agissant de l'infrastructure de transport, et du réseau routier en particulier, une évolution vers la «route de 5^e génération» du projet européen «Forever Open Road», adaptable aux changements climatiques, est une nécessité.

Attica Tollway («Attiki Odos»), l'une des autoroutes les plus modernes de Grèce, se situe dans la zone métropolitaine d'Athènes. Elle s'étend sur une longueur totale de 65 km,

dans le périmètre d'un réseau de 150 km de voies de desserte/routes secondaires. Elle est constituée de trois voies de circulation dans chaque sens, d'une bande d'arrêt d'urgence, et compte 56 tunnels. Des ouvrages de protection anti-crués couvrent actuellement 67 km de l'ensemble du réseau. Attica Tollway (et sa société d'exploitation Attikes Diadromes SA) est lauréate de plusieurs prix pour son programme d'atténuation de l'empreinte carbone (réduction de 10 % des émissions de CO₂ depuis 2009) et son exploitation (prix «Décibel d'Or», 1^{er} prix du concours «Global Road Achievement Award» de la Fédération routière internationale (IRF) en 2008, label vert «my climate Awards 2011»).

Attikes Diadromes SA s'efforce d'identifier et d'intégrer des mesures efficaces d'adaptation aux changements climatiques. L'évolution climatique affectera certainement l'infrastructure routière, provoquant des phénomènes d'orniérage et de fonte de l'asphalte, la dilatation thermique des joints des ouvrages d'art, des glissements de terrain, des risques d'affouillement des piles de ponts et une détérioration générale des structures; aussi est-il primordial de se préparer à ces effets. Même si ceux-ci ne sont pas particulièrement manifestes pour le moment, des dispositifs ont déjà été mis en place pour assurer la capacité d'adaptation d'Attica Tollway. Actuellement, les mesures portent sur la protection et la gestion des inondations, l'entretien des chaussées, l'installation et l'exploitation de stations de mesures environnementales (météorologiques, notamment) et la gestion par anticipation.

Pour remédier aux phénomènes de précipitations extrêmes et d'inondations, un important réseau d'égouts et de protections anti-crués a été intégré à la conception de l'ouvrage afin de collecter les eaux de ruissellement superficielle, étant donné qu'il reste peu de récepteurs naturels dans la région. La société d'exploitation est responsable non seulement de l'entretien des 67 kilomètres d'ouvrages de protection anti-crués de l'autoroute elle-même, mais aussi de la protection des zones menacées par les crués à la périphérie d'Athènes. Concernant l'entretien des chaussées et les mesures d'adaptation, il est important de relever qu'il est beaucoup plus efficace d'entretenir très tôt l'asphalte plutôt que d'attendre l'apparition de problèmes plus sérieux. Les coûts d'entretien peuvent être quatre à cinq fois plus élevés lorsque les chaussées sont déjà endommagées. Les changements climatiques compliquent cet entretien car ils multiplient la fréquence des cycles nécessaires.

Pour être d'un bon rapport coût-efficacité, les cycles d'entretien routier exigent de recueillir diverses données. Attikes Diadromes SA tient un calendrier serré de relevés de divers paramètres de chaussée et utilise notamment à cet effet des déflectomètres à masse tombante, des profileurs à laser, des testeurs d'adhérence et des géoradars pour mesurer les épaisseurs de couches, les indicateurs structurels, la rugosité, l'orniérage, la résistance au dérapage et la texture de tout ou partie des voies de circulation dans les deux sens. Des séries chronologiques ont d'ores et déjà été recueillies pour ces paramètres à intervalles réguliers tout le long de l'autoroute, tandis que l'on dispose également d'informations saisonnières (semestrielles) pour d'autres paramètres. Ces contrôles sont dictés par la nécessité de déceler les tendances et d'alerter en temps opportun sur les besoins d'entretien pouvant résulter des effets des changements climatiques. En outre, des stations météorologiques implantées le long de l'autoroute fournissent des informations en temps réel sur les conditions météorologiques et enregistrent les phénomènes extrêmes. En règle générale, la démarche se veut anticipative, les facteurs de risque sont évalués selon différents scénarios et l'état de l'ouvrage est examiné quotidiennement, ainsi qu'après des phénomènes extrêmes. L'objectif est d'assurer la résilience de l'ouvrage grâce à la prévention et/ou au choix d'équipements et de matériaux qui pourront résister aux effets des changements climatiques sans mettre en péril la sécurité et le confort.

Enfin, il convient de relever que pour créer un ouvrage adaptable, à la fois sûr et fonctionnel, Attikes Diadromes SA sait qu'il faut intégrer une analyse de son cycle de vie dans le processus. Cette analyse s'inscrit directement dans le cycle de conception, d'exploitation, d'entretien et dans la budgétisation générale de tout projet routier. Lorsque l'on aborde les effets des changements climatiques, le choix de matériaux, qui permettent à l'infrastructure routière de s'adapter efficacement à ces effets sans entraîner de hausse inutile des coûts d'entretien, est primordial.

II.7. Incidences des changements climatiques et cahier des charges de l'adaptation du réseau routier (D. Tsamboulas, École nationale polytechnique d'Athènes - NTUA)

Les incidences des changements climatiques sur le transport routier concernent la sécurité, l'exploitation et l'entretien des infrastructures et réseaux routiers et affectent l'ensemble des usagers. Ces incidences sont à la fois directes (détérioration des chaussées, déformation et affaissement, interruptions de trafic, inaccessibilité, inondations, érosion) et indirectes (sur l'économie, l'environnement, la démographie et l'aménagement du territoire). Elles résultent pour l'essentiel de changements dans le régime des températures et des précipitations, dans l'intensité et le régime des vents et des tempêtes, du dégel du pergélisol et de l'élévation du niveau des mers. Toute stratégie de prise en compte de ces dimensions climatiques dans la conception et l'exploitation des réseaux routiers implique: (i) une évaluation de l'exposition aux risques, de la vulnérabilité, de la résilience et des mesures d'adaptation des réseaux; (ii) l'élaboration de calendriers (qui tiennent compte des effets à plus long terme des changements climatiques pendant le processus de planification); (iii) des stratégies d'adaptation. Les actions et mesures d'adaptation adoptées au niveau international par les États membres de la CEE et par d'autres pays (Canada, Danemark, États-Unis, Japon, Australie et Nouvelle-Zélande) sont passées en revue, ainsi que les modèles théoriques élaborés par les autorités respectivement chargées du réseau autoroutier au Royaume-Uni (Highways Agency) et aux États-Unis (Federal Highway Administration - FHWA).

La présentation met en évidence les bonnes pratiques et les mesures d'adaptation. Sont évoqués à cet égard les questions de conception, les performances de chaussées, les dégâts du gel, les cycles gel-dégel, le soulèvement des chaussées par le gel, le dégel du pergélisol, la montée du niveau des mers, les crues, l'érosion des routes et des ponts, l'instabilité des talus, les glissements de terrain et les avalanches. Des mesures possibles, d'un coût faible à moyen, sont présentées, notamment les coupes d'éclaircissage, l'amélioration et la maintenance des conduits d'évacuation des eaux de surface, la consolidation des accotements, l'élaboration de plans de gestion des ruissellements superficiels, l'évaluation des risques et le remplacement des arbres fragiles et des structures légères.

Il est proposé que la dimension des changements climatiques soit intégrée à la gestion technique quotidienne et prise en compte dans l'action publique et la réglementation. Les normes de calcul doivent être revues pour pouvoir faire face aux nouvelles conditions climatiques. Les mesures d'adaptation doivent être d'un bon rapport coût-efficacité et pérennes. La mise au point d'un cadre, qui permette à la fois des niveaux de service acceptables pendant les phénomènes météorologiques extrêmes et un retour rapide à des conditions de fonctionnement normales, s'impose de toute urgence. Les politiques nationales doivent prévoir des actions de sensibilisation et l'échange des bonnes pratiques. Ainsi que le suggère également le Livre blanc sur l'adaptation aux changements climatiques, «il sera nécessaire d'appliquer une approche plus stratégique et à plus long terme en matière d'aménagement du territoire» dans le transport routier.

II.8. Transport et changements climatiques aux États-Unis: la réponse aux enjeux de l'adaptation (J. Potter, ICF International)

Les effets des changements climatiques sur les réseaux routiers résultent principalement de l'élévation des températures, de vents plus violents, de fortes précipitations, d'une plus forte intensité des tempêtes sur les côtes et de la montée du niveau des océans. Les travaux réalisés dans le cadre de l'*Étude de la côte du golfe du Mexique*, phase II, sont présentés (voir aussi Annexe I). Les objectifs de cette étude étaient de: (i) fournir des informations primordiales sur les incidences locales des changements climatiques sur les différents modes de transport dans une région (sous la compétence d'une agence d'urbanisme (MPO) donnée) pour nourrir la réflexion sur la planification à long terme des transports; (ii) mettre au point des outils utilisables par les administrations chargées des transports au niveau national. Une procédure d'examen du risque climatique est proposée pour les transports, laquelle inclut: (i) une évaluation de la criticité de toutes les infrastructures de transport; (ii) une évaluation de la sensibilité de toutes les infrastructures essentielles; (iii) une évaluation de l'exposition aux risques de toutes les infrastructures essentielles et sensibles; (iv) une évaluation de la concentration de toutes les infrastructures qui sont essentielles, sensibles et exposées aux risques.

S'agissant de l'*Étude de la côte du golfe du Mexique*, phase II, les infrastructures essentielles sont examinées en exploitant des données d'inventaires, des informations économiques et des avis d'experts, mais également certains outils comme la modélisation des transports et les tests de redondance, et en faisant participer les acteurs partie prenante. Des normes de calcul, des situations analogues sur le plan historique et géographique et des avis d'experts sont utilisés au cours de l'évaluation de sensibilité et une matrice de sensibilité (matrice de notation) est mise au point comme outil de base. Enfin, pour évaluer l'exposition aux risques, les données de modèles climatiques à échelle réduite, les valeurs des extrêmes météorologiques et des indicateurs de pertinence sont utilisés conjointement avec une analyse de la montée du niveau de la mer, de l'exposition aux ondes de tempête et de l'adaptabilité. Des cartographies de crues selon différentes hypothèses d'élévation du niveau des mers et d'ondes de tempête sont dessinées, qui établissent une distinction entre effets incrémentiels, mais permanents, et effets catastrophiques, mais transitoires. Le défaut de données pertinentes et/ou l'abondance de données d'intérêt limité (ce que l'on appelle le «paradoxe de l'information») a été relevé comme constituant un obstacle majeur.

Des projections sur les effets possibles des changements climatiques, établies par l'autorité fédérale chargée du réseau autoroutier (FHWA) aux États-Unis, ainsi qu'un cadre d'évaluation des risques pour la ville de New York (incidences sur les infrastructures en termes d'ampleur et de probabilité,) sont présentés. Des solutions d'adaptation possibles sont proposées, parmi lesquelles: (i) la construction de digues contre les ondes de tempête et la consolidation des ponts et des fondations; (ii) l'adaptation à des eaux de crue montantes en surélevant les structures, en multipliant les travaux de maintenance, en améliorant la résistance aux crues et en procédant à des dragages plus fréquents; (iii) le déplacement et la réimplantation de certaines infrastructures; (iv) l'assouplissement de la planification grâce à la réduction des investissements irréversibles et des durées des contrats de bail.

L'étude donne à penser que des évaluations de risques, combinées à des mesures d'adaptation, peuvent conduire à plus de résilience. Leur intégration dans les procédures actuelles de planification et de gestion de risques est de nature à donner, globalement, de meilleurs résultats. Enfin, l'expérience acquise a montré que: (i) les décisions sur les mesures

à prendre doivent intervenir au plus vite; (ii) les phénomènes extrêmes à faible probabilité doivent être considérés avec prudence car ils peuvent avoir des conséquences très sérieuses s'ils se matérialisent; (iii) l'intégration des modèles existants est un facteur décisif; (iv) les avis (souvent variables) des acteurs partie prenante sont importants; v) les actions énergiques doivent être privilégiées.

II.9. Adaptation des infrastructures fluviale (N. Siedl, Via Donau – Österreichische Wasserstraßen-Gesellschaft mbH)

L'étude passe en revue les effets des changements climatiques sur la navigation fluviale et évalue les mesures intégrées de planification et de gestion du transport par voie navigable et les mesures d'adaptation, à partir de l'expérience acquise grâce au projet prioritaire (PP18) du réseau transeuropéen de transport (RTE-T), «Axe fluvial Rhin/Meuse-Main-Danube».

Les effets des changements climatiques sur la navigation fluviale sont essentiellement les suivants: (i) des sécheresses/la faiblesse des niveaux d'eau et débits d'étiage, qui peuvent entraîner de mauvaises conditions de navigation et multiplier les incidents (échouages) et la consommation énergétique; (ii) des pointes de crues/inondations, qui peuvent nécessiter de suspendre la navigation, occasionner des modifications dans les structures sédimentaires et la morphologie des cours d'eau, et endommager les chemins de halage, les berges et les dispositifs anti-crues; (iii) le gel, qui peut nécessiter de suspendre la navigation, empêcher les manœuvres d'éclusement et endommager la signalisation fluviale. Cependant, les résultats de l'étude montrent que les changements climatiques n'affecteront pas notablement le transport par voie navigable jusqu'en 2050. L'intégration de la planification et de la gestion des voies navigables se révèle une option viable, et les mesures ci-après sont proposées:

- Améliorer et intégrer les connaissances sur le développement futur des infrastructures fluviales;
- Définir les principes de la planification intégrée en faisant appel à des experts de différentes disciplines (économie, navigation, génie fluvial et écologie);
- Élaborer des lignes directrices concrètes pour les activités d'appui à la mise en œuvre des principes de la planification intégrée des projets d'infrastructures fluviales;
- Échanger des informations sur les bonnes pratiques existantes.

Le projet pilote de Witzelsdorf est présenté à titre d'exemple d'adaptation d'infrastructures fluviales. Les anciens épis sur les berges y ont été enlevés et remplacés par des épis neufs mieux conçus, tandis que les berges ont été reconstituées. Les travaux ont permis une meilleure dynamique de flux et ont diminué les phénomènes d'affouillement au niveau des têtes d'épi.

En matière de gestion intégrée des voies navigables, celle-ci concerne surtout les cycles d'entretien des chenaux de navigation, qui nécessitent des mesures particulières: (i) le contrôle périodique à l'aide d'un matériel de pointe pour l'analyse et le traitement des données hydrographiques; (ii) un calendrier de dragage des cours d'eau, qui tient compte des processus naturels (périodes de reproduction, arrêt de l'extraction des granulats dans les lits des cours d'eau); (iii) information en ligne sur les mesures de bathymétrie et de débit à l'intention des usagers.

La planification et la gestion intégrées des voies navigables doit assurer le maintien des chenaux en conformité avec les normes définies au niveau international. Les mesures d'adaptation à court, moyen et long terme doivent prévoir d'intégrer la maintenance

des infrastructures, d'optimiser l'exploitation des voies navigables actuelles et de mieux concevoir la flotte future, de mieux gérer les voies navigables, d'utiliser les technologies de l'information et de la communication et des solutions techniques appropriées et bien conçues.

II.10. Les changements climatiques et les voies navigables: la question de la morphologie et de la subsidence (B. Turpjin, Ministère néerlandais des infrastructures et de l'environnement - Rijkswaterstaat)

Cette étude présente les résultats de deux programmes de recherche sur les effets des changements climatiques sur le transport par voie navigable aux Pays-Bas: (i) *Les incidences des changements climatiques sur le transport par voie navigable et la compétitivité du port de Rotterdam* (2011); (ii) *Protéger les Pays-Bas contre les crues et assurer un approvisionnement suffisant des usagers en eau douce* (jusqu'en 2014).

Les incidences futures des changements climatiques sur les débits, les niveaux d'eau et la navigabilité du Rhin devraient consister en un affaiblissement des débits et des niveaux d'eau, conduisant à des restrictions de capacité de charge, à une majoration des coûts de transport et à d'éventuels reports intermodaux en faveur de la route et du rail. Les questions relatives à la morphodynamique fluviale sont particulièrement mises en évidence, l'affaissement du lit des cours d'eau et/ou leur soulèvement occasionnant l'un et l'autre des difficultés de navigation, notamment parce que les deux phénomènes varient dans l'espace. La dégradation des lits des cours d'eau (en raison de leur érosion sédimentaire) peut avoir de fortes incidences sur la navigation, en particulier là où les couches du lit ont été stabilisées. Des solutions techniques, susceptibles d'influer favorablement sur les cours d'eau en dégel et leur profil transversal (vannes de fond, radiers et pose de chicanes dans les courbes), sont présentées.

Ces études ont montré que les principales incidences sur la navigation fluviale (diminution de la capacité de charge et hausse des coûts de transport) seraient relativement modérées jusqu'en 2050. Il n'en demeure pas moins que les lits des cours d'eau continueront de se dégrader (en l'absence d'intervention) et que de nouvelles mesures de géomorphologie fluviale s'imposeront, ainsi que de meilleures pratiques de gestion fluviale. Le coût des mesures d'adaptation à la dégradation des lits a été estimé du même ordre que ce qu'il en coûtera pour stopper leur érosion.

II.11. Changements climatiques et adaptation des voies navigables (C. Heyndrickx et T. Breemers, Transport & Mobility Leuven)

L'objectif du projet européen ECCONET (7PC), «Effets des changements climatiques sur le réseau des voies navigables», inauguré en janvier 2010 et placé sous la houlette de Transport & Mobility Leuven (www.econet.eu), consiste à intégrer le savoir-faire d'une dizaine de partenaires de cinq pays différents dans le domaine des conditions environnementales actuelles et futures (météorologie, hydrologie, etc.), des infrastructures, de l'exploitation, des services et de l'économie, afin d'évaluer les incidences des changements climatiques sur le réseau européen de transport, notamment sur le réseau de voies navigables (Rhin et Danube).

L'hydrologie et sa dynamique commandent le transport par voie navigable. À cet égard, les analyses prospectives (étés plus chauds, hivers plus humides) montrent que les changements climatiques pourraient avoir (en l'absence d'intervention) des incidences notables sur le transport par voie navigable, plus spécialement au cours de la seconde moitié du siècle (scénarios de futur lointain, c'est-à-dire après 2050). Ces incidences sont essentiellement de faibles débits en été (bassin rhénan moyen, canal Rhin-Meuse-Danube, Haut Danube) et des débits élevés en hiver. Certaines incidences positives sont également établies, notamment en ce qui concerne la dynamique gel-dégel des cours d'eau. Outre les facteurs environnementaux, certaines évolutions sectorielles (la tendance à des navires de plus gros tonnage, par exemple) auront pour effet d'accroître la vulnérabilité de la navigation fluviale si les périodes de bas débit (et d'étiage) se multiplient ou se prolongent; on a observé que les coûts de transport augmentent rapidement lorsque les cours d'eau sont à l'étiage, le coût à la tonne/kilomètre étant multiplié par trois lorsque le niveau baisse de 4 à 2 mètres. Lorsque ce niveau tombe à moins de 1,6 m, tout transport par voie navigable devient impossible. Il apparaît que les considérations relatives à l'infrastructure et à une économie autonome des transports sont prépondérantes dans les risques que les changements climatiques font planer sur le transport par voie navigable.

Les mesures d'adaptation proposées concernent: (i) l'adaptation de la flotte de navigation fluviale (introduction de superstructures légères, volets amovibles, caissons latéraux, coques plates; (ii) l'infrastructure (information, dragage, génie fluvial); (iii) l'amélioration des prévisions (tendances et prévisions hydrographiques; (iv) la logistique (couplage de convois, coopération avec d'autres modes de transport). Une première évaluation indique que les mesures les plus prometteuses sont celles qui concernent les coques plates (pousseurs à hélices multiples), l'adaptation des navires de faible tonnage à un fonctionnement en continu et le recours au couplage des convois.

II.12. Passage des navires par le détroit du Bosphore et développement d'un corridor de transport multimodal pour relier la mer Égée et la mer Noire (Autorités portuaires d'Alexandroupolis et autorités portuaires de Kavala)

L'étude passe en revue les enjeux concernant la navigation et la sécurité dans le détroit du Bosphore et présente des statistiques de fréquentation du détroit. Ses principales conclusions sont les suivantes:

- La navigation par le détroit du Bosphore pose des difficultés majeures, surtout pour les navires de gros tonnage, en raison d'une morphologie et d'une hydrodynamique complexes des chenaux.
- Le renforcement de la réglementation du détroit se traduit par un allongement des temps d'attente, qui peuvent être de 5 à 7 jours en fonction du type et du tonnage du navire et de la période.
- La fréquentation moyenne du détroit a été de 49 200 navires par an et de 135 navires par jour au cours des 15 dernières années (avec une pointe de trafic entre 2004 et 2006).
- Les navires qui empruntent le détroit sont, à 60 %, des navires de charge classiques, puis des pétroliers, des vraquiers et des porte-conteneurs.

Les autorités de deux ports du nord de la Grèce (Kavala et Alexandroupolis) ont entamé des discussions avec les autorités portuaires de Bourgas et de Varna, sur la mer Noire, en Bulgarie, aux fins d'une éventuelle coopération dans le transport intermodal. Les premières rencontres (en juin et octobre 2011) ont montré que le transport de fret et la navigation de croisière sont les deux segments les plus prometteurs. S'agissant du fret, l'idée première est de développer un corridor intermodal (corridor *Sea2Sea*), dont les ports grecs et bulgares précités constitueraient les principaux nœuds. Lors des réunions suivantes en 2012, il a été décidé de travailler à une proposition afin que le corridor *Sea2Sea* soit intégré au programme des réseaux transeuropéens de transport de l'UE. Le corridor envisagé comportera les éléments suivants:

- Deux plates-formes de transport maritime en Méditerranée (ports de Kavala et d'Alexandroupolis) qui permettront d'insérer le corridor dans les axes maritimes méditerranéens.
- Des liaisons ferroviaires qui relieront les deux ports grecs aux ports bulgares de Bourgas et de Varna en Bulgarie (et au port de Roussé sur le Danube).
- Deux plates-formes de transport maritime dans la mer Noire (Varna et Bourgas), qui relieront le corridor *Sea2Sea* aux autres ports de la mer Noire.

Ce réseau international présentera de nombreux avantages en termes de compétitivité. Actuellement, la liaison entre la Méditerranée et la mer Noire est desservie par le détroit du Bosphore, soumis déjà à de fortes contraintes (accroissement du trafic et des coûts et allongement des temps d'attente). Le corridor *Sea2Sea* pourrait constituer un itinéraire de substitution offrant les avantages suivants:

- Améliorer la compétitivité de toute la région et son rôle de voie d'accès commercial à l'Europe centrale;
- Améliorer la compétitivité des quatre ports grecs et bulgares et l'interconnexion de leur réseau ferroviaire;
- Renforcer le réseau transeuropéen de transport actuel grâce à l'interconnexion opérationnelle de l'«autoroute de la mer» de la Méditerranée orientale avec l'axe n° 7 du réseau ferroviaire transeuropéen et le projet prioritaire (PP18) du réseau transeuropéen de transport (RTE-T), «Axe fluvial Rhin/Meuse-Main-Danube» (voir Innovation and Networks Executive Agency);
- Contribuer au développement économique de toute la région.

II.13. Adaptation des réseaux de transport aux changements climatiques (L.B. Barbeau Mauritius Ports Authority)

Le transport maritime a accéléré la mondialisation des échanges et de l'économie, en particulier depuis les débuts de la conteneurisation, qui a révolutionné le transport grâce à la possibilité d'un transport de porte à porte et d'une intégration aux autres modes de transport. Aujourd'hui, le transport maritime règne sur le transport de marchandises puisque 80 à 90 % de toutes les marchandises transportées sont acheminées par la voie maritime (au moins pour une partie du trajet). Eu égard aux changements climatiques, même s'il est possible que certains pays bénéficient de nouvelles opportunités d'échanges et de transport grâce à l'ouverture de nouvelles routes (et au raccourcissement des distances en résultant), notamment la route maritime du Nord non gelée, les effets des changements climatiques pourraient constituer un handicap pour d'autres pays.

Maurice appartient à un vaste groupe de nations que l'on nomme «petits États insulaires en développement» (PEID). Port Louis est situé en un point stratégique, au carrefour de grandes routes maritimes, comme celles qui relient l'Extrême-Orient à l'Afrique et l'Europe à l'Australie. Ce port est également la seule fenêtre maritime pour le commerce extérieur du pays (99 %) et entre pour une part notable dans le PIB national. En outre, Port Louis offre des liaisons d'une importance vitale avec les îles de l'océan Indien et la région environnante. La région est sujette à des tempêtes tropicales, principalement en été, qui peuvent s'accompagner de conditions météorologiques extrêmes. Ces phénomènes extrêmes provoquent des inondations dans les terminaux portuaires, ce qui réduit la productivité des opérations de transbordement et peut obliger les porte-conteneurs à faire demi-tour, détourner le trafic commercial vers d'autres ports, accroître les coûts et nuire à l'économie de l'île.

L'adaptation aux effets des changements climatiques est donc de première importance. Malheureusement, les PEID ne disposent pas toujours des informations et du savoir-faire pour concevoir la protection des quais et digues portuaires contre les effets climatiques, des travaux dont le budget, quoi qu'il en soit, dépasse leurs moyens. Le savoir-faire local étant rare, ces États doivent s'en remettre à l'aide de pays amis ou d'organisations internationales. Des investissements s'imposent de toute urgence pour construire et renforcer des dispositifs brise-lames appropriés, capables de résister à la détérioration des états extrêmes des vagues. En outre, les quais, généralement construits à 2,5 m au-dessus du zéro hydrographique, devront être rehaussés pour éviter leur submersion compte tenu de l'élévation du niveau moyen des mers et des ondes de tempête.

Les PEID ressentent déjà de sérieuses répercussions du fait des changements climatiques. L'intensité et la fréquence des inondations côtières et l'érosion des littoraux y ont déjà occasionné de sérieux problèmes. Leur dépendance vis-à-vis du transport maritime et les investissements conséquents nécessaires pour moderniser et revoir la conception de leurs infrastructures pèsent lourdement. Les PEID ont un besoin urgent de former et de mobiliser des scientifiques et des ingénieurs locaux qui seront capables de piloter le changement et d'étudier des mesures appropriées à l'échelle locale, plutôt que d'un défilé de consultants dans le pays, ainsi qu'il est de coutume. Le développement de capacités est de première importance car ces États seront alors en mesure: (i) d'acquérir un savoir-local dans les questions à la fois techniques et réglementaires (juridiques); (ii) de procéder à des évaluations de risques et à des inspections de navires; (iii) de développer des plates-formes résistantes aux effets du climat et des ports régionaux, avec des méga-navires et des navires plus modestes opérant en tandem pour desservir une région particulière. Enfin, le développement de ports écologiques («Les ports verts»), équipés pour utiliser des sources d'énergie renouvelable (solaire, houlomotrice et éolienne) locales, constitue également une mesure allant dans le bon sens.

II.14. Changements climatiques et infrastructures portuaires: analyse qualitative des conséquences, planification et cahiers des charges (A. Becker, université de Stanford)

L'étude livre un bref historique des incidences des changements climatiques sur les infrastructures portuaires, ainsi que les résultats d'une enquête (par questionnaire) sur l'adaptation aux changements climatiques. Les ports maritimes sont des moteurs économiques multidimensionnels, fournissent des emplois et des ressources essentielles et facilitent le commerce des marchandises et de l'énergie (puisque 80 à 90 % du fret mondial est acheminé par bateau et donc, transite par les ports). Le développement portuaire

est subordonné à diverses conditions (profondeur d'eau, existence d'un port protégé, possibilités de liaisons multimodales, etc.). Certains sites portuaires sont très vulnérables aux inondations, aux ondes de tempête et à l'élévation du niveau des mers, et ce d'autant plus que les projections climatiques indiquent que le niveau des mers pourrait monter entre 0,75 et 1,9 m et que le niveau actuel de crue centennale pourrait être atteint tous les trois ans à l'horizon 2100.

Une enquête en 30 questions a été adressée aux 350 adhérents de l'AIP (Association internationale des ports) et de l'Association américaine des autorités portuaires (AAPA), à l'été 2009. Les principales conclusions de l'analyse sont les suivantes: (i) les répondants semblent s'inquiéter des incidences des changements climatiques, mais ne s'estiment pas informés sur le sujet; (ii) bien que les ports constituent des infrastructures lourdes et à longue durée de vie, leurs normes de construction ne tiennent pas compte des changements climatiques – il a été noté avec intérêt que seuls 16 % des répondants envisageaient de rénover leurs dispositifs de protection contre les tempêtes dans leur prochain plan décennal de construction; (iii) l'énorme majorité des répondants (97 %) déclarent qu'ils auraient des problèmes si le niveau des mers montait de 0,5 m, voire plus.

L'enquête a également révélé que même si les incidences des changements climatiques sur les ports sont bien comprises en général, leurs conséquences spécifiques ne le sont pas. Pour cette raison, deux ports des États-Unis (Gulfport, dans le Mississippi, et Providence, à Rhode Island), très vulnérables (aux tempêtes), ont été retenus pour pousser plus loin l'analyse. Les incidences des tempêtes ont été réparties en six catégories: (i) accumulation de débris; (ii) dommages directs; (iii) conséquences sur l'activité; (iv) conséquences locales et régionales à l'extérieur du port; (v) endommagement des réseaux intermodaux et des chaînes d'approvisionnement; (vi) dégradation de l'environnement. Au total, 125 stratégies particulières, susceptibles d'accroître la résilience des ports, ont été citées par les répondants. Cependant, il semble qu'il faudra réunir de multiples acteurs, publics et privés, pour les mettre en application.

Enfin, il ressort que (i) quantifier les véritables conséquences des changements climatiques pour les ports soit particulièrement difficile (ii) les incidences et conséquences des changements climatiques risquent de se manifester en dehors de la durée de carrière et de l'espérance de vie des décideurs publics, ce qui introduit de la confusion dans les questions de responsabilité; (iii) les prochaines étapes devront prévoir d'élaborer des stratégies, de fixer des calendriers et de répartir clairement les responsabilités.

II.15. Incidences des changements climatiques sur les transports dans les petits États insulaires en développement des Caraïbes (A.F. Velegakis, Département des sciences de la mer, université de la mer Égée, Grèce)

Des travaux récents donnent à penser que les prévisions antérieures sur les changements climatiques, en particulier celles concernant l'intensité et la fréquence des phénomènes extrêmes dans la région des Caraïbes, pourraient devoir être revues. En effet, ces phénomènes ont des conséquences très dommageables pour les infrastructures des petits États insulaires en développement (PEID) des Caraïbes, qui ont été conçues, dans leur majorité, pour les conditions climatiques habituelles et qui pourraient être particulièrement vulnérables à des conditions extrêmes plus dures. Le niveau d'exposition au risque climatique des PEID des Caraïbes est jugé très élevé du fait de la concentration de la population, de

l'industrie, des services (comme le tourisme, par exemple) et des équipements de transport sur les côtes; cet environnement va devoir supporter l'essentiel des effets des changements climatiques dans la région, de l'élévation à long terme du niveau des mers, de l'accroissement des températures de l'air et de la surface des mers et de l'acidification des océans, qui vont entraîner des destructions d'habitats et l'aggravation des risques environnementaux, du caractère destructeur des tempêtes tropicales et des inondations côtières.

Le transport international (maritime et aérien) est une nécessité pour les économies des PEID des Caraïbes. Or, les changements climatiques devraient avoir de sérieuses incidences à la fois sur les infrastructures et les services de transport. Les équipements portuaires seront touchés progressivement par l'élévation du niveau moyen des mers et des ondes de tempête et partant, par une fréquence accrue des inondations, des retards et des interruptions dans les services de transport. Les jetées et les digues de protection des ports seront moins efficaces et nécessiteront d'être surélevées et/ou consolidées. La montée du niveau des mers provoquera des prismes de marée plus importants, des courants plus forts, des phénomènes d'affouillement plus intenses des fondations et/ou l'accumulation de limon. Les épisodes de fortes précipitations pourront provoquer des glissements de terrain et des coupures de réseaux routiers sur les côtes (et en montagne). La hausse des températures moyennes et des vagues de chaleur plus persistantes affecteront les pistes d'aéroports (flambage sous l'effet de la chaleur) et l'envol des avions, ce qui entraînera des restrictions de charge utile, des annulations de vols et des interruptions. Les pistes devront donc être prolongées, ce qui ne sera pas toujours envisageable compte tenu des contraintes d'espace. Pour toutes ces raisons, des études de cas récentes concluent à des incidences considérables des changements climatiques sur le transport dans les PEID des Caraïbes (ECLAC, 2011).

Le transport est une activité tirée par la demande. S'agissant des PEID, cette demande repose sur le tourisme international et sur l'accueil de visiteurs internationaux venus dans les îles des Caraïbes pour y trouver le sable et le soleil. De fait, les voyages et le tourisme entrent pour une très large part dans le PIB des PEID des Caraïbes (plus de 25 % dans la plupart des cas et souvent, plus de 45 %, voir ECLAC (2011)). Or, la plupart des plages caribéennes sont exposées à une menace implacable: elles s'érodent et rétrécissent d'entre 0,5 et 1,0 m/an, en moyenne, sur la plupart des îles des Caraïbes (voir Cambers, 2009; Peduzzi *et al.*, 2013). Si l'érosion se poursuit à ce rythme pendant quelques années encore, alors la plupart des plages caribéennes seront détruites, les recettes du tourisme chuteront, entraînant la dévastation des économies locales et de leur développement. Il est évident que ce scénario aura des répercussions négatives pour les services de transport international dans la région.

Étant donné que les infrastructures, les services et la demande de transport sont tous confrontés à des enjeux climatiques de taille dans la région, d'importantes mesures d'adaptation s'imposent de toute urgence. Tout d'abord, des prévisions plus précises sur les incidences des changements climatiques dans la région sont nécessaires pour produire des évaluations de risques réalistes. Ensuite, le développement de capacités locales revêt une importance cruciale dans une zone qui sera confrontée à d'importants enjeux techniques et économiques (voir Peduzzi *et al.*, 2013, par exemple); il faudra mobiliser à cet effet une aide et des financements internationaux. Troisièmement, des politiques publiques reposant sur des données scientifiques, prenant en considération les spécificités de la région, doivent être formulées de toute urgence et adoptées. Enfin, s'agissant des infrastructures de transport, développer leur résilience est un impératif car, dans la plupart des cas, il n'est pas envisageable de les déplacer.

II.16. Adaptation des infrastructures et des services de transport. Les travaux de la CESAP (P. O'Neill, Commission économique et sociale des Nations Unies pour l'Asie et le Pacifique, CESAP)

Six domaines stratégiques pour le transport sont identifiés: croissance verte, interconnexion des économies, développement durable, Objectifs du Millénaire pour le développement (OMD) et changements climatiques. Dans son nouveau plan d'action quinquennal, le Secrétaire général des Nations Unies identifie les transports durables comme l'un des cinq éléments constitutifs du développement durable. Les objectifs du plan d'action en la matière sont les suivants: (i) mobiliser et sensibiliser; (ii) renforcer l'échange des bonnes pratiques; (iii) aider à l'élaboration de stratégies nationales en faveur de transports durables; (iv) développer les capacités; (v) constituer des partenariats. La planification intégrée des transports, les politiques publiques de transports urbains, l'innovation technologique, la promotion des voies navigables et du transport côtier et le financement de projets de transports durables sont des priorités.

Comprendre les risques, adapter les infrastructures de transport existantes, la résilience et l'ajustement des plans futurs sont autant d'actions spécifiques en faveur d'un réseau de transports durables, lequel doit prévoir l'intégration des réseaux routiers, ferroviaires, maritimes et portuaires, le franchissement aisé des frontières et le développement de ports à sec intermédiaires. La CESAP encourage les États membres à trouver un accord sur les questions de normalisation, de cahier des charges, d'entretien et de suivi relatives au réseau autoroutier asiatique. En outre, la CESAP suit les progrès réalisés et fournit une assistance technique à l'optimisation des projets concernant la sécurité. Elle encourage également l'achèvement du réseau ferroviaire transasiatique.

La CESAP défend le modèle d'un secteur des transports sûr, propre et d'un coût raisonnable. Elle prône les mesures suivantes: diminuer l'empreinte carbone dans la consommation de matériaux et d'énergie; mobiliser les fonds affectés aux changements climatiques (pour des bus propres, par exemple); programmer moins de projets de transports privés, au profit de transports publics (transport rapide par autobus, métro léger, etc.); promouvoir des politiques publiques/investissements en faveur de modes non motorisés (transport pédestre, bicyclette); contrôler les émissions, atténuer leurs effets et préserver les services des écosystèmes. La CESAP préconise des actions spécifiques telles que l'adaptation à des matériaux à plus faible empreinte carbone (substitution, chaque fois que possible, de matériaux naturels à des matériaux de construction comme le ciment ou les métaux) et à certaines techniques de construction (mobilisant plus de main-d'œuvre que d'énergie, emploi de matériaux locaux, construction de «chaussées perpétuelles» à longue durée de vie, stabilisation des sous-couches). Des questions comme la protection de l'environnement (solutions de construction naturelle), la préparation, la gestion et la réponse aux catastrophes et la reconstruction bénéficient d'une attention particulière. En conclusion, il est nécessaire de: (i) comprendre les risques et leurs coûts probables; (ii) adopter des plans d'un coût raisonnable pour adapter et moderniser les infrastructures actuelles; (iii) planifier des infrastructures de transport résilientes, d'un coût raisonnable et stratégiques pour les défis de demain.

II.17. Changements climatiques et adaptation des ports et de la logistique de transports: un kaléidoscope (Adolf Ng, université polytechnique de Hong Kong)

L'adaptation des ports aux changements climatiques nécessite: (i) une définition précise du problème; (ii) une identification des principaux obstacles et difficultés; (iii) l'identification des zones et des régions les plus exposées; (iv) la hiérarchisation des actions envisageables; (v) l'adoption de mesures en vue de l'établissement de «bonnes pratiques» internationales. En outre, des campagnes de sensibilisation doivent être organisées d'urgence, car les gestionnaires des ports et des différents modes de transport ne semblent pas se rendre suffisamment compte de la problématique en jeu, en particulier pour les ports secondaires ou «régionaux». Les informations sur les facteurs et les incidences locales des changements climatiques sont aussi très lacunaires, ce qui fait obstacle aux efforts de conception de mesures pertinentes et adaptées.

Plusieurs exemples étudiés (élévation du niveau de la mer dans le golfe du Mexique, froid et gel dans le port de Tianjin, au nord de la Chine, fonte des glaces arctiques en Sibérie et changements liés au climat dans la production agricole et la pêche en Tasmanie) semblent indiquer que les facteurs des changements climatiques sont très variés et que leurs incidences sont diverses sur les réseaux de transport. Par ailleurs, la définition de l'élévation du niveau de la mer ou de l'augmentation de la fréquence et de la destructivité des ouragans et des tempêtes tropicales est toujours débattue. En outre, la discussion concerne surtout les ports de conteneurs situés sur les grands axes de transport commercial ou sur certains points sensibles. Quoi qu'il en soit, la problématique est nettement plus complexe, car elle englobe aussi la volonté et la capacité à s'adapter, la logistique et les chaînes d'approvisionnement, les relations entre le port et la région, la durabilité des ressources, la gestion du littoral, la biodiversité marine et le bien-être des populations locales. On peut craindre que les régions périphériques, moins bien dotées financièrement et dont les infrastructures portuaires sont moins perfectionnées, soient moins en mesure de faire face à ces difficultés.

Les responsabilités pour ce qui touche à l'élaboration des politiques et aux mesures d'action devraient être partagées entre réseaux de transport, de nombreux efforts d'adaptation se limitant habituellement à certains secteurs et modes de transports. Il est également difficile, mais important, de veiller à ce que différents sous-secteurs adoptent une vision et des normes similaires, afin de formuler des solutions complémentaires qui s'appliquent à toute la chaîne d'approvisionnement. Faire face aux changements climatiques sur les ports ne relève pas nécessairement de la responsabilité individuelle de ces derniers, mais du système portuaire dans son ensemble.

II.18. Solutions innovantes concernant les effets des changements climatiques sur les réseaux de transport (R. Sfakianaki, Ministère de l'infrastructure et des réseaux de transport, République hellénique)

Les effets des changements climatiques sur les réseaux de transport entraîneront une hausse généralisée du coût de divers modes de transports, devraient se traduire par des pertes de PIB et doivent être gérés par des actions énergiques et précoces. Il faudrait chercher à améliorer la résilience des réseaux de transport, à réduire les coûts d'entretien, à prolonger la durée de vie des infrastructures et à augmenter la capacité de transport. En ce qui concerne le réseau routier, certaines méthodes et pratiques classiques de renforcement de la résilience ont été examinées. Des stratégies d'adaptation précoces devraient être élaborées pour les risques d'inondation. Un corpus croissant d'études dans ce domaine se constitue, principalement fondé sur la modélisation numérique, des outils de simulation d'inondations et des systèmes de surveillance et d'information. Les réseaux ferrés, bien qu'ils soient relativement sûrs, peuvent subir des défaillances dues aux changements climatiques (affouillement et endommagement des ponts, glissements de terrains) qui peuvent avoir des conséquences graves, notamment la perte de vies humaines, d'importants frais de remplacement ou la fermeture de certaines lignes. Le projet SMARTRAIL, qui propose une démarche globale rendant le réseau ferré fiable, sûr, économe et durable, a été examiné. Les modèles innovants proposés dans ce projet peuvent aider les gestionnaires: (i) à prendre des décisions rationnelles; (ii) à faire bon usage de fonds en quantité limitée; (iii) à contribuer au maintien à long terme des infrastructures ferroviaires.

Les ports seront touchés par l'élévation du niveau de la mer, les ondes de tempête, des conditions météorologiques extrêmes et l'inondation des côtes. Pour la Grèce, qui compte environ 16 300 km de côtes et plus de 1 000 ports et mouillages, le principal problème est celui des vagues et des ondes de tempête qui peuvent inonder les côtes. Les solutions d'ingénierie côtière, efficace ou catastrophiques (construction de brise-lames, de digues ou de gabions qui ont provoqué des phénomènes d'érosion sur les côtes avoisinantes) sont présentées. Les solutions à venir devraient s'appuyer sur une surveillance des côtes adaptée et précise, afin de permettre une gestion efficace. La méthode de l'Université polytechnique de Catalogne (UPC), qui a été développée pour évaluer la vulnérabilité des côtes aux tempêtes, est citée en exemple.

Des mesures précoces (d'accroissement de la capacité et d'allongement de la durée de vie des infrastructures), une démarche holistique (analyse sur l'ensemble du cycle de vie, intégration de pratiques réussies, prise en compte des paramètres climatiques au stade de la conception), la promotion de l'innovation et la technologie utilisée dans les systèmes d'alerte précoce, de nouveaux outils d'élaboration de plans stratégiques et des actions dynamiques face aux changements climatiques sont autant de mesures qui peuvent aider au développement durable des infrastructures de transport. Il faudra envisager des mesures d'ajustement portant sur: (i) la définition des fonctionnalités; (ii) les modèles futurs; (iii) la promotion de solutions pratiques et innovantes; (iv) une affectation stratégique des terres et des décisions intelligentes concernant les réseaux; (v) l'intégration sectorielle; (vi) l'élaboration de règlements européens permettant une gestion efficace des côtes; (vii) l'élaboration d'un observatoire pertinent des changements climatiques.

II.19. Incidences des changements climatiques et possibilités d'adaptation des réseaux de transport en Grèce (N. Mitsakis, Centre de recherche technique – Institut hellénique des transports, CERTH-HIT)

Le CERTH-HIT dispose d'une expérience de longue date dans l'évaluation des incidences des changements climatiques, notamment grâce à sa participation aux projets WEATHER et MOWE-IT et par sa contribution à l'étude sur les incidences environnementales, économiques et sociales des changements climatiques pour la banque centrale grecque. Fort de cette expérience, le CERTH-HIT semble indiquer que ce qui est nécessaire actuellement dans les études d'évaluation est une collaboration pluridisciplinaire entre ingénieurs spécialisés dans les transports, météorologues, économistes des transports, responsables politiques et institutions financières. Cette collaboration aboutira à des projections plus précises, à une évaluation plus efficace des risques, de la vulnérabilité et de la criticité des réseaux de transport, mais aussi à une quantification des incidences à l'échelle des réseaux de transport en vue de pouvoir en estimer le coût.

Certaines parties de l'étude sur les transports pour la banque centrale grecque sont reproduites ci-après, avec présentation de la méthode suivie et principales conclusions. Compte tenu des projections climatiques pertinentes (projection du nombre de jours où la température dépasse 35 °C), une méthode adaptée aux transports a été utilisée. Elle se compose des cinq étapes suivantes: (i) hiérarchisation des priorités à partir des évaluations de vulnérabilité effectuées sur les infrastructures et les services du réseau national de transport; (ii) projections sur la demande de transport à venir; (iii) évaluation des incidences et des coûts des changements climatiques pour le secteur des transports; (iv) évaluation qualitative des incidences, propositions d'adaptation et d'atténuation, et conclusions générales; (v) recommandations. Quatre zones (ouest, centre, est et îles) ont été sélectionnées en Grèce et les réseaux routier et ferroviaire national et régional étudiés, ainsi que les 119 principaux ports et 43 aéroports. Les principales conclusions sont les suivantes

- De 1,5 % à 6,6 % (selon la zone) du réseau routier national et régional (environ 9 530 km) se trouve à 50 m du littoral et au même niveau, environ, que celui de la mer;
- La demande de transport (de passagers et de marchandises) devrait doubler sur les réseaux routiers national et régional jusqu'en 2050;
- Selon le scénario d'adaptation retenu, les coûts liés à la réorganisation, à la réparation et à l'entretien des infrastructures ferroviaires et routières est compris entre 115 millions et 346 millions d'euros par an à l'horizon 2050 selon les estimations, et devraient être de l'ordre de 195 millions à 595 millions d'euros par an à l'horizon 2100. En fonction du scénario d'adaptation retenu, les températures moyennes et extrêmes devraient avoir un impact négatif important sur l'infrastructure routière (dégâts de la chaussée et des structures, confort réduit des passagers et du personnel, demande accrue de climatisation).

Les mesures proposées pour atténuer ces incidences ou s'y adapter passent notamment par: (i) la mise en œuvre d'une politique de réduction des gaz à effet de serre dans les transports; (ii) des mesures visant à réduire l'utilisation des véhicules des particuliers; (iii) l'élaboration de plans de restrictions prédéfinies et organisées de la circulation dans les zones urbaines durant les canicules; (iv) des programmes de vérification rapide permettant un entretien ciblé de la chaussée; (v) des travaux de recherche-développement sur de nouveaux types de chaussées; (vi) la réorganisation des horaires de train de façon à tenir compte d'épisodes imprévus de canicules importantes, voire très importantes.

II.20. La France en action: Plan national d'adaptation au changement climatique (PNACC, 2011 – 2015) – Mesures sur les infrastructures et services de transport (André Leuxe – Direction générale des infrastructures, des transports et de la mer (DGITM) – Ministère français de l'écologie du développement durable, des transports et du logement)

La lutte contre les changements climatiques est une priorité nationale. Dans son discours d'ouverture de la Conférence environnementale du 14 septembre 2012, le président de la République François Hollande a annoncé que la France accueillerait la conférence internationale de 2015 sur le climat (COP 21). «Notre objectif est de parvenir à un accord global sur le climat en 2015» et «la France s'investira pleinement pour la réussite de ce rendez-vous», a-t-il notamment déclaré.

I – Contexte

Le changement climatique est en cours et on en ressent déjà les effets : «De nombreux systèmes naturels sont affectés par les changements climatiques régionaux» (GIEC, 2007). Le message de la science ne laisse aucune place au doute quant à la signification de ces changements même si des incertitudes demeurent concernant leur ampleur. Des changements profonds sont inévitables, quels que soient les efforts déployés pour réduire les émissions de gaz à effet de serre, en raison de l'inertie du système climatique. Ces changements toucheront de nombreux secteurs: agriculture, exploitation forestière, tourisme, pêche, biodiversité, foncier, construction et infrastructures de transport. Le changement climatique ne se réduit plus à une préoccupation des scientifiques dans un avenir lointain. Il s'agit d'une question d'actualité et pertinente dans les politiques menées à l'échelon international.

Les mesures nécessaires pour freiner le changement climatique en réduisant les émissions de gaz à effet de serre (mesures d'atténuation) sont au cœur du «plan climat» adopté en 2004 et régulièrement actualisé (cf. article 2 de la loi n°2005-781 du 13 juillet 2005). Alors qu'un certain nombre de mesures d'atténuation ont déjà été prises, l'adaptation aux changements climatiques est devenue un problème important qui nécessite une mobilisation nationale. La loi n° 2009-967 du 3 août 2009 prévoit dans son article 42 qu'«un plan national d'adaptation climatique pour les différents secteurs d'activité sera préparé d'ici à 2011».

L'homme et la nature ont peut-être la capacité de s'adapter spontanément, du moins en partie, aux changements climatiques. Toutefois, si l'on ne se prépare pas à ce changement, il entraînera des coûts et des dégâts dont l'ampleur dépassera largement l'effort d'anticipation par la planification. Par conséquent, nous devons agir dès aujourd'hui pour réduire l'ampleur de ces dommages, qu'ils soient environnementaux, matériels, financiers ou en vie humaines. L'économiste Nicholas Stern a estimé que le coût de l'inaction représentait entre 5 % et 20 % du produit intérieur brut (PIB) tandis que le coût de l'action n'amputerait le PIB que de 1 % à 2 %.

Le Plan national d'adaptation au changement climatique (PNACC) français a été adopté en juillet 2011. Il définit divers indicateurs de performance qui sont suivis annuellement et dont l'évaluation est rendue publique. Un comité d'évaluation est chargé de produire un rapport d'évaluation à mi-parcours et à la fin de la période d'exécution du plan.

II – Mesures relevant de la fiche action «infrastructures et systèmes de transport» du PNACC:

Les impacts des changements climatiques sur les réseaux de transport concernent tous les modes. L'adaptation est rendue indispensable par la longue durée d'utilisation des réseaux et matériels de transport. Différentes mesures ont été identifiées. Elles permettent d'analyser l'impact des changements climatiques, d'éviter de fragiliser les systèmes de transport et de préparer l'amélioration de la résistance et de la résilience des infrastructures, existantes et futures, pour assurer la continuité et la sécurité des services de transport des personnes et des biens.

Action n°1: Passer en revue et adapter les référentiels techniques pour la construction, l'entretien et l'exploitation des réseaux de transport (infrastructure et matériels).

Il s'agit de s'assurer que les infrastructures, construites pour une période longue (jusqu'à un siècle ou davantage) selon les référentiels actuels, permettent de répondre de façon satisfaisante aux évolutions possibles des conditions moyennes et extrêmes des changements climatiques. Il en est de même pour les matériels de transport. Pour les nouveaux projets de transport, l'adéquation des référentiels techniques nationaux, européens et internationaux aux aléas révisés est indispensable.

Action n°2: Étudier l'impact du changement climatique sur la demande de transport et les conséquences sur la réorientation de l'offre de transport.

Le changement climatique pourrait modifier la demande de déplacement à moyen et long terme: modification des origines-destinations liées à la répartition temporelle des flux et à la répartition géographique des populations et des activités, à l'attrait des destinations touristiques, etc. Il convient d'éclairer les évolutions possibles de la mobilité des voyageurs et du fret et leurs incidences sur l'offre de transport. L'impact de l'évolution des morphologies urbaines sera également étudié.

Cette action se décline en quatre mesures qui concernent l'évolution de la répartition modale, géographique et temporelle des transports.

- Pour les voyageurs interurbains, lancer une recherche sur l'évolution du choix des localisations des populations et des activités et sur les destinations touristiques;
- Pour les voyageurs urbains, étudier le lien entre politique d'aménagement de la ville et transport;
- Dans le domaine aérien, poursuivre l'analyse réalisée dans le cadre de l'OACI sur l'évolution des trafics aériens;
- Pour les marchandises, étudier l'évolution de la localisation des activités économiques et des grands corridors de fret.

Action n°3: Définir une méthodologie harmonisée pour réaliser les diagnostics de vulnérabilité des infrastructures et des systèmes de transport terrestre, maritime et aéroportuaire.

Les méthodes d'analyse de la vulnérabilité sont encore assez peu développées car le changement climatique est une problématique récente. Des méthodes d'analyse de risques liés à certains événements extrêmes ont toutefois été développées. Elles restent cependant spécifiques aux parties de réseaux étudiés. Des supports méthodologiques sont en cours de création par les milieux de la recherche scientifique et technique, en lien avec les gestionnaires de réseaux afin de faciliter la réalisation d'études locales et à l'échelle de chaque réseau, conduisant à établir un état de vulnérabilité des différents réseaux et à

permettre la comparaison sur la base des « indices de criticité ». Cette action comporte deux mesures:

- Élaborer une méthodologie cadre d'analyse de vulnérabilité adaptée aux réseaux de transport,
- Élaborer une méthodologie d'analyse de vulnérabilité adaptée aux réseaux et aux points singuliers (ouvrages d'art routiers, etc.).

Action n°4: Établir un état de la vulnérabilité des réseaux de transport terrestre, maritime et aérien en métropole et outre-mer, et préparer des stratégies de réponse adaptées et progressives aux problématiques globales et territoriales des changements climatiques.

Il s'agit d'évaluer le risque climatique auquel sont confrontées toutes les infrastructures de transport (routier, ferroviaire, fluvia, maritime et aérien) pour leur durée de vie prévue. Les régions d'outre-mer ou les zones isolées (îles, fonds de vallée en montagne) pour lesquelles il n'existe qu'une desserte unique de grande capacité présentent une vulnérabilité particulière de l'infrastructure (aéroport, port, pont, etc.). La modification des conditions climatiques moyennes et l'accroissement des événements extrêmes en fréquence et en durée posent les questions de la responsabilité et de l'arbitrage dans le choix d'une stratégie d'adaptation (repli vers l'intérieur, renforcement, acceptation d'une indisponibilité temporaire avec report du service de transport vers d'autres moyens, etc.) du niveau de risque admissible et du choix du moment pour investir et mettre en œuvre les stratégies d'adaptation. Cette action comporte deux mesures:

- Réaliser des études de vulnérabilité,
- Animer un réseau de correspondants pour mettre à profit les expériences et apporter un soutien méthodologique aux gestionnaires d'infrastructure et aux opérateurs de transport.

III – Travaux en cours:

L'action n°1, consistant à passer en revue les référentiels techniques, devrait être terminée d'ici à la fin de 2013. Des études seront lancées cette année sur l'impact des changements climatiques sur le comportement des usagers (action n° 2). En ce qui concerne l'action n° 3, le rapport sur les méthodes de réalisation de diagnostic de vulnérabilité des infrastructures et des réseaux de transport devrait être terminé début 2014. Enfin, les deux études suivantes ont été entreprises en 2013:

- Le projet GEPET-EAU1 (Gestion efficace, prédictive et adaptative de la ressource en eau des voies navigables dans un contexte de changements climatiques), en réponse à l'appel à projets lancé en 2012 par le programme de recherche GICC: ce projet définit des stratégies de gestion prédictive et adaptative concernant les voies navigables et plus particulièrement la ressource en eau au sein de différents bassins versants grâce à des travaux de modélisation. Ces stratégies ont pour but de permettre une navigation normale par exemple en période de faible débit. Cet outil est développé par le centre commun Armines-École des Mines de Douai, en relation avec l'université polytechnique de Catalogne et l'IRSTEA (Institut national de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture) de Lyon. Il est le fruit d'une coopération entre les Voies Navigables de France (VNF), l'Agence de l'Eau Artois-Picardie et la DREAL Nord-Pas-de-Calais (Direction régionale de l'environnement, de l'aménagement et du logement), qui dépend du Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie). Ce projet étudié sur le bief de Cuinchy-Fontinette devrait être transposable à d'autres domaines du réseau géré par les VNF.

- La modélisation de l'évolution du régime des vagues sur les côtes de la Réunion et des Antilles, en relation avec la DGEC (Direction générale de l'énergie et du climat) par le laboratoire de Saint-Venant et EDF, l'école Ponts ParisTech et le Cerema (Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement) devrait fournir des informations sur les paramètres climatiques maritimes à prendre en compte dans les études de vulnérabilité dans les zones portuaires et sur les côtes. Ces recherches passent par l'élaboration de modèles de climatologie des vagues sur chaque ligne côtière de France métropolitaine et d'outre-mer, notamment de l'île de la Réunion. En effet, les incidences des changements climatiques sur la climatologie des mers, y compris dans des conditions extrêmes, ne sont pas connues à La Réunion. La situation des Antilles sera également étudiée.

II.21. Conclusions et recommandations de la Conférence

La Conférence internationale de la CEE sur l'adaptation des réseaux de transport aux changements climatiques a eu lieu les 25 et 26 juin à Alexandroupolis, à l'aimable invitation de la Chambre Évros de commerce et d'industrie et de l'Association hellénique des chambres de transports, sous les auspices de la Direction des infrastructures, des transports et des réseaux du Ministère de l'environnement, de l'énergie et des changements climatiques de la République grecque.

La Conférence a été ouverte, au nom du Ministère grec du développement, des infrastructures, des transports et des réseaux, par M. Nikolaos Malakatas, directeur des études pour la chaussée routière au Secrétariat-général des travaux publics, et par Mme Eva Molnar, Directrice de la Division des transports de la CEE. M. Christodoulos Topsidis, président de la Chambre Évros de commerce et d'industrie, M. Aris Giannakidis, président du Conseil de l'est de la Macédoine et de Thrace, et M. Vaggelis Lambakis, maire d'Alexandroupolis, ont souhaité la bienvenue aux participants. Puis M. Dimitrios Tsamboulas a prononcé un discours de bienvenue au nom du Ministre grec du développement, des infrastructures, des transports et des réseaux, M. Kostis Chatzidakis.

La Conférence a été entièrement prise en charge par le Comité des transports intérieurs de la CEE, représenté par son président, M. Jerzy Kleniewski.

La Conférence a été suivie par 70 participants provenant des secteurs public et privé de Grèce et d'autres pays européens et non européens, et comprenait des délégations des ministères des transports et des travaux publics de France, du Kazakhstan, des Pays-Bas, de Pologne, d'Arabie saoudite, d'Espagne et d'Ukraine. Parmi les participants se trouvaient aussi des représentants du Secrétariat de la Convention-cadre des Nations Unies sur le changement climatique (CCNUCC), de la Commission économique et sociale pour l'Asie et le Pacifique des Nations Unies (CESAP), de la Communauté européenne du rail et des compagnies d'infrastructure (CER) AISBL, de l'autorité portuaire d'Alexandroupolis S.A., du concessionnaire des routes de l'Attique, d'Attikes Diadromes SA, de l'Institut hellénique des ingénieurs des transports, de l'Institut hellénique des transports du Centre de recherche et de technologies Hellas (CERTH-HIT), de la SNCF, de la société de chemins de fer de l'est du Japon (East Japan Railway Company), du Forum des laboratoires européens de recherche routière (FEHRL), d'ICF International, de l'autorité portuaire de l'île Maurice, de l'université technique nationale, de l'université de Stanford, de l'université polytechnique de Hong Kong, de l'université de l'Égée, de la Via Donau-Österreichische Wasserstraßen GmbH, des chambres helléniques de commerce et d'industrie, ainsi que des représentants des collectivités locales et des chefs d'entreprise. Des représentants des médias locaux et nationaux ont eux aussi suivi les sessions et participé à la conférence de presse.

Les changements climatiques représentent sans doute l'une des plus grandes menaces à laquelle la planète est confrontée. Il est désormais clairement établi, sur le plan scientifique, qu'ils font peser de graves risques sur les ressources en eau, la sécurité alimentaire, la biodiversité, les établissements humains et le développement, la santé, les conditions de vie et la paix et la sécurité internationales. Il est également admis que les changements climatiques posent un problème important, pour ne pas dire imminent, au transport de personnes et de marchandises. Par conséquent, ce phénomène appelle à des mesures urgentes, globales et coordonnées à de multiples niveaux.

L'élévation du niveau moyen de la mer, l'augmentation de la fréquence et de l'intensité des ondes et des marées de tempête, les sécheresses, la hausse des températures moyennes et les canicules, les hivers plus humides, les précipitations extrêmes et les crues, mais aussi le dégel du pergélisol menacent gravement les infrastructures et les services de transport des zones côtières et intérieures. Les revêtements routiers et autres, les infrastructures et le fonctionnement des infrastructures ferroviaires et aéroportuaires, la conception des véhicules et les conditions de circulation, la nature et le fonctionnement des infrastructures de navigation fluviale, et les infrastructures des ports maritimes et fluviaux risquent de subir l'impact des changements climatiques à des degrés divers.

Les intervenants et les participants à la conférence représentant la CEE, la CESAP, les États membres, des organisations intergouvernementales et non gouvernementales, mais aussi le secteur des transports, la recherche et l'université, ont débattu des questions relatives aux risques, à l'exposition et aux facteurs de vulnérabilité des réseaux de transport internationaux, ainsi que des mesures d'adaptation correspondantes. Tous sont convenus que compte tenu de l'ampleur du problème, il est impératif de traiter en priorité les incidences des changements climatiques et les exigences d'adaptation correspondantes, ainsi que d'autres initiatives qui visent à atténuer le réchauffement de la planète, pour lesquelles la CEE a bien avancé dans ses travaux.

La définition exacte du terme «adaptation» en particulier a été débattue par les participants, qui se sont accordés à affirmer que ce terme désignait la «capacité d'un système à s'ajuster aux changements climatiques, y compris à la variabilité et aux extrêmes climatiques, afin d'en atténuer les effets néfastes ou de tirer parti des occasions offertes». Par conséquent, les mesures d'adaptation visent à réduire les facteurs de vulnérabilité et à accroître la résilience des réseaux de transport.

Plusieurs experts venant de pays différents ont partagé leurs expériences sur les mesures d'adaptation propres à des sous-secteurs précis qui ont permis de réduire la vulnérabilité des réseaux de transport. Les participants étaient d'avis que ces exemples d'adaptation efficaces des infrastructures pourraient aider à l'élaboration de directives ou de bonnes pratiques.

Les participants:

- Sont convenus qu'il était urgent d'élaborer des mesures adaptées et d'échanger des informations sur les meilleures pratiques;
- Ont fait remarquer que, parmi les programmes d'action nationaux aux fins d'adaptation (PANA), une procédure permettant aux pays les moins avancés (PMA) d'identifier les activités prioritaires qui répondent à leurs besoins les plus urgents et immédiats d'adaptation et qui sont établis sous la houlette de la CCNUCC, aucun ne faisait explicitement référence aux infrastructures de transport;

- Ont affirmé que les marchés publics verts, qui permettent aux établissements publics de se procurer des biens et des services avec une incidence réduite sur l'environnement sur toute la durée de vie de ces derniers, est assurément un pas dans la bonne direction. Ils ont également signalé que plusieurs pays avaient d'ores et déjà décidé d'adopter ce mode de passation de marchés pour au moins 50 % des produits qu'ils achetaient;
- Ont fait remarquer que les contrats de concession d'infrastructures de transport, en particulier pour le transport routier, ne contenaient pas, en général, de clause sur la nécessaire adaptation aux changements climatiques;
- On noté que les responsables de la planification et de la conception d'infrastructures de transport devraient tenir compte, dès le stade de la planification, des projections régionales sur le changement climatique et de leurs effets possibles. En outre, ce paramètre devrait être intégré aux pratiques d'ingénierie et aux politiques et règlements nationaux et internationaux;
- Ont indiqué qu'il était essentiel de tester la criticité des infrastructures de transport afin d'identifier et de mettre en œuvre des mesures d'adaptation optimales;
- Ont avancé qu'étant donné que le niveau moyen de l'eau dans les cours d'eau ne devait pas beaucoup évoluer d'ici à 2050, cela ne devrait pas avoir d'effets importants sur le transport fluvial; toutefois, les variations plus importantes du niveau de l'eau pourrait créer des problèmes nécessitant une planification et une gestion intégrées des voies navigables;
- Ont convenu que l'élaboration de stratégies d'adaptation efficaces nécessitait à la fois une recherche collaborative et la formulation de mesures efficaces. Dans ce contexte, ils se sont félicités de la méthode de recherche adoptée dans le projet ECONNET, qui associe des modèles climatiques et hydrologiques à des modèles sur l'économie du transport afin d'identifier les mesures d'adaptation les plus utiles pour les voies de navigation.
- On pris note des travaux entrepris par l'Union européenne, à savoir: (i) le Livre Blanc de 2009 qui examine les moyens d'accroître la résilience aux changements climatiques au sein de l'UE; (ii) la Stratégie relative à l'adaptation au changement climatique, qui entrera en vigueur en 2013 et servira de feuille de route au projet précédent. Les participants ont également affirmé qu'il faudrait davantage axer l'aménagement du territoire sur une démarche stratégique et à long terme;
- Ont été informés des détails du projet de création d'une liaison ferroviaire entre la Méditerranée et la Mer Noire (Alexandroupolis-Burgas);
- Ont fait observer que les petits États insulaires en développement étaient confrontés à des difficultés importantes induites par les changements climatiques (cyclones tropicaux, ondes de tempêtes et autres phénomènes extrêmes) qui pouvaient entraîner une inondation des ports maritimes et des aéroports, mais aussi provoquer d'autres dégâts affectant gravement le fonctionnement des services de transport. Par ailleurs, le développement de ces pays dépend de certaines activités économiques (comme le tourisme) qui seront considérablement touchées par les changements climatiques; cette situation peut à son tour avoir des conséquences négatives sur les transports internationaux. Ces États ont besoin d'une aide financière et technique des pays développés et des organisations internationales afin de renforcer leurs capacités;

- Ont souligné que les investissements ou les normes de conception de plusieurs grands projets d'infrastructure portuaire encore à l'étude actuellement ou en phase de construction ne tenaient généralement pas compte des aspects liés aux changements climatiques. Selon eux, la résilience nécessiterait de renforcer les capacités, de détecter et de gérer le risque (exercices d'intervention ou d'évacuation d'urgence) et de transférer ces risques (augmentation du risque assuré, secours en cas de catastrophe, etc.);
- Ont observé que si les changements climatiques posent des problèmes importants, ils pourraient aussi offrir des débouchés (ouverture possible de nouveaux ports maritimes, nouvelles destinations touristiques);
- Sont convenus qu'une coordination plus importante était nécessaire entre les différents sous-secteurs du transport et leurs initiatives respectives en vue de développer l'intermobilité;
- Ont fait remarquer qu'en l'état actuel des choses, plusieurs pays ne pouvaient se permettre de prévoir des plans d'adaptation, compte tenu des investissements très lourds nécessaires. Il a toutefois été souligné que des techniques peu coûteuses, reposant sur une compréhension élargie des risques et de leurs coûts éventuels, pourrait être adoptée en vue d'adapter les infrastructures existantes;
- Ont observé qu'il était urgent pour les parties prenantes de financer des plans d'adaptation, mais aussi qu'il était nécessaire d'identifier des solutions innovantes;
- Ont proposé d'implanter les réseaux de transport de préférence dans des zones moins susceptibles d'être touchées par les changements climatiques; en outre, une affectation stratégique des sols et l'intégration d'autres secteurs (comme l'agriculture et le tourisme) devraient être prises en compte dans la phase de planification, dans une démarche globale;
- On été informés d'une étude sur les coûts et l'adaptation des réseaux de transport grecs aux changements climatiques financée par la banque centrale de Grèce, à laquelle ont participé plus de 200 scientifiques de diverses disciplines, dont quatre spécialisés dans les transports;
- Se sont vus présenter rapidement les travaux de recherche de l'Union européenne dans ce domaine. Le projet 7PC WEATHER (Weather Extremes: Assessment of Impacts on Transport Systems and Hazards for European Regions) sur l'évaluation de l'impact des phénomènes météorologiques extrêmes sur les réseaux de transport et les risques pour les différentes régions d'Europe, et son prolongement, le projet 7PC MOWE-IT (Management of weather events for transport systems) sur la gestion des phénomènes climatiques dans les réseaux de transport, visent à évaluer et à quantifier les incidences des changements climatiques sur les réseaux de transport.

Pour l'adaptation des réseaux de transport aux changements climatiques, un problème qui ne peut être résolu que par la mise en commun des efforts et une collaboration à tous les niveaux, les participants se sont mis d'accord sur les recommandations suivantes:

1. Les enseignements tirés de la Conférence doivent être portés à la connaissance des gouvernements des pays participants;
2. Les pratiques en matière d'adaptation dans le secteur des transports doivent également être largement diffusées, en faisant l'objet d'une annonce de mesures au titre du Programme de travail de Nairobi (CCNUCC). Le Programme de travail de Nairobi constitue pour les organisations un cadre propice à l'échange de connaissances et au réseautage;

3. Les gouvernements doivent être conscients des changements climatiques et de leurs effets sur les réseaux de transport; il convient de les sensibiliser à l'adaptation des infrastructures de transport aux changements climatiques et des efforts supplémentaires doivent être entrepris dans cette direction;
4. Pour mettre au point des stratégies d'adaptation efficaces, il convient de s'appuyer tant sur la recherche collaborative que sur des moyens d'action concrets. Des études de vulnérabilité bien ciblées, des études empiriques et une évaluation des risques prévus et des coûts connexes doivent constituer une première étape vers la réduction de l'écart actuel des connaissances et la définition des domaines d'intervention prioritaires;
5. Les politiques doivent être formulées sur la base de données scientifiques, compte tenu des spécificités de chaque région;
6. Des investissements spécifiquement destinés à l'adaptation des réseaux de transport aux changements climatiques doivent devenir disponibles, dans la mesure où l'adaptation des infrastructures représente des coûts de construction plus élevés que la normale et où, en outre, certains États ne sont pas en mesure, financièrement, d'entreprendre de tels projets;
7. Compte tenu de ce qui précède, il convient de continuer à rechercher et à promouvoir des mesures spécifiques permettant d'adapter, à un coût abordable, les infrastructures et les systèmes de transport aux changements climatiques;
8. Les conclusions de la Conférence doivent être diffusées de manière à faciliter l'élaboration d'orientations à l'intention des pays dans chacune des zones géographiques relevant des commissions régionales de l'ONU.

Les participants ont exprimé leur gratitude à la Chambre Évros de commerce et d'industrie, et à l'Association des chambres helléniques de transport pour avoir organisé la conférence d'Alexandroupolis dans d'excellentes conditions. Le Ministère des infrastructures, des transports et des réseaux et le Ministère de l'environnement, de l'énergie et des changements climatiques ont également été remerciés pour l'aide qu'ils ont apporté à l'organisation de cet événement, les intervenants pour avoir partagé leur expérience et proposé des solutions et la CEE pour avoir organisé la conférence.

Le compte-rendu de la conférence ainsi que les différents exposés sont disponibles sur le site de la CEE, à l'adresse http://www.unece.org/trans/main/wp5/wp5_conf_2012_june.html.

Annexe III: Contributions supplémentaires pour le Groupe d'experts chargé d'étudier les effets des changements climatiques et l'adaptation à ces changements dans les réseaux de transport internationaux

III.1. Effets des changements climatiques et adaptation à ces derniers de l'infrastructure de transports routiers et ferroviaires (F. Nemry, H. Demirel, CCR/IPTS)

Avertissement: Les opinions exprimées dans la présente étude correspondent à celles de leurs auteurs et ne sauraient en aucun cas être considérées comme reflétant la position officielle de la Commission européenne.

Introduction

À l'avenir, les transports risquent d'être touchés par un ou plusieurs changements climatiques simultanés — étés plus chauds, précipitations extrêmes, augmentation de l'activité des tempêtes et élévation du niveau des mers. Si l'on n'anticipe pas ces phénomènes au stade de la conception et de l'entretien des futures infrastructures de transport, ils pourraient, dans certaines régions, accélérer la dégradation des infrastructures, accroître le risque de dégâts importants, provoquer une interruption du trafic et des accidents qui pourraient à leur tour se répercuter sur l'activité économique.

Le CCR/IPTS a réalisé une étude sur les incidences prévues des changements climatiques sur les infrastructures routières et ferroviaires en s'appuyant sur trois études de cas²⁷. Elle s'inscrit dans le projet CCR PESETAll qui évalue les incidences prévues des changements climatiques en Europe.

Méthode

L'étude s'est appuyée sur les projections fondées sur les modèles climatiques disponibles (7PC ENSEMBLE²⁸) correspondant à trois scénarios distincts d'émissions (émissions faibles (E1), moyennes (A1B) ou élevés (RCP8.5)) et sur des modèles régionaux. Une analyse technico-économique de résolution géographique élevée a été réalisée pour toute l'Europe en associant différents types d'informations spatiales, y compris des statistiques sur le climat et sur les facteurs de stress climatique, des informations sur le transport (infrastructure, réseau et activité de transport) et des informations physiques (augmentation du niveau de la mer, informations sur les côtes, informations techniques telles que les mécanismes de dégradation et d'endommagement).

²⁷ Nemry F, Demirel H. Transport and Climate Change: a focus on road and rail transport infrastructures. EUR 25553 EN. Luxembourg (Luxembourg): Office des publications de l'Union européenne; 2012. JRC72217

²⁸ <http://www.ensembles-eu.org/>.

Principaux résultats

Ce projet de recherche a permis de dégager des tendances concernant une **modification de l'exposition** des infrastructures routières et ferroviaires aux risques induits par les changements climatiques, sur deux périodes (2040-2070 et 2070-2100), mais aussi sur les **coûts de dégradation et d'endommagement des infrastructures**. Les coûts liés à certaines **situations d'adaptation** ont également été évalués. Le calcul a été réalisé avec une résolution géographique élevée et à un niveau d'agrégation plus important.

Incidences futures sur les infrastructures routières

Bien que l'intégrité et les conditions d'entretien des infrastructures de transport, y compris leur résilience aux conditions météorologiques actuelles, sont des objectifs essentiels des normes de construction et d'entretien, il n'est pas possible, d'un point de vue économique, d'éviter toute **dégradation et défaillance** des infrastructures dues aux changements climatiques. Pour l'infrastructure routière, le stress météorologique représente de 30 % à 50 % des coûts actuels d'entretien des routes en Europe (8 à 13 milliards d'euros/environ). Environ 10 % de ces coûts (0,9 milliard d'euros/an environ) sont liés à des phénomènes météorologiques extrêmes, principalement des pluies diluviennes et des inondations.

Selon les conclusions de l'étude CCR/IPTS, au niveau de l'Europe des 27, la dégradation normale de l'infrastructure routière induite par des précipitations moyennes, n'augmentera que légèrement à l'avenir. En revanche, les précipitations extrêmes plus fréquentes (ainsi que des inondations pluviales et les crues) telles qu'elles sont prévues dans différentes régions d'Europe, pourraient représenter un coût supplémentaire pour les infrastructures routières (de 50 à 192 millions d'euros/an pour le scénario A1B sur la période 2040-2100). Des hivers plus doux devraient en revanche réduire les coûts (économies comprises entre 170 et 508 millions d'euros/an pour le scénario A1B). En revanche, l'élévation de la température moyenne pourrait nécessiter des changements au niveau des opérations et des pratiques d'entretien et se traduire par un coût supplémentaire pour le transport routier.

Cette étude donne une image fortement agrégée de l'évolution possible des transports routiers en Europe. Des conséquences plus graves, aux échelons local ou régional, ne sont pas exclues, ce qui se traduira par des dépenses plus importantes de réparation et d'entretien des infrastructures et par des conséquences indirectes (accidents mortels lors d'épisodes météorologiques extrêmes) dues par exemple à un effondrement des infrastructures. Ainsi, les précipitations extrêmes semblent réparties de façon très inégale dans l'espace.

Vulnérabilité et adaptation

L'étude a étudié quatre cas d'exposition et d'adaptation aux changements climatiques en tenant compte de différents aspects de ces changements, de différentes infrastructures et de différentes durées de vie.

L'adaptation des *liants bitumeux* pour réduire la fissuration thermique du revêtement est la mesure la moins coûteuse et, compte tenu de la durée de vie relativement courte de cette infrastructure (environ sept ans), sa mise en œuvre ne devrait pas poser de difficulté majeure.

La protection des *ponts* contre l'affouillement risque d'être nécessaire au cours des dix prochaines années pour environ 20 % d'entre eux en raison de l'intensité croissante des débits de pointe des cours d'eau. Compte tenu de la longue durée de vie théorique d'un

ouvrage de ce type (plus de cent ans) et d'un cycle d'entretien long, les risques futurs dus aux changements climatiques devraient être pris en compte dans les études réalisées en amont sur les coûts et les avantages.

En ce qui concerne le risque de *déformation des rails* due à la chaleur et le risque de déraillement, la mesure la plus courante consiste à instaurer des limites de vitesse. Aujourd'hui, les retards dus à ces limitations de vitesse sont peut-être coûteux pour les transports. Les jours de chaleur estivale devenant plus fréquents et la chaleur plus intense, cela pourrait entraîner des retards plus fréquents (multipliés par deux ou par quatre dans le scénario A1B et RCP8.5 respectivement). Une modification de l'ancrage de la voie pourrait contribuer à diminuer ces retards, mais il faudrait étudier la situation en détail pour être sûr de l'efficacité d'une telle solution et en estimer les coûts.

En ce qui concerne la comparaison entre coût des mesures d'adaptation et coûts d'entretien, les coûts d'adaptation estimés pour le scénario A1B (de 314 à 560 millions d'euros/an) représentent un pourcentage réduit des coûts actuels d'entretien des routes (de 1,2 % à 2,2 %). Toutefois, les réparations que permettraient d'éviter les mesures d'adaptation seraient bien plus élevées. Ainsi, le coût de réparation d'un pont endommagé pourrait être compris entre deux et dix fois la valeur du pont lui-même.

Cette étude a également donné une première estimation du **risque lié à une élévation du niveau des mers** et *d'ondes de tempête* sur les infrastructures de transports. Ce risque a été calculé à partir des infrastructures construites dans des zones en dessous d'un niveau correspondant à la somme de l'élévation moyenne du niveau de la mer (un mètre) et la hauteur de la tempête décennale. Pour les routes, par exemple, les infrastructures exposées à un risque d'inondation permanent ou épisodique représentent 4,1 % de l'infrastructure côtière. La valeur de cette infrastructure est estimée à 18,5 milliards d'euros environ.

III.2. Adaptation aux changements climatiques: impact et exigences pour le secteur ferroviaire (Libor Lochman, Directeur général de la CER)

Contexte politique de l'Union européenne

Ces dernières années, la Commission européenne a pris des mesures concrètes pour placer l'adaptation aux changements climatiques parmi ses priorités. En 2009, la Commission a publié le Livre Blanc «Adaptation aux changements climatiques: vers un cadre d'action européen», qui définit la stratégie à adopter par l'Union européenne et par ses États membres en vue de se préparer aux incidences des changements climatiques. Malheureusement, ce rapport n'a pas accordé une attention suffisante aux transports alors qu'un secteur des transports résilient est d'une importance vitale dans notre vie de tous les jours. En 2010, le Parlement européen s'est emparé de la question et a adopté une résolution importante (2009/2152(INI), qui mettait le doigt sur l'attention insuffisante apportée à la question dans le Livre blanc et qui, conformément aux propositions de la CER, a appelé la Commission à mettre cette question au cœur de la stratégie européenne d'adaptation aux changements climatiques, alors en cours de préparation.

Depuis, la Commission européenne s'est lancée dans l'élaboration d'une Stratégie relative à l'adaptation aux changements climatiques dont la publication est prévue pour mars 2013. La CER a contribué aux travaux de la Commission en fournissant des informations

sur les activités du secteur ferroviaire, sur l'impact des changements climatiques sur le fonctionnement des entreprises ferroviaires et sur les attentes du secteur vis-à-vis des institutions européennes. La CER a ensuite rejoint le groupe de pilotage de l'UE sur l'adaptation aux changements climatiques, qui conseille et soutient la Commission dans ses travaux sur la stratégie. Nous prévoyons que la Commission axera ses travaux sur trois grands domaines liés à la résilience aux changements climatiques, à savoir l'évaluation des coûts, des avantages et de l'incidence de l'adaptation, l'amélioration des connaissances, la promotion de l'application de normes et de directives communes, et le regroupement et le partage des meilleures pratiques.

Le secteur du rail a déjà mené une quantité considérable de travaux dans tous ces domaines et la Commission européenne est désormais consciente de l'importante contribution que ce secteur peut apporter avant et pendant la mise en œuvre de la stratégie. La CER a également mis en place un groupe de travail qui se consacre à l'adaptation aux changements climatiques et qui permet aux entreprises ferroviaires d'échanger leurs meilleures pratiques et de débattre de la façon d'intégrer les exigences liées aux changements climatiques à leurs orientations, leurs référentiels et leurs possibilités de financement

Parallèlement aux mesures d'adaptation, il est important de souligner que l'UE a établi une ambitieuse feuille de route pour le secteur des transports dans son Livre Blanc de 2011 intitulé «Un espace européen unique des transports». Au cœur de cette stratégie, le rail devrait devenir la colonne vertébrale du réseau de transports de l'UE, avec une augmentation importante de ses parts de marché aussi bien pour le transport de passagers que de fret sur les distances moyennes (plus de 300 kilomètres) d'ici à 2050.

Il est essentiel que ce soutien politique général au rail se reflète dans la stratégie à venir d'adaptation aux changements climatiques de l'UE et dans la mise en œuvre du Livre blanc de 2011 sur les transports. Parallèlement, le secteur ferroviaire est attaché à l'idée de continuer à rendre les réseaux ferrés plus aptes à résister aux changements climatiques et, dans le même temps, d'être en mesure d'absorber un trafic en hausse en raison du transport modal.

L'adaptation aux changements climatiques est une réalité pour le secteur ferroviaire. Des températures élevées, des vagues de chaleur de durées variables, mais aussi d'importantes chutes de pluie sont autant de phénomènes auxquels le secteur du rail, mais aussi la société et l'économie se retrouveront de plus en plus confrontés. Cela se traduira aussi par exemple, par un risque d'interruptions plus fréquentes du trafic, une consommation supplémentaire d'énergie pour les systèmes de climatisation en été, des vents violents risquant de faire dérailler les trains ou de provoquer des décrochages des caténaires. Alors que ces effets sont déjà présents, un impact plus important, prévu par les compagnies ferroviaires, se produira dans les 20 à 30 années à venir.

L'adaptation aux changements climatiques est une question très importante pour le rail et nombreuses sont les entreprises du secteur qui ont créé des groupes de travail ou élaboré des stratégies dans ce domaine, mais aussi des activités de R-D. Le projet de deux ans ARISCC (Adaptation to Railway Infrastructure and Climatic Change) de l'UIC constitue un bon exemple à cet égard, dans la mesure où il contient un ensemble de bonnes pratiques de gestion intégrée des risques naturels. Par conséquent, la CER se félicite de l'avancement du plan de l'UE sur les orientations relatives à l'adaptation aux changements climatiques; aux côtés de ses membres et des responsables de l'UE, la CER s'est engagée à s'assurer que toutes les ressources disponibles et les mesures européennes, mais aussi nationales, veillent à favoriser un secteur des transports économiquement sain et durable, doté d'un réseau ferroviaire solide, formant le pilier du système européen de transport dans le contexte des changements climatiques.

La CER estime que les orientations en faveur de l'adaptation du secteur ferroviaire devraient être prioritaires dans la future stratégie de l'UE, aux côtés des mesures d'atténuation. Des efforts supplémentaires devraient donc être consacrés à la sensibilisation des gouvernements et des collectivités locales à cette question. En même temps, l'UE devrait soutenir les efforts de recherche du secteur ferroviaire qui cherchent à combler les lacunes dans ce domaine.

À cet égard, il est important de souligner que des mesures d'atténuation et d'adaptation sont nécessaires. Cela est d'autant plus vrai lorsque l'on sait que les transports ne contribuent qu'à hauteur de 27 % des émissions de gaz à effet de serre de l'UE. La stratégie européenne d'adaptation est une occasion de souligner une fois de plus que des mesures d'atténuation ciblées sur l'ensemble du secteur des transports sont nécessaires. Pour le moment, le transport est le seul secteur, dans l'UE, où les émissions de CO₂ augmentent et dépassent les réductions d'émissions obtenues dans d'autres secteurs de l'économie. Le secteur ferroviaire est le seul qui contribue à la diminution des émissions, bien qu'il soit pourtant déjà un mode de transport qui émet peu de carbone. En outre, ce secteur s'est engagé de façon unilatérale à continuer à réduire les émissions de CO₂ de 30 % et 50 % par rapport à 1990, d'ici à 2020 et à 2030, respectivement, mais aussi à réduire ces émissions à néant à l'horizon 2050.

La normalisation est un autre domaine où la collaboration est vitale entre les institutions européennes et le secteur du rail. Le réseau ferré européen se caractérise par un système de normalisation et de réglementation complexe, vaste et hérité du passé.

Afin d'adapter le réseau ferré européen aux changements climatiques, les référentiels existants doivent être adaptés ou élargis. En avril 2012, la CER a organisé un atelier sur le thème de la réalité et des perspectives de l'adaptation aux changements climatiques pour le secteur ferroviaire. Cet atelier a surtout été l'occasion pour la CER de définir des objectifs communs pour ce secteur et d'aider la Commission en vue de la publication de la stratégie, en 2013.

Les professionnels du secteur ferroviaire estiment qu'il faut recenser l'ensemble des normes et des réglementations existantes afin d'identifier les lacunes du réseau tel qu'il existe actuellement, y compris le matériel roulant et les infrastructures, en vue d'atteindre l'objectif de résilience. Les questions restées en suspens seront résolues par des activités de recherche et de développement bien ciblées, comme par exemple le programme de recherche Horizon 2020. Si l'on tient compte de la longue durée de vie des éléments d'un réseau ferroviaire — de 20 à 30 ans pour les rames, 30 ans pour le ballast et 75 ans pour les ponts — la normalisation doit être largement acceptée et s'appliquer dès que possible afin de permettre le remplacement périodique des structures en fatigue par des éléments neufs, améliorés et résilients aux changements climatiques. Les principales structures à examiner sont les suivantes: ballast, caténaires, talus, voies sans traverse, systèmes d'évacuation et conduites d'eau, et ponts.

Conclusion

Les incidences des changements climatiques deviennent une réalité et commencent à se répercuter sur notre économie, notre environnement et notre mobilité. Des mesures d'atténuation sont donc de plus en plus nécessaires. Par ailleurs, nous serons confrontés à des phénomènes météorologiques extrêmes de plus en plus intenses et fréquents, qui se produisent d'ailleurs déjà aujourd'hui. Par conséquent, il est indispensable de coupler des mesures de réduction des gaz à effet de serre à des mesures d'adaptation et de protection contre les phénomènes météorologiques extrêmes.

Le secteur du rail est prêt à jouer un rôle important dans ce domaine en soutenant les institutions européennes et en aidant les principaux acteurs à élaborer des mesures et à fixer des priorités adaptées en vue d'accroître la résilience du rail aux changements climatiques. La CER continuera de favoriser l'échange de bonnes pratiques entre ses membres et d'aider les responsables à trouver les meilleures solutions d'intégration de l'adaptation aux politiques, normes et possibilités de financement de l'UE.

La CER prévoit d'organiser, en concertation avec la Commission européenne, un deuxième atelier d'adaptation du rail aux changements climatiques en avril 2013. Cet événement sera une occasion importante de faire le point sur les activités menées par le secteur du rail sur l'année écoulée et de débattre de la stratégie de l'UE sur l'adaptation aux changements climatiques, qui devrait être publiée en mars 2013.

III.3. Étude de cas SNCF

(Alexandre Kaddouri, chef de projet climat-énergie, Direction du développement durable)

En mars 2012, plus de 40 % de la population française estimait que le changement climatique représentait le risque le plus préoccupant pour l'environnement. Dans cette étude, sept personnes sur dix ont dit avoir conscience que les effets des changements climatiques constituaient une menace pour leurs activités (enquête IFOP pour WWF France).

Pour la SNCF, la question est à l'ordre du jour depuis 2009 et les lois de Grenelle sur l'environnement. La SNCF a décidé de contribuer au plan national d'adaptation aux changements climatiques pour trois grandes raisons:

- Chaque année, la SNCF investit dans les réseaux ferroviaires (matériel roulant dont la durée de vie est d'environ 40 ans, plus longue pour les gares),
- La SNCF veut réduire les risques d'exploitation et accroître la résilience du réseau ferroviaire,
- Le changement climatique pourrait induire de nouveaux comportements, mais aussi de nouvelles mobilités.

Selon la méthode de Perthuis et al. (*Economic Aspects in Adaptation for Climate Change*, 2010), la SNCF s'efforce d'identifier toutes les incidences climatiques intéressant ses activités, de répertorier les facteurs de vulnérabilité et d'établir des calendriers d'adaptation. Forte de ces informations, la SNCF pourra proposer des solutions d'adaptation pour chaque type d'incidence, en prenant en considération celles qui s'inscrivent dans une logique globale: des actions à court terme aux effets à longue échéance (comme la normalisation), des réponses souples pour améliorer la robustesse du réseau ferroviaire compte tenu des scénarios climatiques possibles (solutions de mobilité virtuelle ou alternative, gestion de crise dans un contexte d'évolution du climat, etc.), des actions à long terme (adaptation de la gouvernance aux aléas climatiques) et des réponses utiles en tout état de cause («no-regrets»). Chaque branche du Groupe SNCF doit définir son propre projet et se coordonner avec la gouvernance globale.

Le réchauffement prévu des températures, l'allongement des canicules en été, des hivers plus doux et des phénomènes extrêmes plus fréquents auront inévitablement des incidences sur les activités de la SNCF, les déplacements, les conditions de travail, les opérations d'entretien et la réglementation.

Le plan d'adaptation de la SNCF aux changements climatiques s'applique également à la réduction des émissions de gaz à effet de serre. Ce plan implique de cartographier avec précision les risques et leurs incidences locales pour les mesures d'adaptation, tout en s'attaquant à des aspects plus globaux concernant l'atténuation. Si les scénarios sur le climat futur et ses incidences sur les infrastructures ou le matériel roulant permettent de mieux connaître ce qui se passera à l'avenir, il relève de la responsabilité des personnes chargées de la planification, de la conception, de la construction et de l'exploitation des réseaux ferroviaires de connaître les effets des changements climatiques. De nouvelles techniques doivent être apprises et mises en œuvre de façon à gérer les problèmes lorsque les incertitudes sont importantes. Dans ce cas, le coût marginal d'adaptation sera plus facile à intégrer.

Les décisions relatives à l'adaptation peuvent se ranger en deux catégories: (a) les actions liées au calendrier des changements climatiques et à la construction d'infrastructures, de gares et de matériel roulant neufs; (b) les actions visant à renforcer la résistance aux changements climatiques à l'aide de mesures de rénovation et de protection contre les risques climatiques existants.

Le plan de la SNCF a défini des cahiers des charges pour remédier aux incidences des changements climatiques et des mesures d'adaptation sont en cours de déploiement à divers échelons de gouvernance.

Tableau III.1. Le plan d'adaptation de la SNCF en bref

| | |
|------------------|--|
| CONNAÎTRE | <ul style="list-style-type: none"> Recensement des risques et des opportunités |
| OUTILLER | <ul style="list-style-type: none"> Investissements de protection contre les risques climatiques et examen des normes de conception, d'inspection et d'entretien Actualisation des plans de prévention et de gestion de crise Développement d'autres solutions de mobilité |
| MOBILISER | <ul style="list-style-type: none"> Définition d'une vision et d'une gouvernance partagées du risque climatique avec les parties prenantes de l'écosystème ferroviaire et sensibilisation des collectivités territoriales Élaboration d'une communication sur le climat auprès de la clientèle Exercices de crises climatiques |

Enfin, l'évolution des conditions climatiques moyennes pourrait aboutir à des modifications au niveau de la demande de transports, des besoins en infrastructures et des conditions de voyage en raison de changements dans les destinations touristiques, de la répartition de la population et de la production agricole.

III.4. Mesures d'atténuation des changements climatiques sur le fonctionnement du rail (John Dora CEng FICE FRMetS, John Dora Consulting Ltd)

Contexte

Le rail est un moyen de transport sûr et résilient, et ses procédures de sécurité ont considérablement évolué au cours de ses 180 années d'histoire. Elles portent essentiellement sur la régulation du trafic et ont permis de faire circuler de façon plus fréquente des rames plus rapides et plus lourdes. Les effets de conditions climatiques extrêmes ou inhabituelles sur la sécurité sont minimes. Dans ce cas, le trafic est limité, voire arrêté en cas de conditions météorologiques présentant un risque pour la sécurité. Toutefois, les restrictions induites par des besoins de sécurité rendent le service moins fiable.

Le changement climatique va entraîner des modifications des régimes météorologiques et ce qui correspond à un niveau de sécurité et à un degré de fiabilité acceptables aujourd'hui risque de ne plus l'être, à résilience égale du réseau ferré.

Les changements climatiques ne sont pas le seul changement

Le rail est un mode de transport de plus en plus utilisé et durable, pour lequel on constate une augmentation du trafic. Au fil du temps, dans les 10 à 50 prochaines années à peu près, si les décisions concernant les infrastructures et le fonctionnement, les normes techniques et les seuils d'intervention restent les mêmes, l'augmentation du trafic et le changement de régime climatique risquent de remettre en cause la fiabilité de ce mode de transport. En effet, on ne peut continuer de concevoir, de construire, d'exploiter et d'entretenir des réseaux en s'appuyant sur les régimes climatiques du passé²⁹.

Amélioration de la résilience et de la fiabilité

Les projets ARISCC de l'UIC³⁰ et TRaCCA du RSSB³¹ montrent que l'on peut mieux connaître la vulnérabilité des voies ferrées aux conditions météorologiques grâce à un modèle proposé dans ARISCC qui aborde les risques naturels de façon systémique (voir figure 1). Le projet TRaCCA s'attache à démontrer qu'il convient de développer des systèmes de mesure et que, lorsque les risques systémiques sont étudiés en tenant compte de la résilience, cela permet de trouver des solutions plus avantageuses et à moindre coût. Alors qu'aucun de ces projets n'examine de solution technique dans le détail, le modèle ARISCC propose une base permettant de résoudre les problèmes de résilience.

En examinant systématiquement les informations sur les phénomènes climatiques passés et actuels, en établissant et en mettant en relation les seuils critiques et la résilience des systèmes, et en cartographiant les résultats obtenus, on peut recenser les facteurs de vulnérabilité, puis évaluer les risques et les priorités. Les lieux plus vulnérables peuvent ensuite être considérés prioritaires pour l'investissement.

²⁹ Institution of Civil Engineers, Dec 2012. Adaptation for climate change risks, Londres. <http://www.ice.org.uk/topics/transport/Case-Studies/Climate-Change-mitigation-and-adaptation-challenge>

³⁰ Nolte R et al, 2011, ARISCC Adaptation of Railway Infrastructure to Climate Change Final Report, Paris. <http://www.ariscc.org>

³¹ Dora, JM, 2011. T925 TRaCCA Tomorrow's Railway and Climate change Adaptation Final Report, Rail Safety and Standards Board, London. http://www.rssb.co.uk/SiteCollectionDocuments/pdf/reports/Research/T925_rpt_phase3.pdf

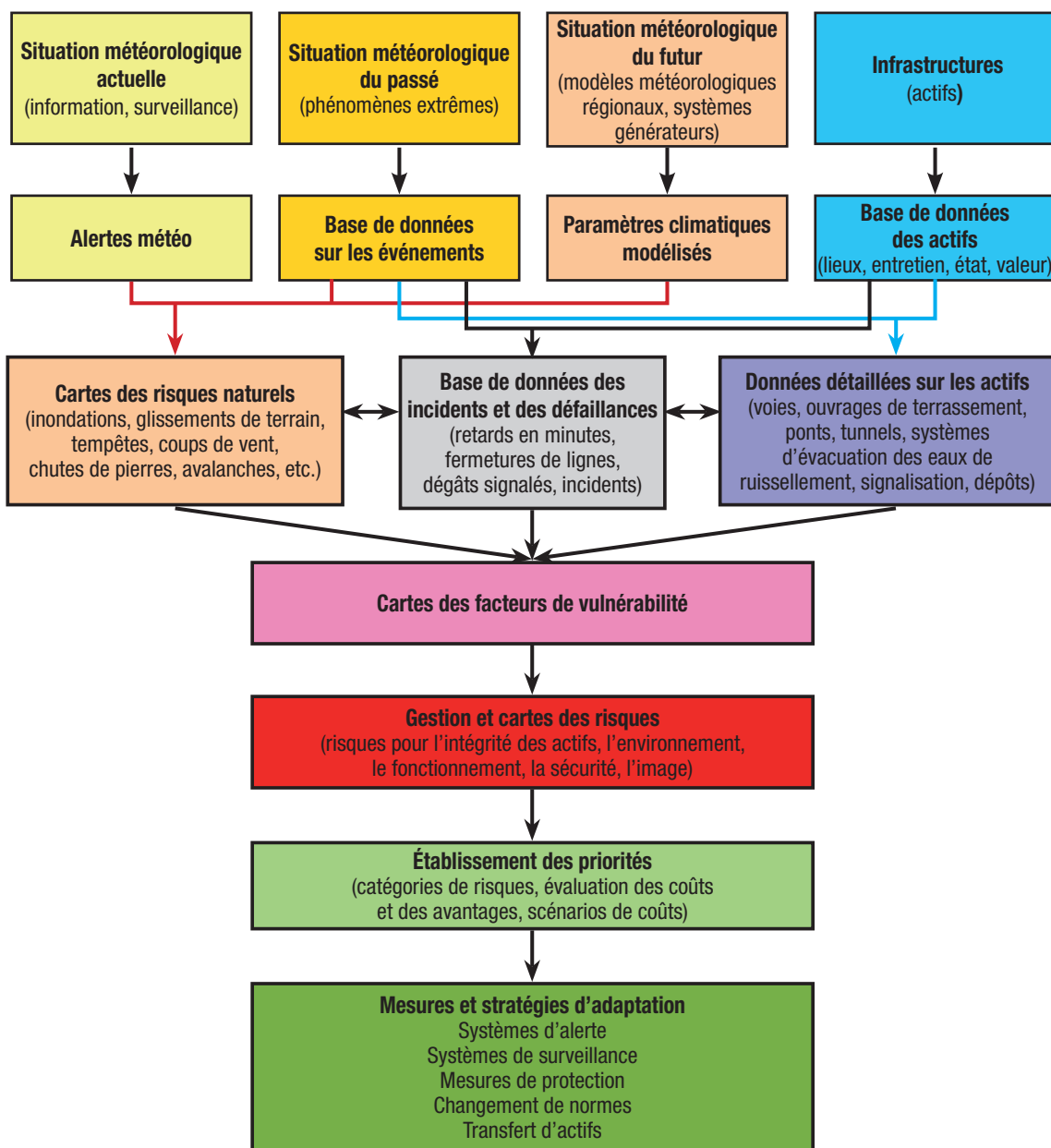


Figure III.1. Éléments, processus et flux d'information pour une gestion intégrée des risques naturels

Effets des changements climatiques et adaptation à ces changements dans les réseaux de transport internationaux

Le tableau III.2 donne des exemples d'aléas climatiques importants expérimentés sur le réseau ferré britannique, mais propose aussi des solutions qui font appel à l'ingénierie lourde ou à des techniques de gestion «douces». Les solutions présentées sont mises en œuvre ou à l'étude.

Tableau III.2. Exemples de risques importants rencontrés sur le réseau ferré britannique, et solutions envisageables

| Nature du risque | Système touché | Problème | Solution possible |
|---|--|--|--|
| Élévation du niveau de la mer et tempêtes plus fréquentes et intenses | Voies ferrées des zones littorales | Endommagement des brise-mer: risque d'inondations et de déraillement | <ul style="list-style-type: none"> – Reconstruction des brise-mer selon des normes adaptées – Mise en place d'un système de prévision sur l'état de la mer |
| Élévation du niveau de la mer et tempêtes plus fréquentes et intenses | Voies ferrées des zones littorales | Déferlement de vagues atteignant ou endommageant les rames | <ul style="list-style-type: none"> – Reconstruction des brise-mer selon des normes adaptées – Mise en place d'un système de prévision sur l'état de la mer |
| Précipitations intenses | Glissements de terrain | Risque d'obstruction et de déraillement | <ul style="list-style-type: none"> – Cartographie des sites où l'eau est concentrée – Connaissance de l'état des ouvrages de terrassement – Connaissance de l'emplacement des systèmes d'évacuation des eaux de pluie, de leur état et de leur importance – Amélioration des ouvrages de terrassement et des systèmes d'évacuation des eaux de ruissellement grâce à de nouveaux investissements – Gestion ciblée des systèmes d'évacuation des eaux de ruissellement |
| Précipitations intenses | Affouillement des ponts | Les fondations, fragilisées, provoquent un effondrement de l'ouvrage d'art et créent des risques de déraillement | <ul style="list-style-type: none"> – Connaissance de la probabilité de survenue de l'affouillement – Installation de systèmes de protection contre les affouillements – Instauration de systèmes de surveillance des risques d'inondation en relation avec les agences de prévision des inondations – Surveillance du niveau des cours d'eau |
| Précipitations intenses | Systèmes de signalisation et d'alimentation électrique hors voie | Inondation de la voie, panne du matériel essentiel hors voie | <ul style="list-style-type: none"> – Cartographie des sites où l'eau est concentrée – Amélioration des ouvrages de terrassement et des systèmes d'évacuation des eaux de ruissellement grâce à de nouveaux investissements – Gestion ciblée des systèmes d'évacuation des eaux de ruissellement |
| Chaleur extrême | Voies | Flambage, d'où risques de déraillement | <ul style="list-style-type: none"> – Tenue d'un registre de l'état des voies sur différents sites – Limites de vitesse sur les sites à risque – Limitation des activités qui risquent de perturber l'état du ballast par temps chaud – Peinture des rails en blanc sur les sites concernés |

| Nature du risque | Système touché | Problème | Solution possible |
|---------------------------------------|--|--|---|
| Chaleur extrême | Systèmes de signalisation et d'alimentation électrique hors voie | Fiabilité des logiciels et des différents éléments | <ul style="list-style-type: none"> – Refroidissement actif ou passif des armoires d'équipement – Installation des armoires à l'ombre – Remplacement de l'équipement |
| Chaleur extrême | Personnel | Stress thermique | <ul style="list-style-type: none"> – Prise en compte de la durée d'exposition à la chaleur et de ses conséquences sur les personnes et ajustement des tableaux de service en conséquence – Formation du personnel et prise en compte des différences entre travail en intérieur et en extérieur – Prise en compte des conséquences sur la structure du sommeil et le risque d'épuisement |
| Chaleur extrême | Équipement des rames | Fiabilité des logiciels et des différents éléments | <ul style="list-style-type: none"> – Peinture des rames d'une couleur claire – Refroidissement actif ou passif – Équipement sur les toits à éviter |
| Augmentation rapide de la température | Systèmes de signalisation et d'alimentation électrique hors voie | Fiabilité des logiciels et des différents éléments | <ul style="list-style-type: none"> – Conception de modèles à forte inertie thermique – Installation des armoires à l'ombre – Remplacement de l'équipement |
| Chaleur extrême | Lignes de caténaires | Affaissement du câble de contact | <ul style="list-style-type: none"> – Renforcement des mâts et des câbles |
| Vent violent | Lignes de caténaires | Déplacement latéral du câble de contact | <ul style="list-style-type: none"> – Renforcement des mâts et des câbles |

Calendrier de l'investissement en vue de l'adaptation

Si les solutions présentées dans le tableau 1 nécessitent de nouveaux investissements, il est important de réaliser ces derniers en temps voulu. Si l'investissement a été programmé pour financer une nouvelle construction ou l'aménagement d'un équipement existant, les coûts liés à l'adaptation risquent de se cumuler aux autres ou d'être inexistantes. L'adaptation au stade de l'aménagement de l'équipement est donc une solution raisonnable qui présente des avantages, notamment en cas de courte durée de vie de ce dernier. C'est ce concept dont il a été tenu compte par exemple dans les spécifications techniques de Network Rail sur la rénovation des systèmes d'évacuation des eaux de ruissellement³², des critères d'adaptation ayant été définis pour tout grand projet de construction, de remplacement ou de rénovation d'un grand système d'évacuation des eaux de ruissellement.

Conclusions

Le rail est un mode de transport sûr et résilient. Compte tenu de l'augmentation du trafic et des changements climatiques à venir, il faudra modifier les politiques actuelles, les normes techniques et les seuils d'intervention si l'on veut éviter des problèmes graves de fiabilité.

³² Dora JM, 2010. Railway Drainage Systems Manual, norme interne Network Rail, Londres.

Il convient de mieux comprendre les effets des phénomènes climatiques actuels et passés sur les voies ferrées, mais il faut aussi disposer d'informations sur les facteurs de vulnérabilité, les seuils, les lieux et les risques.

Des études ont montré qu'à mesure de l'évolution des connaissances, nombre de solutions techniques permettent aux ingénieurs du rail d'améliorer la résilience des systèmes et il existe un certain nombre d'exemples d'outils qui font appel à l'ingénierie lourde ou à des techniques de gestion «douces».

L'investissement dans des solutions d'adaptation, sous réserve que ces dernières soient synchronisées avec des travaux de construction ou de rénovation de routine, peut avoir un impact réduit sur les budgets.

III.5. Incidence des changements climatiques sur le transport fluvia

(Bas Turpijn, Rijkswaterstaat, Direction générale des travaux publics et de la gestion de l'eau, Ministère néerlandais des infrastructures et de l'environnement)

En été 2003, le Rhin a atteint un niveau record de basses eaux. Pendant plusieurs semaines, le débit près de Lobith est passé sous la barre de 1 020 m³/s, qui correspond au débit d'étiage minimum permettant la navigation. De nombreux services ont alors été confrontés à des restrictions, la capacité de charge des bateaux a diminué et les coûts de transport ont augmenté. Cette situation devrait se produire plus souvent à l'avenir dans le cadre des changements climatiques, ce qui pourrait avoir des conséquences importantes sur l'exploitation des voies navigables, mais aussi sur la compétitivité du transport fluvia. Le Rijkswaterstaat a entrepris plusieurs études sur la question et a participé aux réunions de la CEE sur les incidences des changements climatiques sur les réseaux de transport internationaux. La présente partie donne un bref aperçu de ces travaux.

En 2006, l'Institut météorologique royal des Pays-Bas (KNMI) a élaboré des scénarios climatiques. Plusieurs caractéristiques propres aux Pays-Bas et aux régions voisines ont été prises en compte dans tous ces scénarios: une élévation des températures, des hivers doux et des été chauds deviendront plus courants; les hivers seront généralement aussi plus humides et l'intensité des précipitations va augmenter. Le KNMI a élaboré un scénario correspondant à une élévation modérée (G) et importante (W) de la température. En outre, étant donné que l'on prévoit aussi des changements dans le schéma de circulation du vent, le KNMI a développé des scénarios associant modifications de la direction du vent et augmentation modérée (Gp) ou élevée (Wp) de la température. Ces scénarios sont tous plausibles ou probables.

Incidences sur l'hydrologie des cours d'eau

Les changements de température et des schémas de la circulation atmosphérique se répercuteront sur l'hydrologie des cours d'eau. La figure III.2 montre les effets de différents scénarios sur le débit du Rhin jusque vers 2050. La baisse prévue du débit risque de correspondre à un niveau plus bas des eaux. Les projections qui s'appuient sur le modèle hydrologique SOBEK font état d'une très forte baisse de la hauteur des principaux cours d'eau des Pays-Bas. Dans les scénarios G, W et Gp, les incidences semblent faibles sur la hauteur de l'eau, tandis qu'elles semblent plus importantes dans le scénario Wp. Ce dernier part en effet de l'hypothèse d'une reproduction, chaque année, des conditions hydrologiques de l'été 2003. En été, le niveau de l'eau pourrait baisser jusqu'à atteindre l'étiage auquel la navigation est déconseillée.

Effets sur le transport fluvial

Le Rhin est un axe important de transport fluvial au Pays-Bas, plus de 100 millions de tonnes de fret y transitent chaque année. Si les étiages record constatés en 2003 se reproduisent fréquemment, cela aura des incidences sur la navigation: la capacité de chargement diminuera et les bateaux de grande taille ne pourront plus naviguer. Les coûts de transport devraient alors augmenter et, par conséquent, la navigation intérieure verra sa compétitivité compromise; une telle situation peut aussi se répercuter sur la compétitivité des ports maritimes des Pays-Bas, en particulier de Rotterdam. Il convient de noter que les parts de marché de la navigation fluviale sont relativement importantes (environ 20 %) dans la répartition modale pour la desserte de l'arrière-pays; une hausse des coûts du transport fluvial pourrait bénéficier aux ports maritimes et nuire à la navigation fluviale.

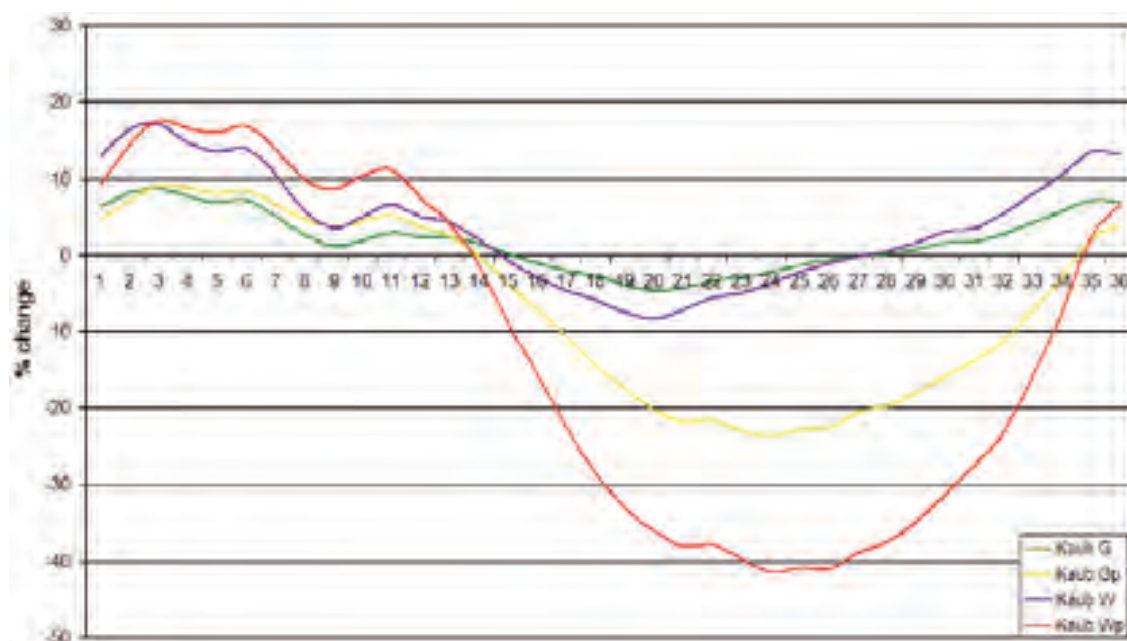


Fig. III. 2. Évolution du débit du Rhin jusqu'en 2050 environ (source: Deltares, 2007). Légendes: **G** = élévation modérée de la température; **Gp** = élévation modérée de la température et modification de la circulation du vent; **W** = élévation plus importante de la température; **Wp** = élévation plus importante de la température et modification de la circulation du vent.

Dans le cadre du projet de recherche « Connaissances pour le climat », on a étudié les effets du scénario Wp sur les coûts de transport et le transfert modal pour l'année 2050. Les résultats de l'enquête, qui reposent sur une analyse bibliographique, des entretiens avec les acteurs concernés et des travaux de modélisation, montrent que les coûts de transport pourraient augmenter de 9 % durant les périodes d'étiage, certaines expéditions étant retardées. Cela pourrait entraîner un transfert modal compris entre 5 % et 8 % dans les années qui suivront 2050, pour le scénario Wp. Dans tous les autres scénarios, les incidences sur la navigation intérieure sont considérées faibles.

Au Pays-Bas, des études sur les incidences à long terme (c'est-à-dire à l'horizon 2050-2100) des changements climatiques ont également été entreprises dans le cadre du «Deltaprogram». Ces études constituent le fondement du nouveau plan national de gestion de l'eau (orientations et mesures) destiné à préparer les Pays-Bas aux changements climatiques sur le long terme.

En-dehors du débit, le niveau de l'eau est également fonction de l'élévation du lit. En effet, ce dernier n'est pas uniforme sur l'ensemble du cours d'eau, en raison de processus géologiques (subsidence) et morphologiques, mais aussi à cause des aménagements hydrauliques (voir par exemple figure III.3). Avec le temps, le lit des cours d'eau se dégrade lui aussi, un phénomène appelé à se poursuivre à l'avenir et qui devrait avoir des effets importants sur la hauteur de l'eau. Les spécialistes du Rijkswaterstaat signalent que cette dernière pourrait avoir diminué de 0,6 m vers 2030. Ce chiffre correspond aux projections sur les périodes d'été après 2050 (scénario Wp). Par conséquent, cette dégradation aura un impact plus important que les changements climatiques.

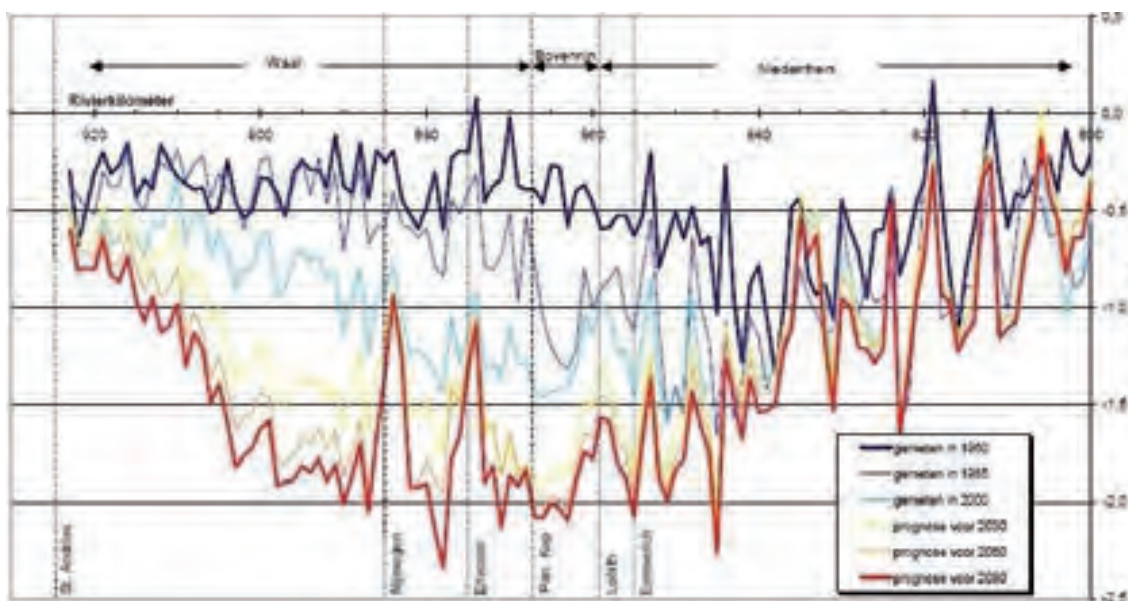


Figure III.3. Débits à différentes stations de mesure de la Waal (source: Rijkswaterstaat, 2007).

Conclusions

- Jusqu'en 2050, les changements climatiques devraient avoir des effets réduits sur la navigation fluviale.
- Après 2050, selon le scénario Wp (élévation la plus élevée de la température), l'impact devrait être important. Le niveau de l'eau devrait diminuer pour atteindre la valeur de 2003 chaque été. Cela entraînerait une diminution de la capacité de charge et une augmentation des frais de transport. Par conséquent, cela nuirait à la compétitivité du transport fluvial, mais aussi des ports maritimes des Pays-Bas.
- Pour les autres scénarios étudiés, les effets devraient être réduits jusqu'en 2100.
- La dégradation du lit des cours d'eau a des effets plus graves à court terme. Jusqu'en 2030, la hauteur de l'eau pourrait diminuer d'environ 0,6 m.
- Le transport fluvial doit résoudre de façon plus urgente le problème de la dégradation du lit des cours d'eau que celui des changements climatiques, qui devrait avoir de graves incidences après 2050 dans le scénario Wp, le plus pessimiste.

Références

- A.H. Krekt, T. J. v. d. Laan, R. A. E. v. d. Meer, B. Turpijn, E. Bolt, O. Jonkeren, A. v. d. Toorn, E. Mosselman, J. v. Meijeren et T. Groen (2010). Climate change and inland waterway transport: effects on the inland waterway sector, the Port of Rotterdam and potential solutions.
- B. Turpijn, R. Weekhout (2011). Klimaat en Binnenvaart. Een strategische verkenning naar de effecten van klimaatverandering op het gebruik van het hoofdvaarwegennet.
- H. Havinga (2012). Morfologie Bovenrijn en Waal. Het autonome proces en maatregelen.
- H. Verheij (2010). Effecten van Klimaatverandering op de Waterhuishouding.



Annexe IV: Questionnaire



EFFETS DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES ET ADAPTATION À CES CHANGEMENTS DANS LES RÉSEAUX DE TRANSPORT INTERNATIONAUX

Questionnaire

2012

Comité des transports intérieurs (CTI) de la CEE

Date

| | | | |
|---------|----------------------|---------------------------|--------------------------------------|
| Nom | <input type="text"/> | Fonction | <input type="text"/> |
| Adresse | <input type="text"/> | | Organisation <input type="text"/> |
| Ville | <input type="text"/> | État <input type="text"/> | Code postal <input type="text"/> |
| | | | N° de téléphone <input type="text"/> |
| Pays | <input type="text"/> | | Email <input type="text"/> |

I. Degré de sensibilisation et disponibilité de l'information sur les effets des changements climatiques

QUESTION 1. Sur une échelle de 1 à 10 (1 = pas du tout important, 10 = très important), comment évaluez-vous le problème des changements climatiques pour les transports ?

Pas du tout 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 Beaucoup

QUESTION 2. À quelle échéance pensez-vous que les changements climatiques poseront un problème ?

Choisissezz

QUESTION 3. Sur une échelle de 1 à 10 (1 = aucune connaissance, 10 = très bonnes connaissances), quel est, selon vous, le degré de connaissances et la prise de conscience des effets des changements climatiques sur les transports dans votre pays ou votre région ?

Aucune connaissance 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 Très bonnes connaissances

QUESTION 4. À votre avis, quel devrait être le principal public ciblé par les campagnes de sensibilisation aux effets des changements climatiques sur les transports (ministères, responsables du secteur, gestionnaires, investisseurs, etc.) ?

Veuillez préciser

QUESTION 5. Le cas échéant, dans quelle mesure et comment les transports ont-ils été touchés par des facteurs météorologiques et climatiques (élévation des températures, phénomènes extrêmes, sécheresses, inondations, élévation du niveau de la mer et ondes de tempêtes, dégel du pergélisol, etc.) ?

Pas du tout touchés 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 Très touchés

Précisions (intensité, fréquences, détails, etc.)

QUESTION 6. Ces effets concernent-ils certains modes de transport précis ou un réseau reliant plusieurs modes de transport et centres logistiques ?

Veuillez préciser

QUESTION 7. Votre pays ou organisation a-t-il/elle entrepris une évaluation des facteurs de vulnérabilité précis des transports (segments, modes, réseaux, exploitation, infrastructure, etc.) vis-à-vis de certains facteurs météorologiques ou climatiques (élévation des températures, phénomènes extrêmes, sécheresses, inondations, élévation du niveau de la mer et ondes de tempêtes, dégel du pergélisol, etc.) ?

OUI NON

Si oui, lesquelles ?

QUESTION 8. Votre pays ou organisation a-t-il/elle réalisé des études permettant de mieux connaître a) les conséquences des changements climatiques sur les transports ou b) estimé le coût des dégâts réels ou éventuels aux transports et en particulier aux infrastructures ?

a. OUI NON b. OUI NON

a) Le cas échéant, merci de préciser de quel phénomène on a étudié les conséquences sur l'infrastructure.

| | | | |
|----|--|------------------------------|------------------------------|
| 1. | Élévation des températures | Oui <input type="checkbox"/> | Non <input type="checkbox"/> |
| 2. | Inondations | Oui <input type="checkbox"/> | Non <input type="checkbox"/> |
| 3. | Sécheresses | Oui <input type="checkbox"/> | Non <input type="checkbox"/> |
| 4. | Tempêtes ou vents violents | Oui <input type="checkbox"/> | Non <input type="checkbox"/> |
| 5. | Vagues de chaleur | Oui <input type="checkbox"/> | Non <input type="checkbox"/> |
| 6. | Élévation du niveau de la mer et ondes de tempêtes | Oui <input type="checkbox"/> | Non <input type="checkbox"/> |
| 7. | Dégel du pergélisol | Oui <input type="checkbox"/> | Non <input type="checkbox"/> |
| 8. | Autres phénomènes (le(s)quel(s) Merci de développer) | | |

b) Le cas échéant, merci de préciser de quel phénomène on a étudié les conséquences sur le fonctionnement ou les services.

| | | | | | |
|----|--|-----|--------------------------|-----|--------------------------|
| 1. | Élévation des températures | Oui | <input type="checkbox"/> | Non | <input type="checkbox"/> |
| 2. | Inondations | Oui | <input type="checkbox"/> | Non | <input type="checkbox"/> |
| 3. | Sécheresses | Oui | <input type="checkbox"/> | Non | <input type="checkbox"/> |
| 4. | Tempêtes ou vents violents | Oui | <input type="checkbox"/> | Non | <input type="checkbox"/> |
| 5. | Vagues de chaleur | Oui | <input type="checkbox"/> | Non | <input type="checkbox"/> |
| 6. | Élévation du niveau de la mer et ondes de tempêtes | Oui | <input type="checkbox"/> | Non | <input type="checkbox"/> |
| 7. | Dégel du pergélisol | Oui | <input type="checkbox"/> | Non | <input type="checkbox"/> |
| 8. | Autres phénomènes (le(s)quel(s) Merci de développer) | | | | |

QUESTION 9. Si les effets des changements climatiques sur les transports ont été peu ou pas étudiés dans votre pays, quelles en sont les principales raisons, à votre avis ?

| | | |
|----|---|--------------------------|
| 1. | Financements insuffisants | <input type="checkbox"/> |
| 2. | Manque d'intérêt de la part des institutions responsables | <input type="checkbox"/> |
| 3. | Manque de sensibilité à ces questions du grand public | <input type="checkbox"/> |
| 4. | Manque de savoir-faire scientifique et de ressources humaines | <input type="checkbox"/> |
| 5. | Cette question a suscité l'intérêt, mais d'autres questions ont été estimées prioritaires | <input type="checkbox"/> |
| 6. | Autres (merci de développer) | |

QUESTION 10. Sur une échelle de 1 à 10 (1 = le moins important, 10 = le plus important), quelle importance donnez-vous à l'engagement des acteurs ou des parties prenantes suivantes pour l'étude, la recherche et la diffusion d'informations sur les effets des changements climatiques sur les transports ?

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|--------------------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Ministère de l'environnement | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Ministère des transports | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Organisations internationales | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Universités | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Entreprises privées | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Instituts techniques ou d'ingénierie | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| ONG | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Autres (merci de préciser) | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |

QUESTION 11. À votre avis, quelles sont les occasions que pourraient offrir les changements climatiques sur les transports, dans votre pays (par exemple, augmentation du tourisme, de la production agricole, etc.) ?

Merci de préciser

II. Niveau de préparation et politiques, mesures et initiatives existantes et prévues d'adaptation des transports

QUESTION 12. Votre pays/organisation a-t-il/elle adopté ou prévoit-il/elle d'adopter une stratégie générale (non sectorielle) d'adaptation aux effets des changements climatiques ?

- 1. Pas du tout
- 2. Prévu
- 3. Adopté
- 4. Adopté et mis en œuvre
- 5. Sans objet/Ne sais pas

Quelle stratégie ?

QUESTION 13. Une analyse coûts-avantages a-t-elle été menée concernant des plans ou une stratégie d'adaptation dans votre pays ou votre organisation ?

- 1. Pas du tout
- 2. Prévue
- 3. Réalisée
- 4. Sans objet/Ne sais pas

Merci de préciser

QUESTION 14. Votre pays/organisation a-t-il/elle adopté ou prévoit-il/elle d'adopter une stratégie d'adaptation aux changements climatiques pour les transports ?

- 1. Pas du tout
- 2. Prévu
- 3. Adopté
- 4. Adopté et mis en œuvre
- 5. Sans objet/Ne sais pas

Laquelle ?

QUESTION 15. Sur une échelle de 1 à 4 (1 = pas efficace du tout, 4 = très efficace), quelle efficacité attribueriez-vous à chaque stratégie d'adaptation ?

| Stratégie (merci de préciser) | 1 | 2 | 3 | 4 | Pourquoi? |
|-------------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|-----------|
| | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | |
| | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | |
| | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | |
| | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | |
| | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | |

QUESTION 16. Comment l'efficacité des mesures prises ou prévues est-elle ou sera-t-elle surveillée et évaluée ?

Détaillez

QUESTION 17. Quelles actions concrètes, le cas échéant, sont prévues sur la question du renforcement de la résilience des réseaux de transport aux effets des changements climatiques, dans votre pays/organisation [dans votre domaine de compétences] ?

Précisez

QUESTION 18. Veuillez préciser si ces actions sont liées à la planification, à l'investissement, à la conception, à la construction, à l'exploitation, à la gestion ou à l'entretien des systèmes de transport, et dans quelle mesure.

| | 1 (pas du tout lié) | 2 (dans une certaine mesure) | 3 (très lié) | 4 (Sans objet/ Ne sais pas) |
|------------------------|--------------------------|------------------------------|--------------------------|-----------------------------|
| Planification | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Investissement | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Conception | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Construction | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Exploitation | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Gestion | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Entretien | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Tout ce qui précède | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Rien de ce qui précède | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |

Autres, merci de développer

QUESTION 19. Si de nouveaux projets de développement d'infrastructures sont en cours ou envisagés, tiennent-ils compte des effets des changements climatiques (phénomènes extrêmes, augmentation des précipitations, élévation du niveau de la mer, etc.) ?

- 1. Pas du tout
- 2. Dans une certaine mesure
- 3. Prise en compte importante
- 4. Sans objet/Ne sais pas

Merci de développer

QUESTION 20. Compte tenu de l'expérience de votre pays/organisation/entreprise, quels sont, à votre avis, les bonnes pratiques et les enseignements les plus importants à tirer des mesures d'adaptation dans les transports ?

Merci de développer

QUESTION 21. Votre pays développe-t-il ou prévoit-il de développer des systèmes d'intervention d'urgence pour a) tous les secteurs d'activité, b) le secteur des transports, c) certains sous-secteurs des transports ?

- | | | | | | |
|----|--|----|--|----|--|
| a. | 1. Pas du tout <input type="checkbox"/> | b. | 1. Pas du tout <input type="checkbox"/> | c. | 1. Pas du tout <input type="checkbox"/> |
| | 2. Prévu <input type="checkbox"/> | | 2. Prévu <input type="checkbox"/> | | 2. Prévu <input type="checkbox"/> |
| | 3. Adopté <input type="checkbox"/> | | 3. Adopté <input type="checkbox"/> | | 3. Adopté <input type="checkbox"/> |
| | 4. Adopté et mis en œuvre <input type="checkbox"/> | | 4. Adopté et mis en œuvre <input type="checkbox"/> | | 4. Adopté et mis en œuvre <input type="checkbox"/> |
| | 5. Sans objet/Ne sais pas <input type="checkbox"/> | | 5. Sans objet/Ne sais pas <input type="checkbox"/> | | 5. Sans objet/Ne sais pas <input type="checkbox"/> |

Merci de développer

QUESTION 22. Dans votre pays, les assurances tiennent-elles compte de l'aléa climatique dans les produits qu'elles proposent au secteur des transports ?

- 1. Pas du tout
- 2. Dans une certaine mesure
- 3. Prise en compte importante
- 4. Sans objet/Ne sais pas

Merci de développer

III. Besoins d'informations, de statistiques et de financements, et travaux de recherche

QUESTION 23. *Quel sont, à votre avis, les informations, statistiques ou prévisions les plus valables pour se préparer de façon efficace aux effets des changements climatiques et pour concevoir des mesures d'adaptation adéquates pour les transports (plusieurs réponses possibles) ?*

- | | |
|--|--------------------------|
| Relatives aux températures | <input type="checkbox"/> |
| Relatives aux précipitations (pluie, neige, brouillard, humidité, inondations, etc.) | <input type="checkbox"/> |
| Inland strong wind and storms | <input type="checkbox"/> |
| Coastal storms/surges and sea level rise | <input type="checkbox"/> |
| Other | <input type="checkbox"/> |

Merci de développer

QUESTION 24. *Quels sont principales sources d'informations et de statistiques utilisées actuellement pour étudier les effets des changements climatiques et élaborer des mesures d'adaptation dans les transports ?*

Merci de préciser

QUESTION 25. *Quelle note attribuez-vous à la disponibilité de statistiques et d'informations dans votre pays (1 = très peu disponibles, 5 = très facilement disponibles) ?*

- | | | |
|----|-----------------------------|--------------------------|
| 1. | Très peu disponibles | <input type="checkbox"/> |
| 2. | Peu disponibles | <input type="checkbox"/> |
| 3. | Assez disponibles | <input type="checkbox"/> |
| 4. | Facilement disponibles | <input type="checkbox"/> |
| 5. | Très facilement disponibles | <input type="checkbox"/> |
| 6. | Sans objet/Ne sais pas | <input type="checkbox"/> |

QUESTION 26. *Quelle note attribuez-vous à la validité, la pertinence ou la qualité des statistiques et des informations dans votre pays (1 = très mauvaise, 5 = très bonne) ?*

- | | | |
|----|------------------------|--------------------------|
| 1. | Très mauvaise | <input type="checkbox"/> |
| 2. | Médiocre | <input type="checkbox"/> |
| 3. | Assez bonne | <input type="checkbox"/> |
| 4. | Bonne | <input type="checkbox"/> |
| 5. | Très bonne | <input type="checkbox"/> |
| 6. | Sans objet/Ne sais pas | <input type="checkbox"/> |

QUESTION 27. *À votre connaissance, existe-t-il des modèles ou des outils informatiques permettant de prévoir les risques climatiques pour l'infrastructure des transports (par exemple prévision des effets des ondes de tempêtes sur les ports ou des inondations sur les plaines) ?*

OUI NON Ne sait pas

QUESTION 28. *Le cas échéant, veuillez énumérer les modèles et/ou outils informatiques connus, à chaque niveau d'agrégation (méthodes de niveau 1, 2 ou 3 selon le GIEC : niveau 1, méthode la plus simple, statistiques sur l'activité disponibles dans tous les pays ; niveau 2 : facteur d'émission propre à la technique employée ; niveau 3 : méthode plus détaillée ou propre à chaque pays. Pour plus de détails, voir https://unfccc.int/files/meetings/unfccc_calendar/application/vnd.ms-powerpoint/ipcc_good_practice_guidance.ppt.)*

Merci de développer

QUESTION 29. *Quel(s) mécanisme(s) existant(s) ou prévu(s), pourrai(en)t financer de nouvelles mesures d'adaptation dans les transports (y compris des études d'impact) ?*

Merci de développer

QUESTION 30. *Globalement, précisez quels sont les domaines prioritaires précis qui doivent être suivis de plus près pour permettre la mise en œuvre de stratégies d'adaptation efficaces et adaptées à la situation locale.*

Merci de développer

IV. Mécanismes de collaboration à l'échelon national ou local, régional ou international

QUESTION 31. *Quels sont les mécanismes existants ou prévus de collaboration que vous estimez les plus utiles pour permettre l'adaptation des transports aux changements climatiques ? Merci de justifier brièvement vos réponses en précisant le type de collaboration ou de partenariat ou le type d'infrastructure, de service ou de fonctionnement auquel vous pensez.*

Votre réponse

QUESTION 32. *Estimez-vous que le degré actuel de collaboration nationale ou locale est adapté ou suffisant ?*

- | | | |
|----|--------------------------|--------------------------|
| 1. | Pas du tout | <input type="checkbox"/> |
| 2. | Dans une certaine mesure | <input type="checkbox"/> |
| 3. | Adéquat / suffisant | <input type="checkbox"/> |
| 4. | Très bon | <input type="checkbox"/> |

Le cas échéant, que proposez-vous pour améliorer ou renforcer la collaboration ?

Votre réponse

QUESTION 33. *La coopération et l'échange d'informations à l'échelon régional ou sous-régional font-ils partie des pratiques en vigueur dans votre pays ? Si oui, quelle est la part de cette collaboration consacrée aux transports et comment se fait-elle ?*

OUI NON

Merci de développer

QUESTION 34. *Le degré actuel de collaboration vous semble-t-il adéquat ou suffisant, à l'échelon régional ou sous-régional ?*

- | | | |
|----|--------------------------|--------------------------|
| 1. | Pas du tout | <input type="checkbox"/> |
| 2. | Dans une certaine mesure | <input type="checkbox"/> |
| 3. | Adéquat / suffisant | <input type="checkbox"/> |
| 4. | Très bon | <input type="checkbox"/> |

Le cas échéant, que proposez-vous pour améliorer ou renforcer la collaboration ?

Votre réponse

QUESTION 35. *Pensez-vous qu'il faille envisager de modifier les accords existants dans la CEE sur les infrastructures (Accord européen sur les grandes routes de trafic international (AGR), Accord européen sur les grandes lignes internationales de chemin de fer (AGC), Accord européen sur les grandes voies navigables d'importance internationale (AGN), Accord européen sur les grandes lignes de transport international combiné et les installations connexes (AGTC)) dans le but de promouvoir ou de faciliter l'adaptation des réseaux de transport au changements climatiques ?*

Merci de développer

QUESTION 36. *Estimez-vous le degré de coopération internationale adéquat ou suffisant ?*

- | | | |
|----|--------------------------|--------------------------|
| 1. | Pas du tout | <input type="checkbox"/> |
| 2. | Dans une certaine mesure | <input type="checkbox"/> |
| 3. | Adéquat / suffisant | <input type="checkbox"/> |
| 4. | Très bon | <input type="checkbox"/> |

Le cas échéant, que proposez-vous pour améliorer ou renforcer la coopération ?

Votre réponse

QUESTION 37. À votre avis, quel type de coopération internationale seraient utiles pour trouver des solutions d'adaptation aux changements climatiques ?

Merci de développer

Questions propres aux infrastructures routières et ferroviaires

QUESTION 38. *L'administration publique, l'entreprise ou l'organisation que vous représentez a-t-elle conscience des facteurs de vulnérabilité de l'infrastructure routière ou ferroviaire aux risques naturels (par exemple, ponts vulnérables en cas d'inondation)?*

Merci de développer

QUESTION 39. *Dans ce cas, des priorités ont-elles été établies, à savoir probabilité de survenue plus importante et effets du phénomène (par exemple quelle est la probabilité pour un tronçon de chaussée ou de voie ferrée soit endommagé par une inondation et quelles en sont les conséquences?)*

Merci de développer

QUESTION 40. *Un mécanisme d'évaluation a-t-il été mis en place pour évaluer le niveau de risque actuel ?*

Merci de développer

Questions propres au transport fluvial et aux infrastructures des voies navigables intérieures

QUESTION 41. *Quels sont, à votre avis, les effets des changements climatiques sur l'infrastructure du transport fluvial ?*

Merci de développer

QUESTION 42. Quelle sera à votre avis l'ampleur de ces effets par rapport aux phénomènes climatiques existants (hautes et basses eaux saisonnières)?

Merci de développer

QUESTION 43. A votre avis, dans quelle mesure les changements climatiques pourraient se répercuter sur la navigation fluviale et entraîner un transfert vers d'autres modes de transport?

Merci de développer

QUESTION 44. Quelles mesures avez-vous prévues ou adoptées pour rendre les infrastructures et le transport fluvial résistants aux changements climatiques?

Merci de développer

QUESTION 45. Indiquez ci-dessous tout avis ou commentaire que vous estimez utile.

Envoyez votre réponse facilement et rapidement!

Appuyez sur le bouton « Imprimer le formulaire », ci-dessous, et faites-nous le parvenir par télécopie, au + 41 22 917 00 39 (secrétariat)

Ou appuyez sur « Envoyer par email », ci-dessous. Vos réponses seront automatiquement transmises, par courrier électronique, au secrétariat (un fichier au format XML est automatiquement créé et joint à un nouveau message électronique, qu'il ne vous reste plus qu'à envoyer à l'adresse konstantinos.alexopoulos@unece.org).

Print Form

Submit by Email



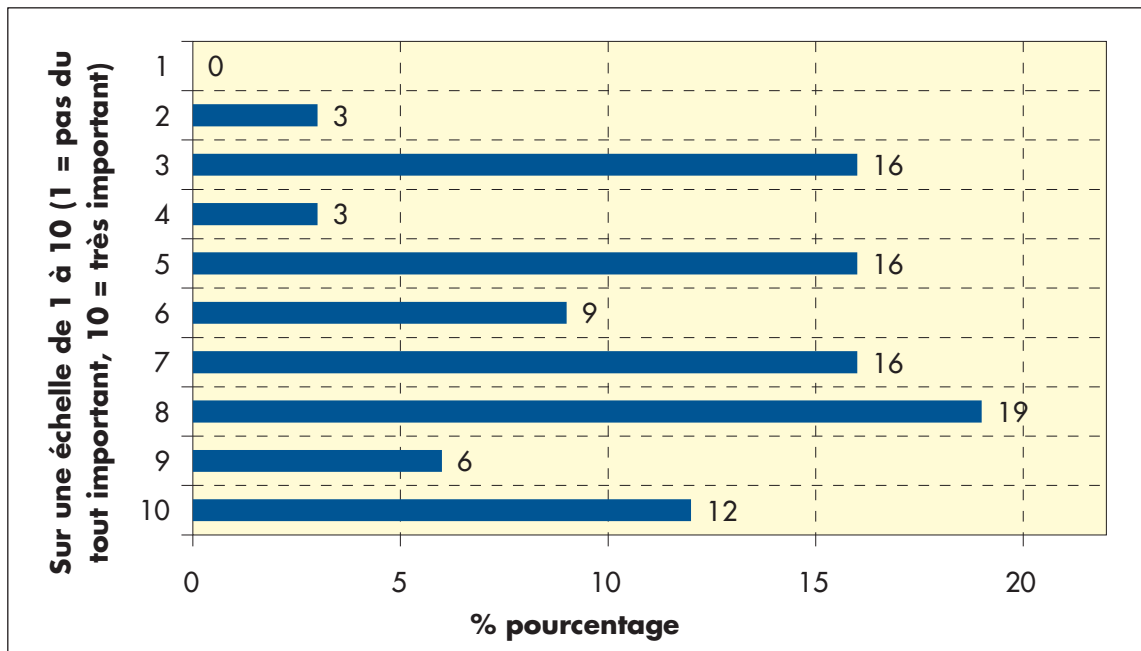
UNECE Transport Division
Transport Facilitation and Economics Section
Tel: +41 22 917 24 01
Fax: +41 22 917 00 39



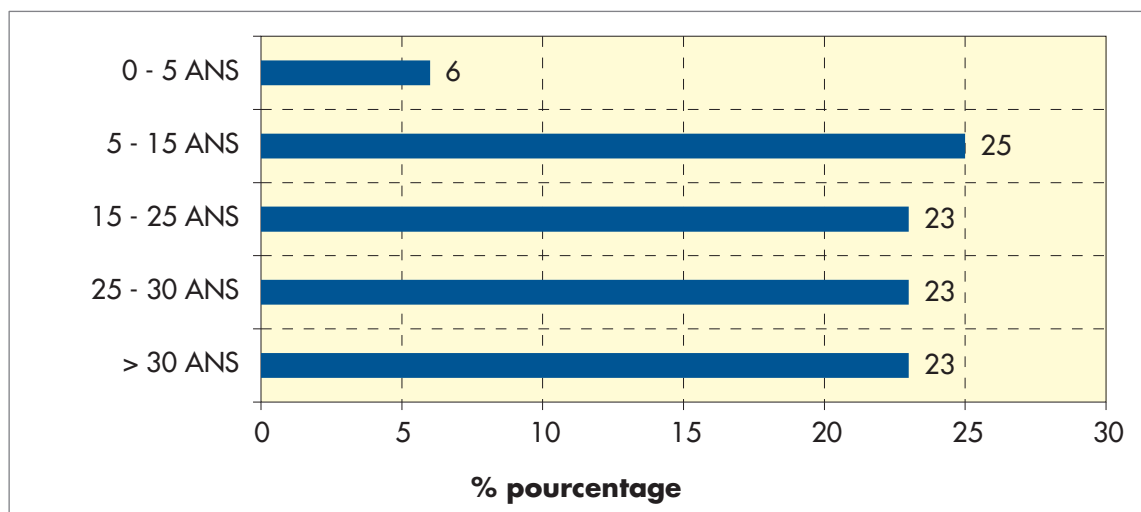
Inondations du Danube à Budapest (Hongrie) 2013, Internet

Annexe V: Résultats de l'enquête (questionnaire)

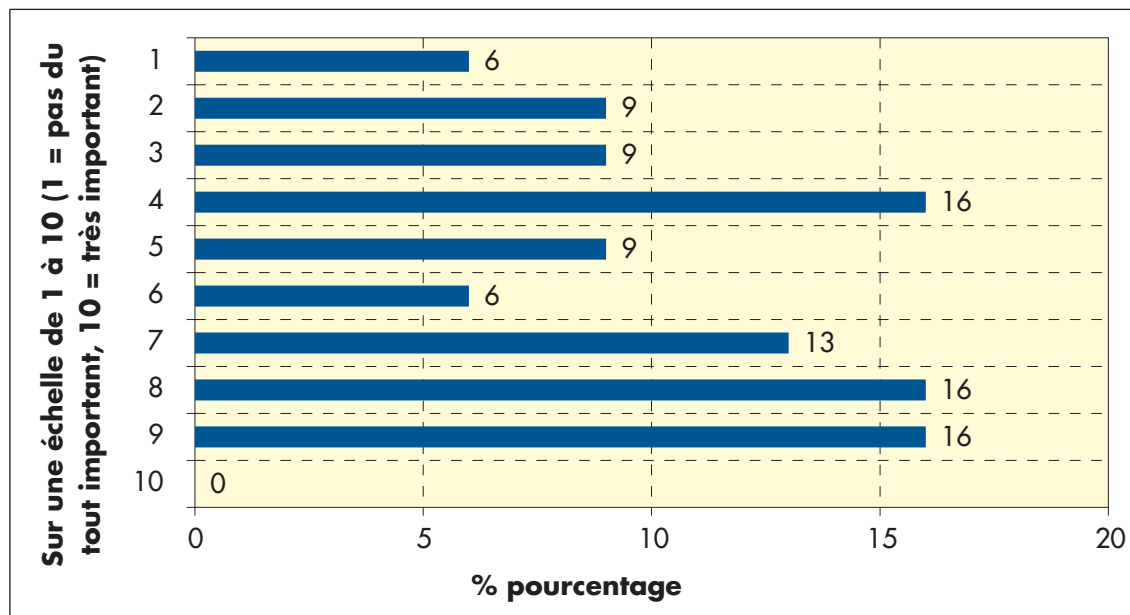
QUESTION 1. Sur une échelle de 1 à 10 (1 = pas du tout important, 10 = très important), comment évaluez-vous le problème des changements climatiques pour les transports ?



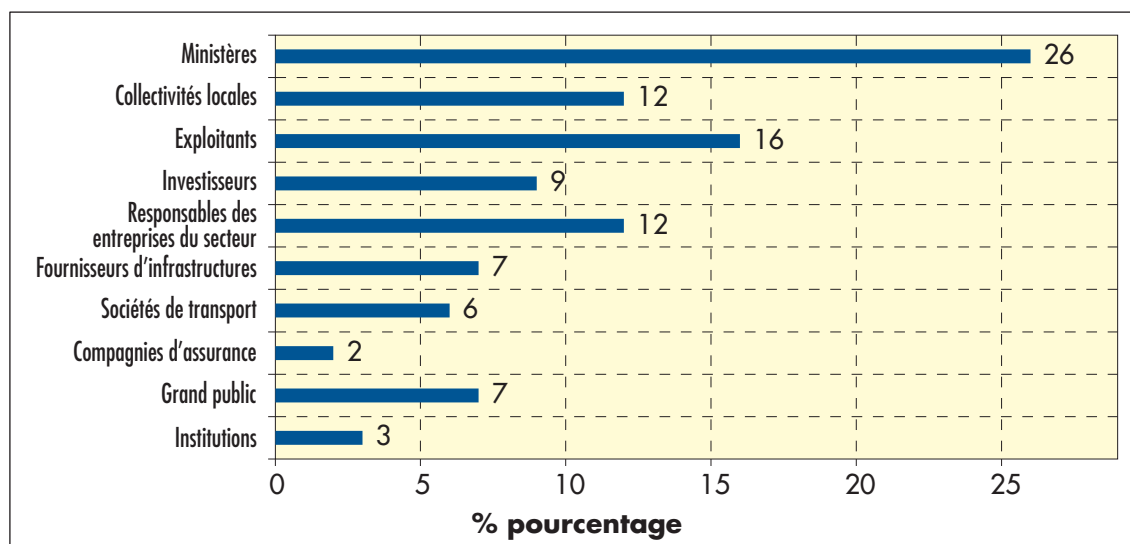
QUESTION 2. À quelle échéance pensez-vous que les changements climatiques poseront un problème ?



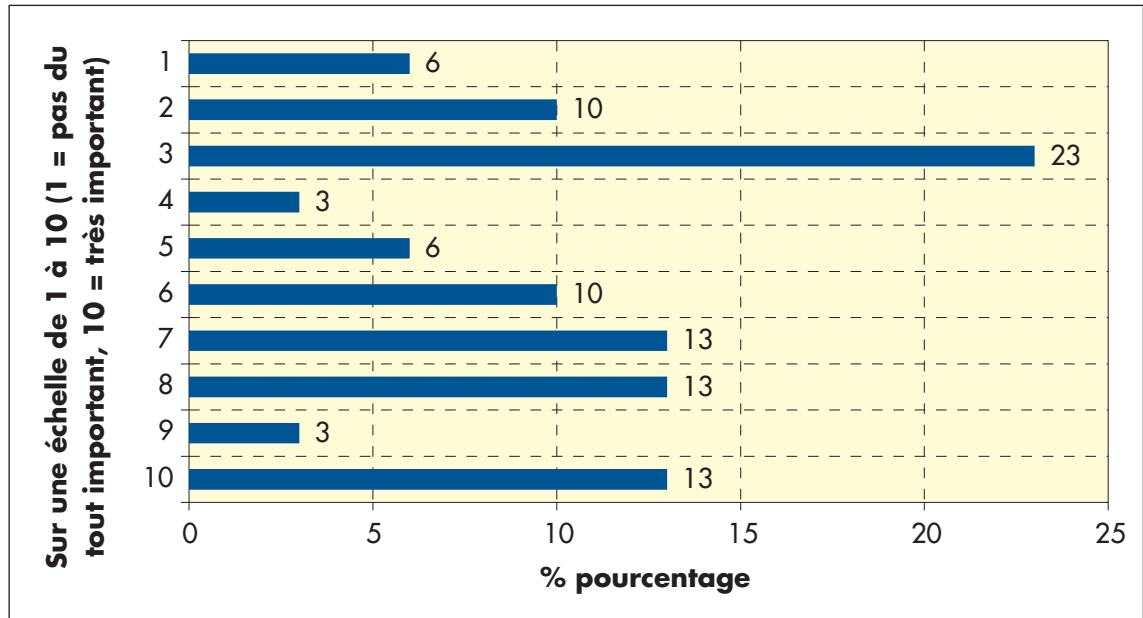
QUESTION 3. Sur une échelle de 1 à 10 (1 = aucune connaissance, 10 = très bonnes connaissances), quel est, selon vous, le degré de connaissances et la prise de conscience des effets des changements climatiques sur les transports dans votre pays ou votre région ?



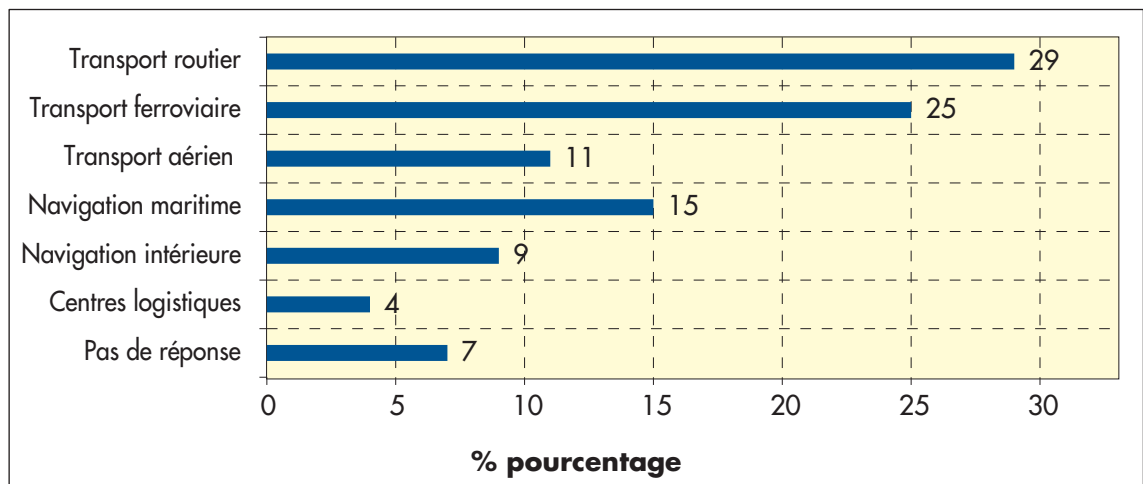
QUESTION 4. À votre avis, quel devrait être le principal public ciblé par les campagnes de sensibilisation aux effets des changements climatiques sur les transports (ministères, responsables du secteur, gestionnaires, investisseurs, etc.) ?



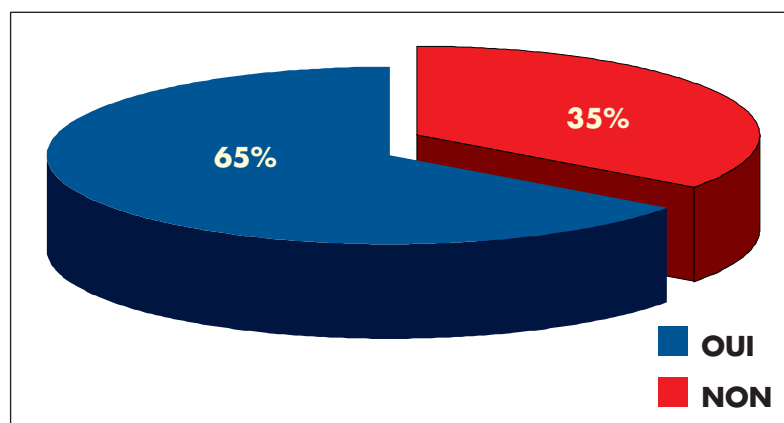
QUESTION 5. Le cas échéant, dans quelle mesure et comment les transports ont-ils été touchés par des facteurs météorologiques et climatiques (élévation des températures, phénomènes extrêmes, sécheresses, inondations, élévation du niveau de la mer et ondes de tempêtes, dégel du pergélisol, etc.) ?



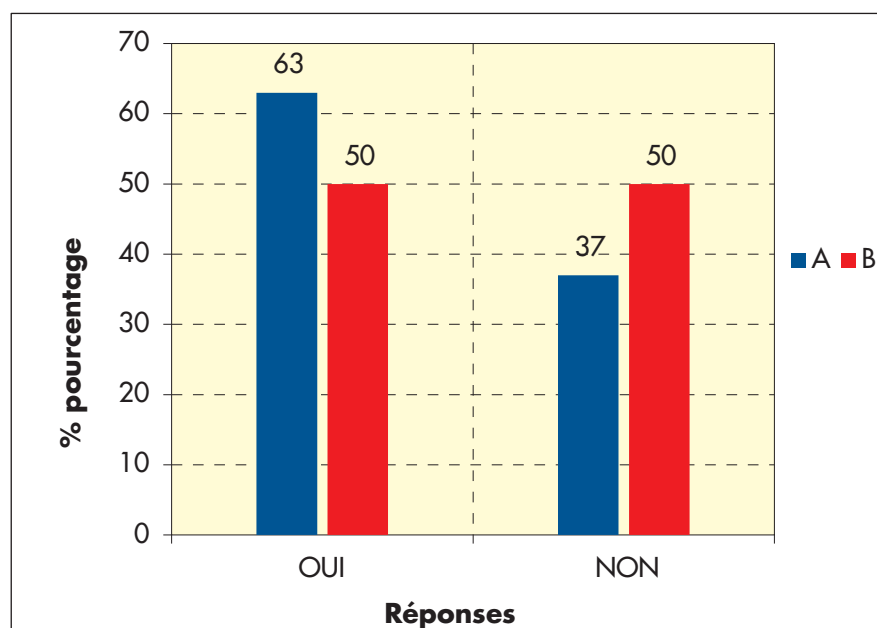
QUESTION 6. Ces effets concernent-ils certains modes de transport précis ou un réseau reliant plusieurs modes de transport et centres logistiques ?



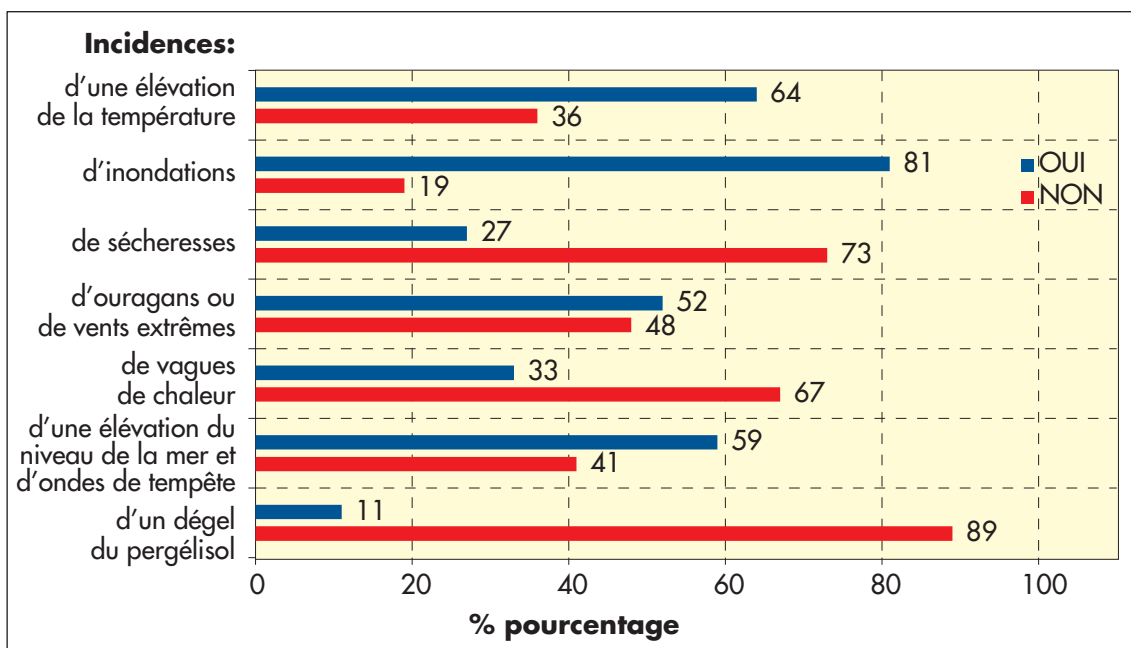
QUESTION 7. Votre pays ou organisation a-t-il/elle entrepris une évaluation des facteurs de vulnérabilité précis des transports (segments, modes, réseaux, exploitation, infrastructure, etc.) vis-à-vis de certains facteurs météorologiques ou climatiques (élévation des températures, phénomènes extrêmes, sécheresses, inondations, élévation du niveau de la mer et ondes de tempêtes, dégel du pergélisol, etc.) ?



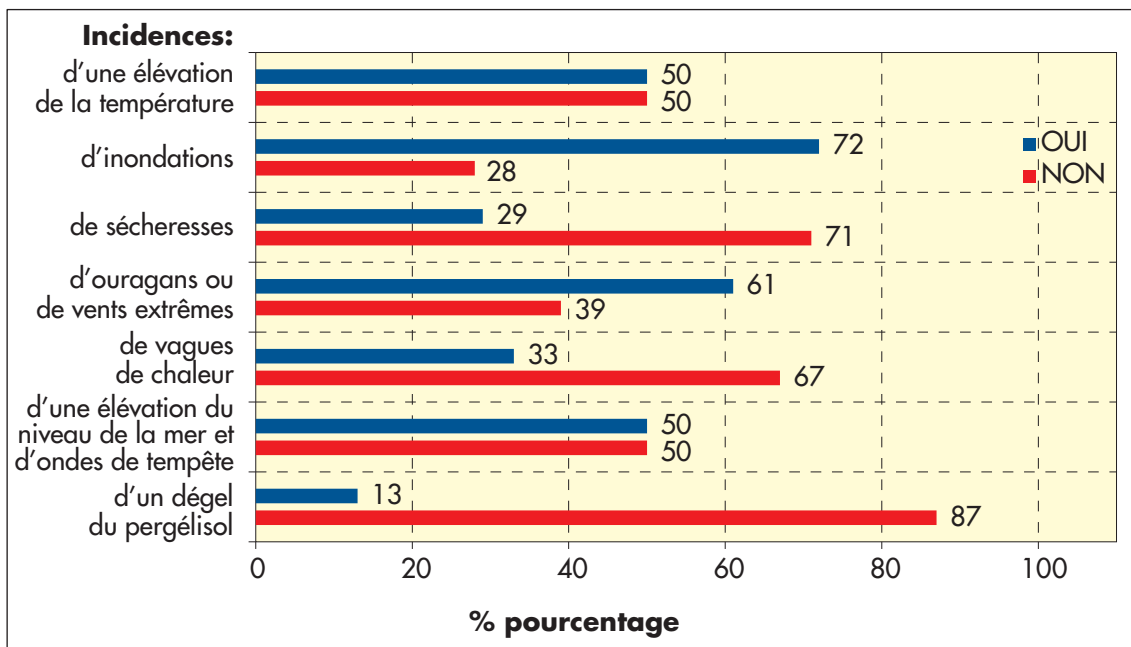
QUESTION 8. Votre pays ou organisation a-t-il/elle réalisé des études permettant de mieux connaître a) les conséquences des changements climatiques sur les transports ou b) estimé le coût des dégâts réels ou prévus aux transports et en particulier aux infrastructures ?



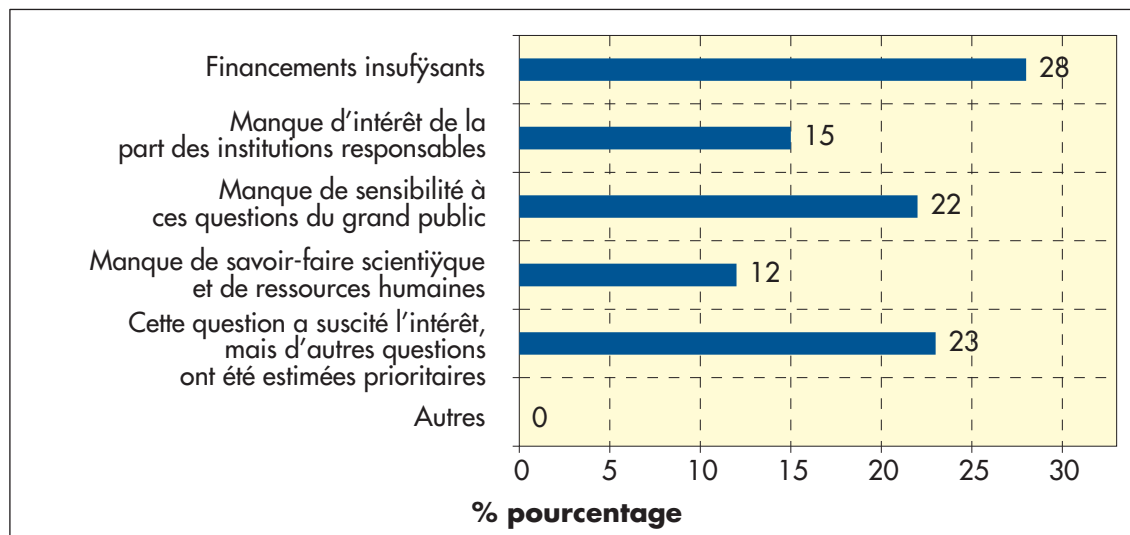
a. Conséquences des changements climatiques sur les transports



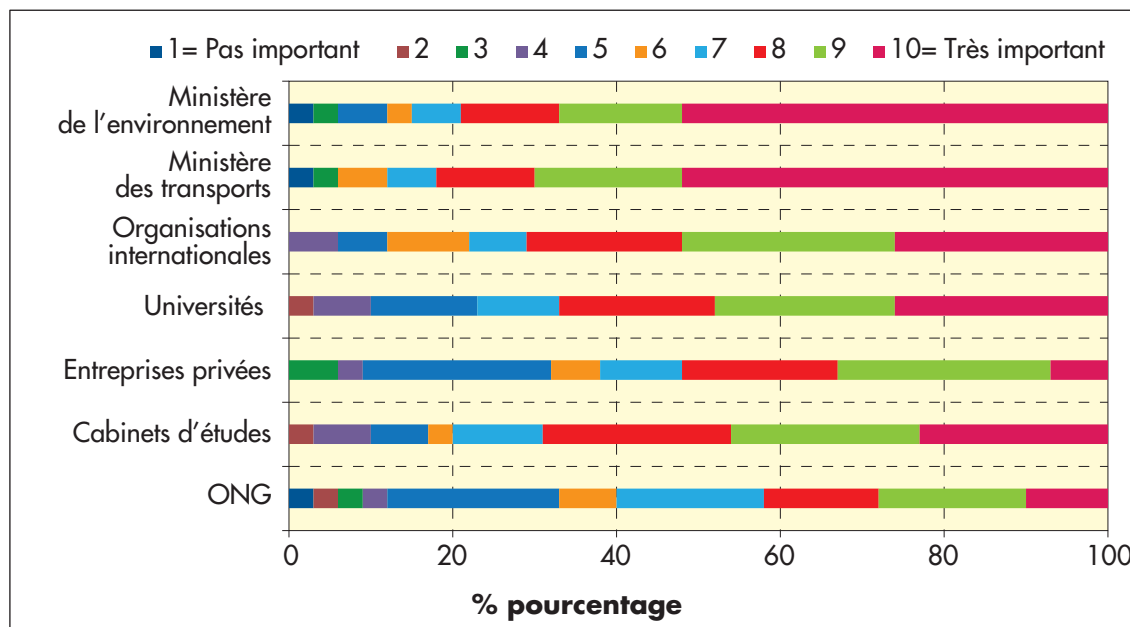
b. Coût des dégâts réels ou prévus aux transports et en particulier aux infrastructures



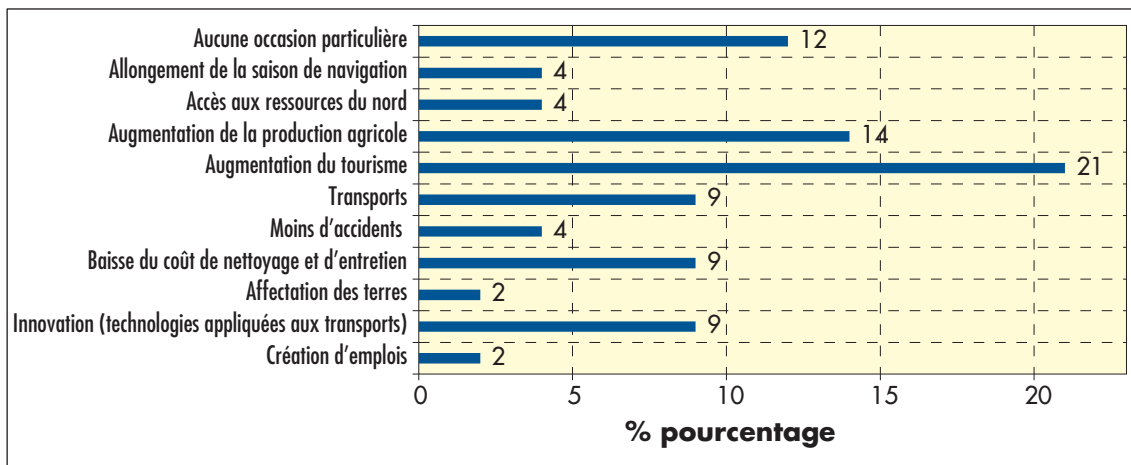
QUESTION 9. Si les effets des changements climatiques sur les transports ont été peu ou pas étudiés dans votre pays, quelles en sont les principales raisons, à votre avis ?



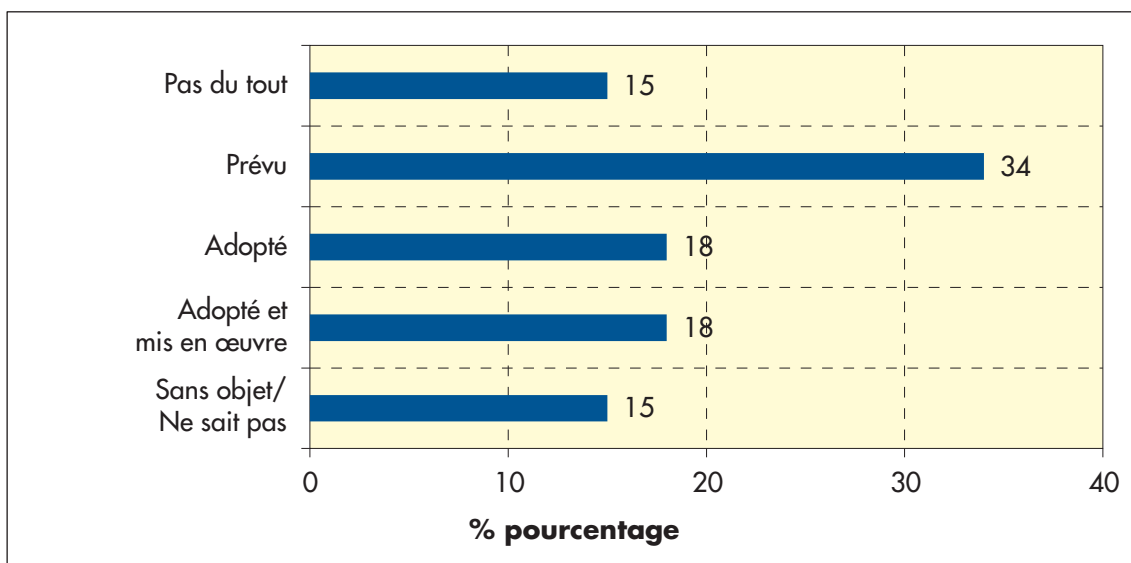
QUESTION 10. Sur une échelle de 1 à 10 (1 = le moins important, 10 = le plus important), quelle importance donnez-vous à l'engagement des acteurs ou des parties prenantes suivantes pour l'étude, la recherche et la diffusion d'informations sur les effets des changements climatiques sur les transports ?



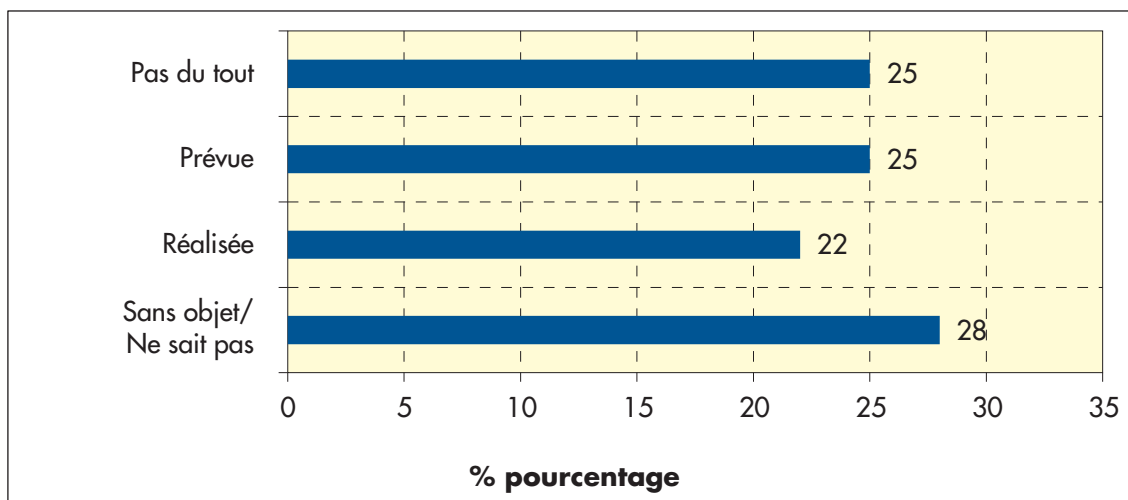
QUESTION 11. À votre avis, quelles sont les occasions que pourraient offrir les changements climatiques sur les transports, dans votre pays (par exemple, augmentation du tourisme, de la production agricole, etc.) ?



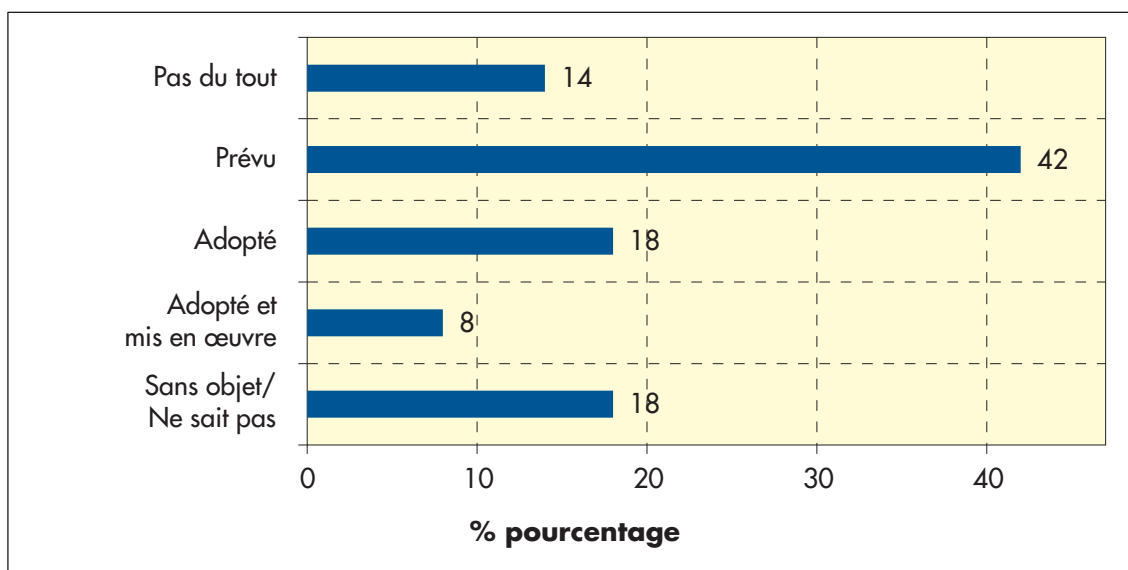
QUESTION 12. Votre pays/organisation a-t-il/elle adopté ou prévoit-il/elle d'adopter une stratégie générale (non sectorielle) d'adaptation aux effets des changements climatiques ?



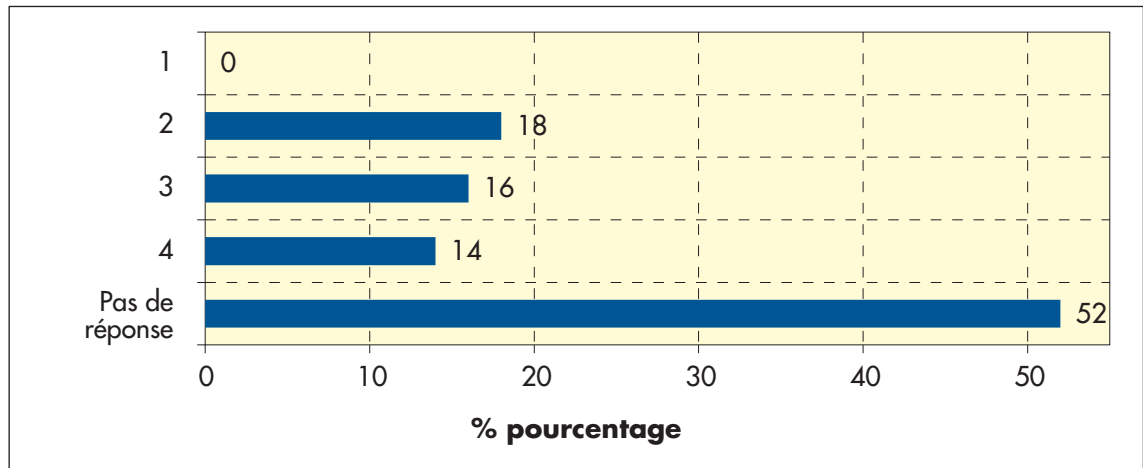
QUESTION 13. Une analyse coûts-avantages a-t-elle été menée concernant des plans ou une stratégie d'adaptation dans votre pays ou votre organisation ?



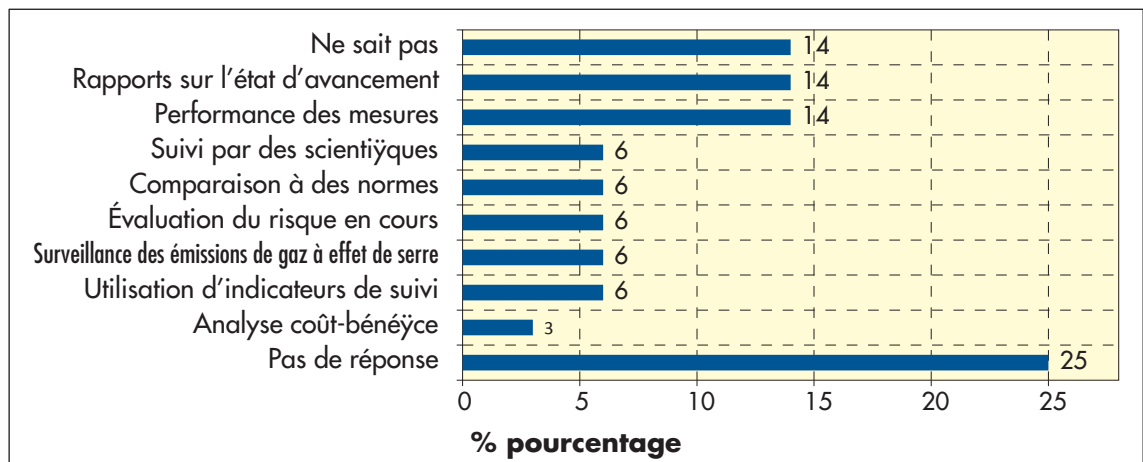
QUESTION 14. Votre pays/organisation a-t-il/elle adopté ou prévoit-il/elle d'adopter une stratégie d'adaptation aux changements climatiques pour les transports ?



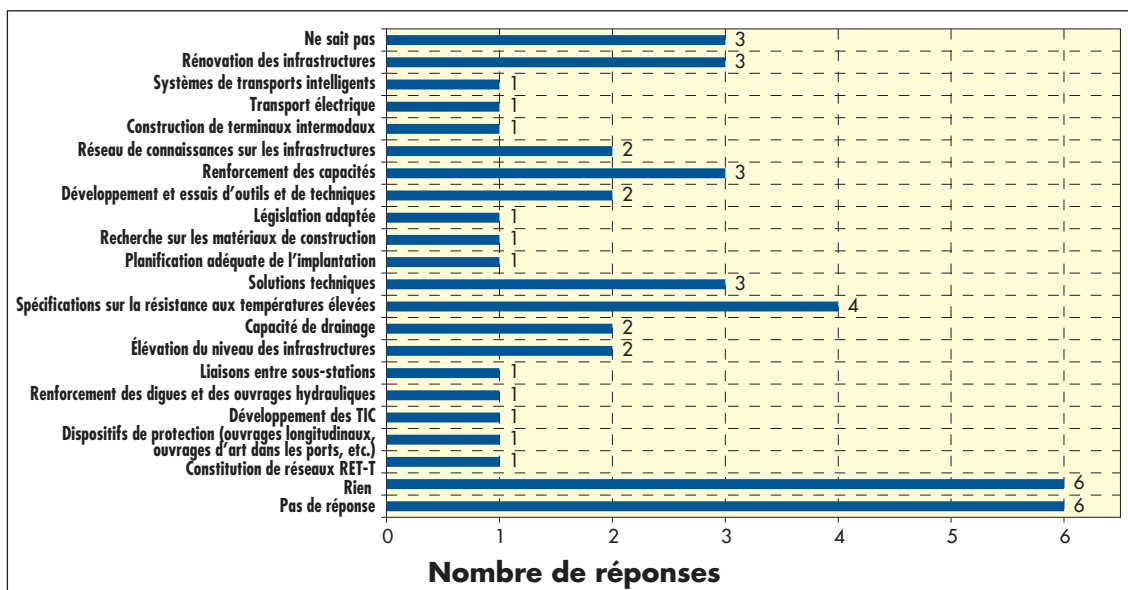
QUESTION 15. Sur une échelle de 1 à 4 (1 = pas efficace du tout, 4 = très efficace), quelle efficacité attribueriez-vous à chaque stratégie d'adaptation ?



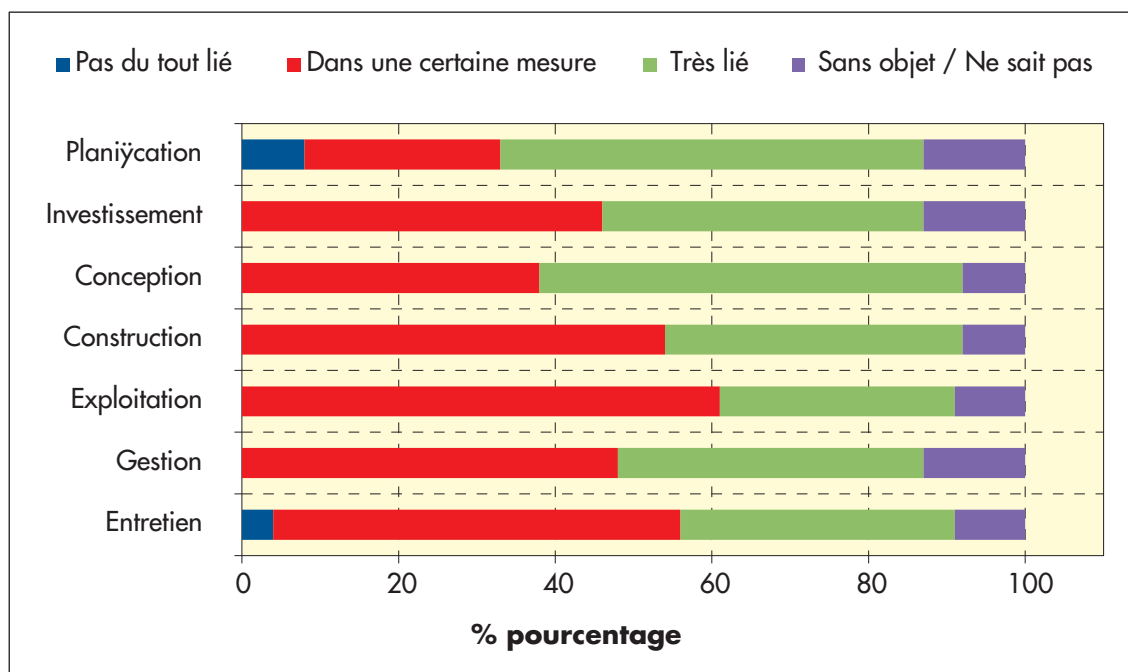
QUESTION 16. Comment l'efficacité des mesures prises ou prévues est-elle ou sera-t-elle su vieillée et évaluée ?



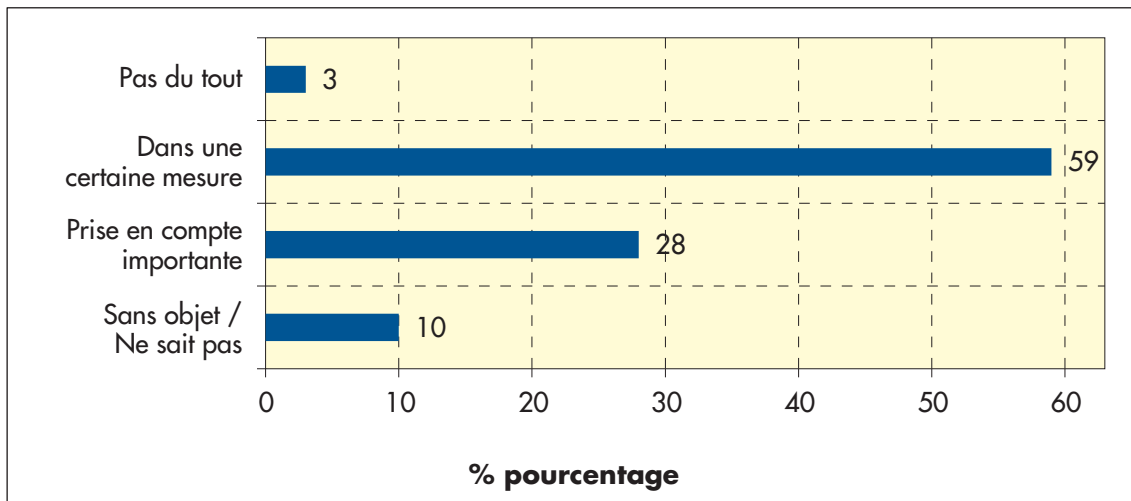
QUESTION 17. Quelles actions concrètes, le cas échéant, sont prévues sur la question du renforcement de la résilience des réseaux de transport aux effets des changements climatiques, dans votre pays/organisation [dans votre domaine de compétences] ?



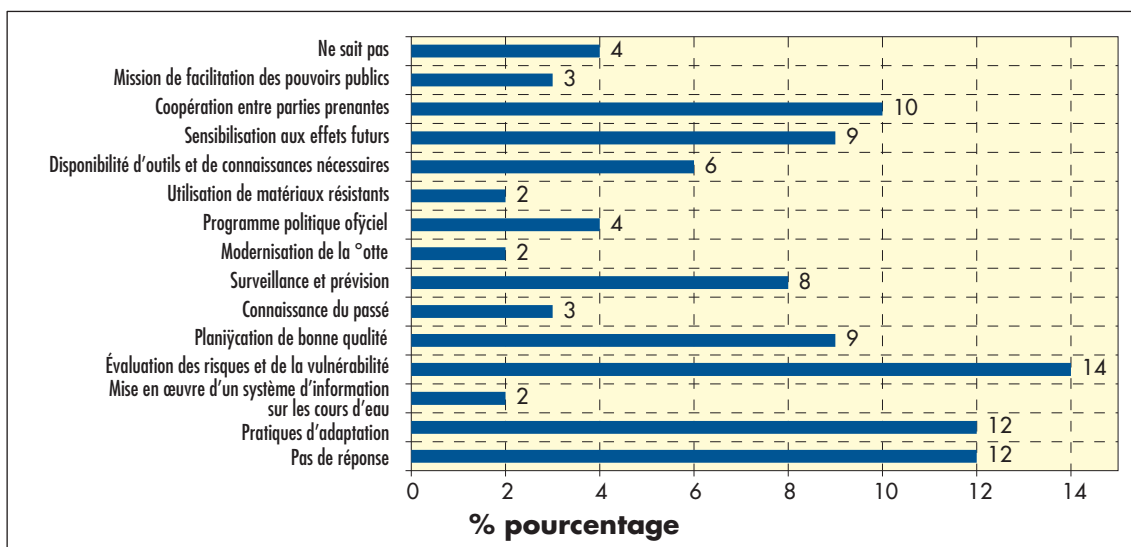
QUESTION 18. Veuillez préciser si ces actions sont liées à la planification, à l'investissement, à la conception, à la construction, à l'exploitation, à la gestion ou à l'entretien des systèmes de transport, et dans quelle mesure.



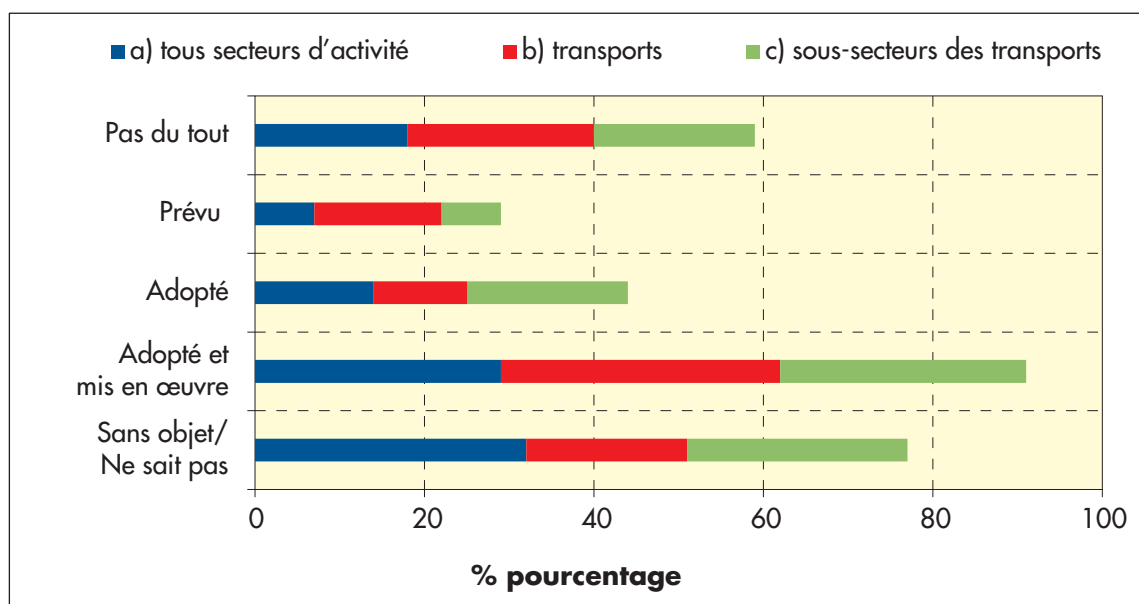
QUESTION 19. Si de nouveaux projets de développement d'infrastructures sont en cours ou envisagés, tiennent-ils compte des effets des changements climatiques (phénomènes extrêmes, augmentation des précipitations, élévation du niveau de la mer, etc.) ?



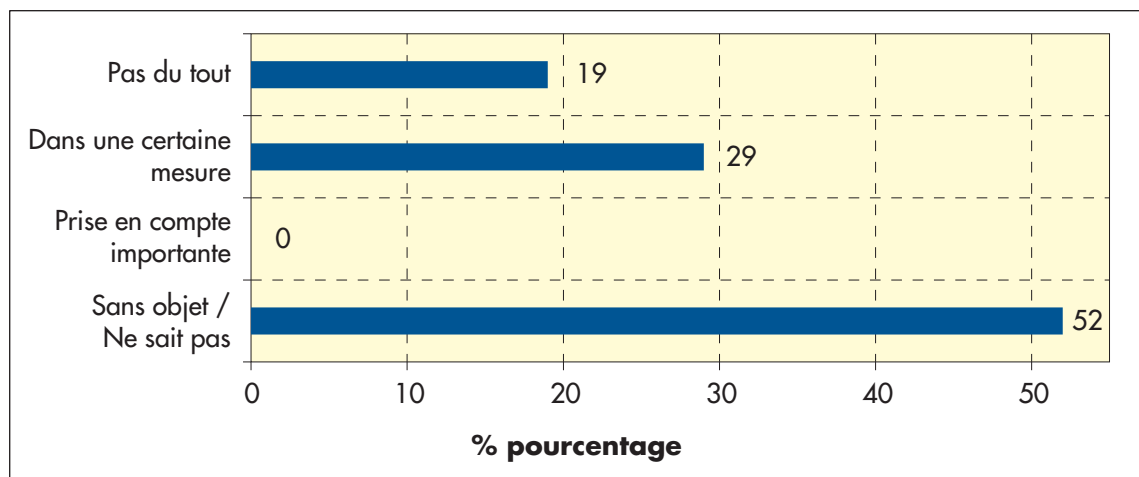
QUESTION 20. Compte tenu de l'expérience de votre pays/organisation/entreprise, quels sont, à votre avis, les bonnes pratiques et les enseignements les plus importants à tirer des mesures d'adaptation dans les transports ?



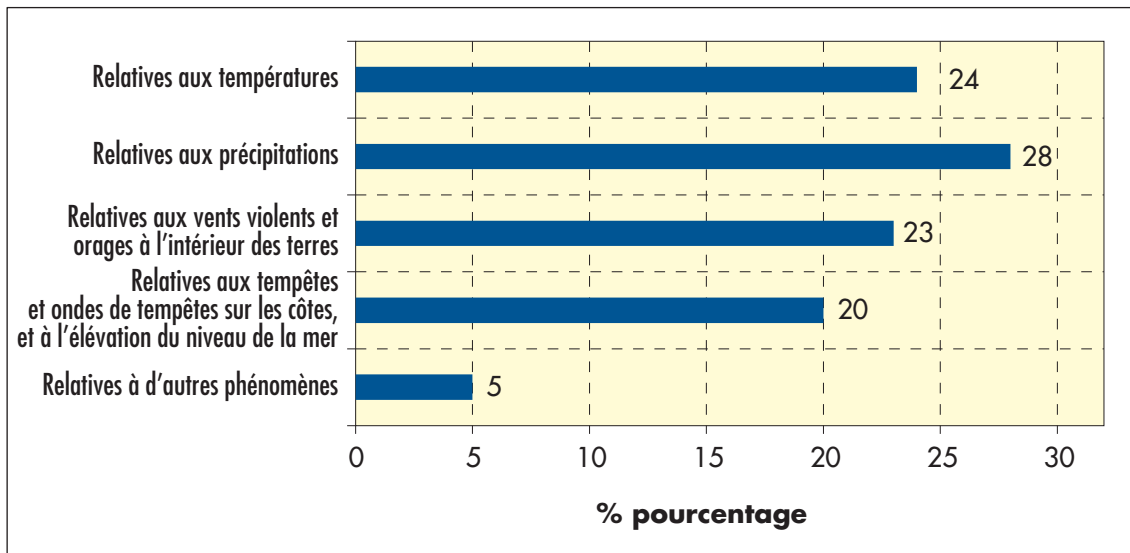
QUESTION 21. Votre pays [organisation/entreprise] développe-t-il ou prévoit-il de développer des systèmes d'intervention d'urgence pour a) tous les secteurs d'activité, b) le secteur des transports, c) certains sous-secteurs des transports ?



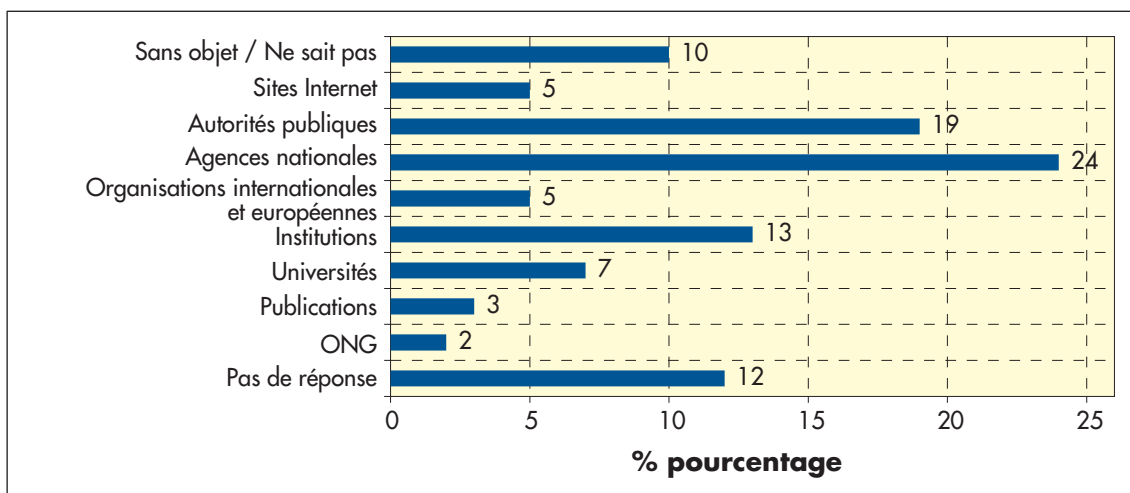
QUESTION 22. Dans votre pays, les assurances tiennent-elles compte de l'aléa climatique dans les produits qu'elles proposent au secteur des transports ?



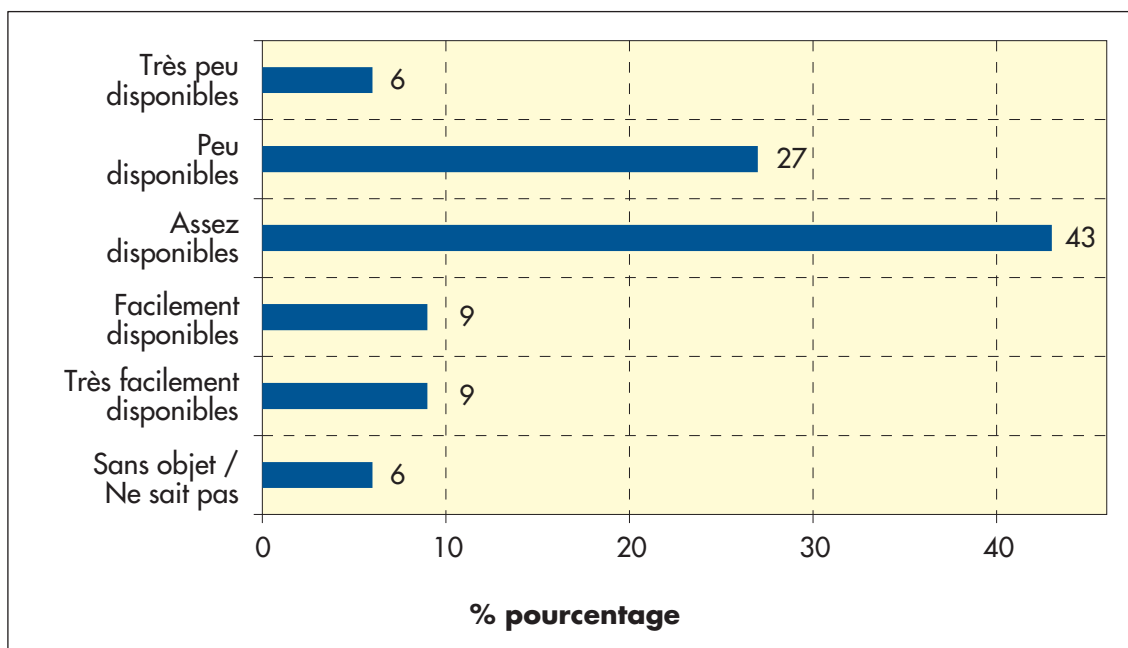
QUESTION 23. Quel sont, à votre avis, les informations, statistiques ou prévisions les plus valables pour se préparer de façon efficace aux effets des changements climatiques et pour concevoir des mesures d'adaptation adéquates pour les transports (plusieurs réponses possibles) ?



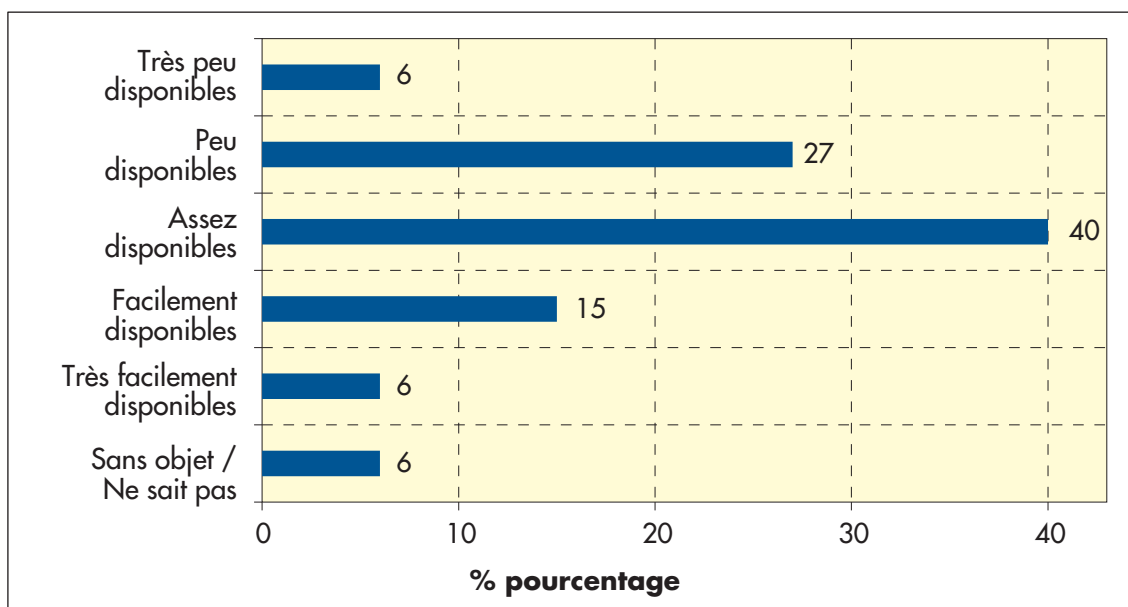
QUESTION 24. Quels sont principales sources d'informations et de statistiques utilisées actuellement pour étudier les effets des changements climatiques et élaborer des mesures d'adaptation dans les transports ?



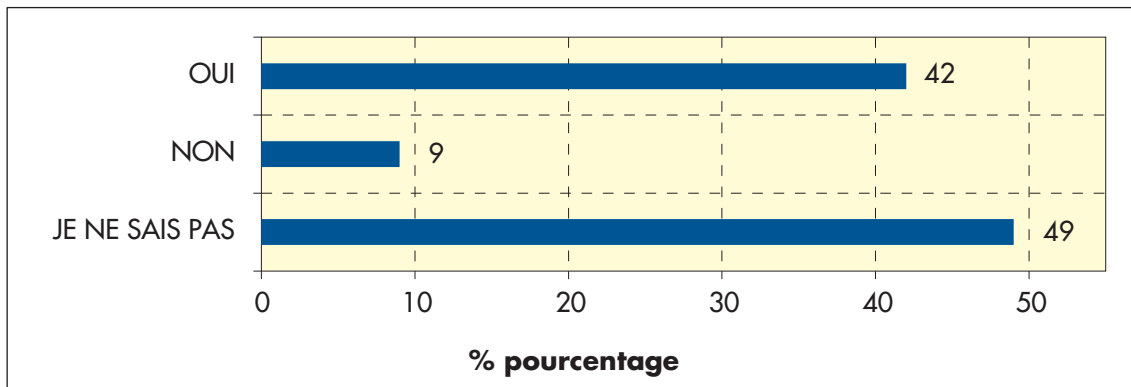
QUESTION 25. Quelle note attribuez-vous à la disponibilité de statistiques et d'informations dans votre pays (1 = très peu disponibles, 5 = très facilement disponibles) ?



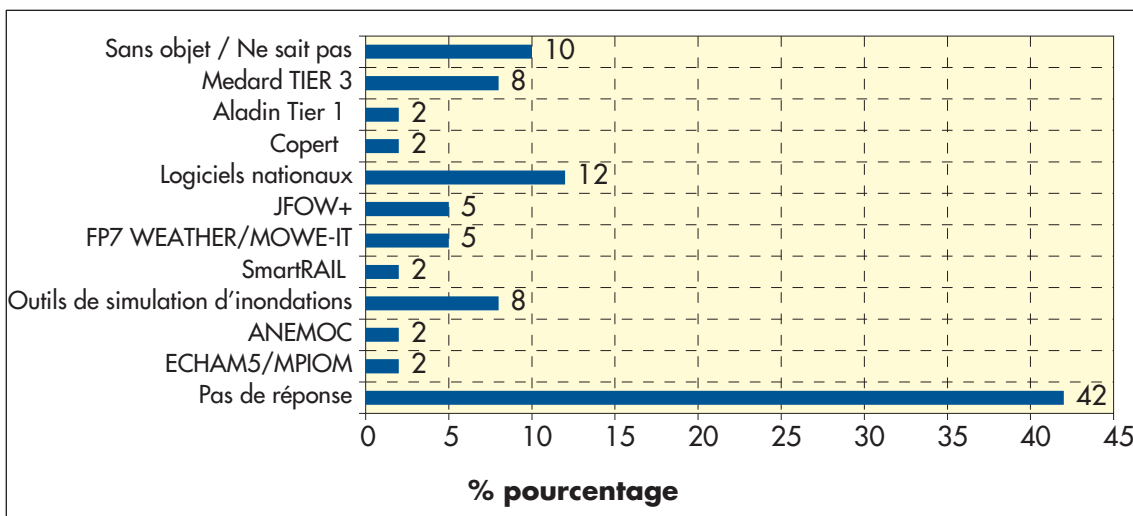
QUESTION 26. Quelle note attribuez-vous à la validité, la pertinence ou la qualité des statistiques et des informations dans votre pays (1 = très mauvaise, 5 = très bonne) ?



QUESTION 27. À votre connaissance, existe-t-il des modèles ou des outils informatiques permettant de prévoir les risques climatiques pour l'infrastructure des transports (par exemple la prévision des effets des ondes de tempêtes sur les ports ou des inondations sur les plaines) ?

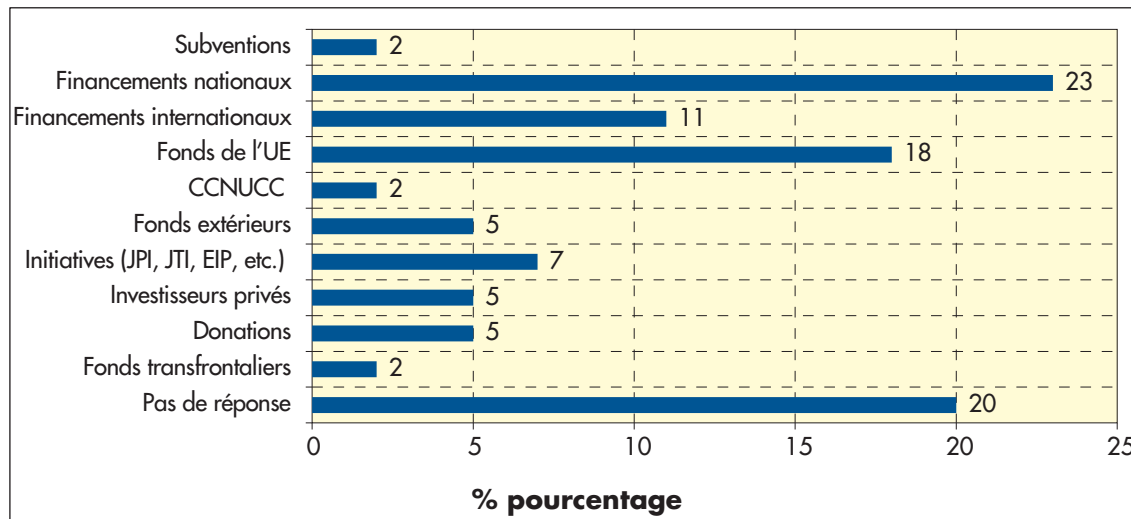


QUESTION 28. Le cas échéant, veuillez énumérer les modèles et/ou outils informatiques connus, à chaque niveau d'agrégation (méthodes de niveau 1, 2 ou 3 selon le GIEC : niveau 1, méthode la plus simple, statistiques sur l'activité disponibles dans tous les pays ; niveau 2 : facteur d'émission propre à la technique employée ; niveau 3 : méthode plus détaillée ou propre à chaque pays).

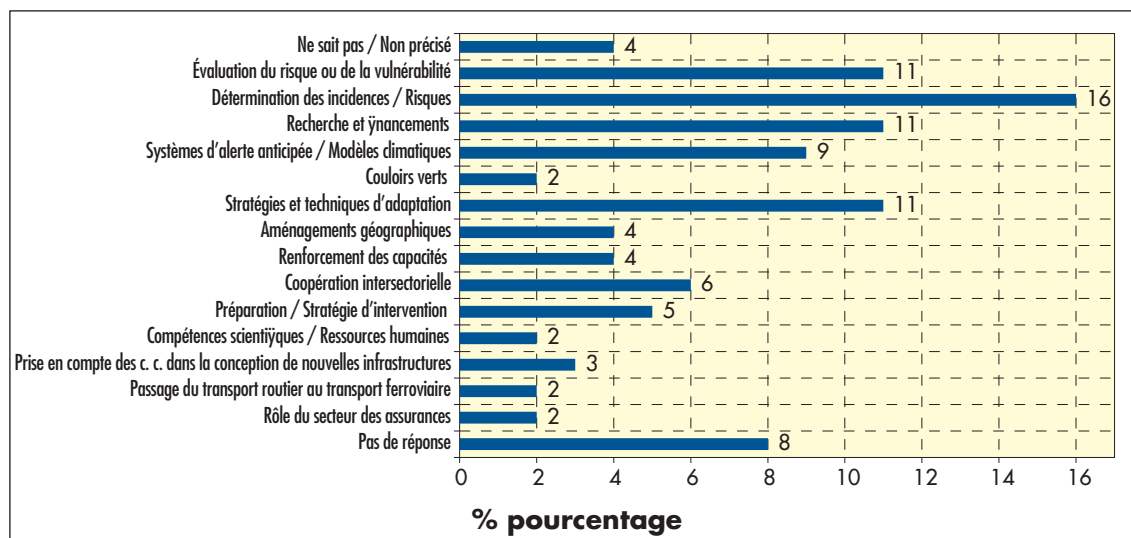


Effets des changements climatiques et adaptation à ces changements dans les réseaux de transport internationaux

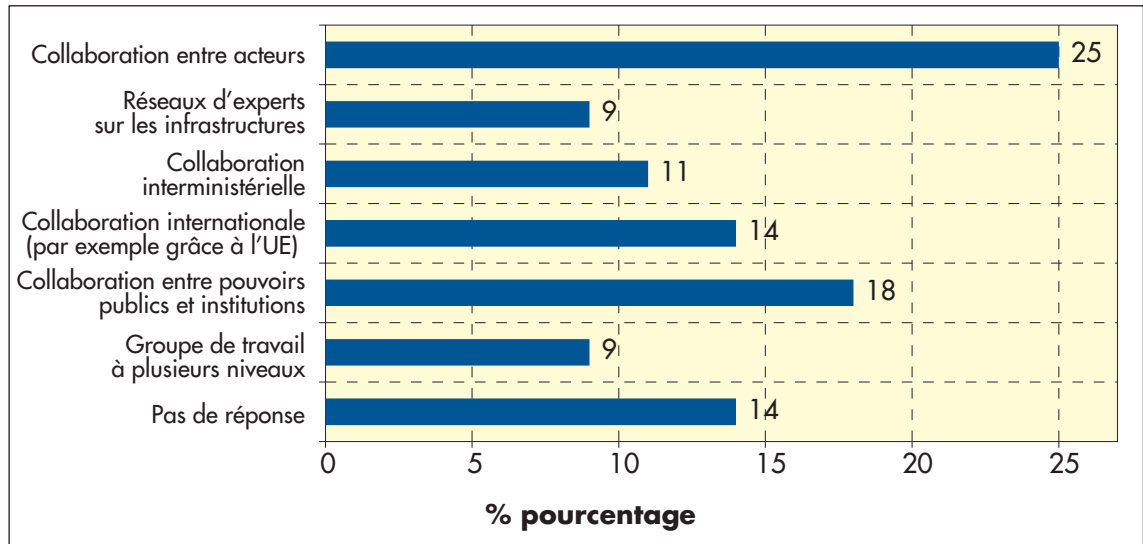
QUESTION 29. Quel(s) mécanisme(s) existant(s) ou prévu(s), pourrai(en)t financer de nouvelles mesures d'adaptation dans les transports (y compris des études d'impact) ?



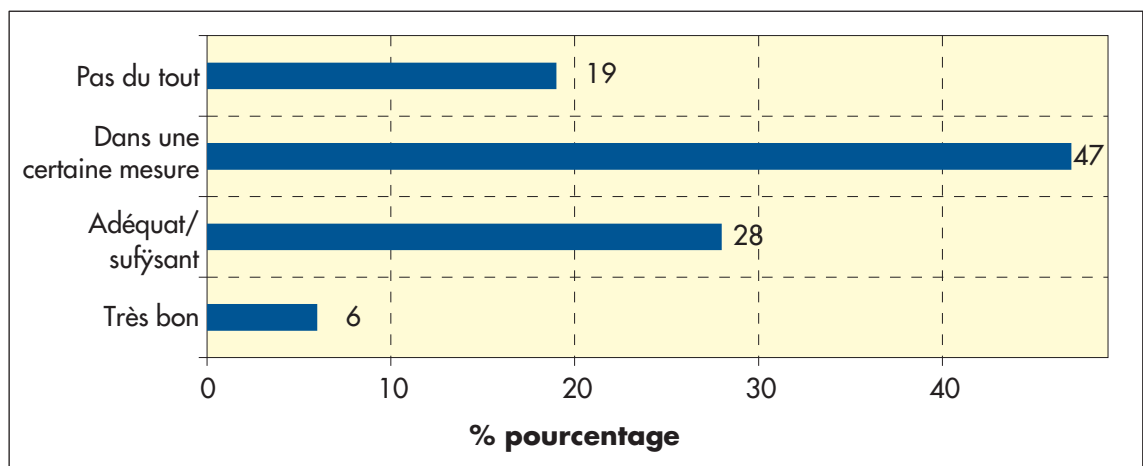
QUESTION 30. Globalement, précisez quels sont les domaines prioritaires précis qui doivent être suivis de plus près pour permettre la mise en œuvre de stratégies d'adaptation efficaces et adaptées à la situation locale



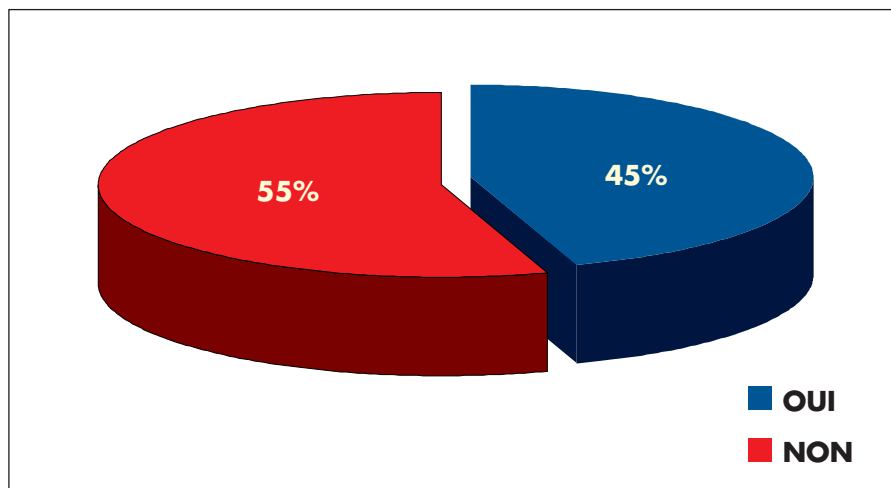
QUESTION 31. Quels sont les mécanismes existants ou prévus de collaboration que vous estimez les plus utiles pour permettre l'adaptation des transports aux changements climatiques ?
Merci de justifier brièvement vos réponses en précisant le type de collaboration ou de partenariat ou le type d'infrastructure, de service ou de fonctionnement auquel vous pensez.



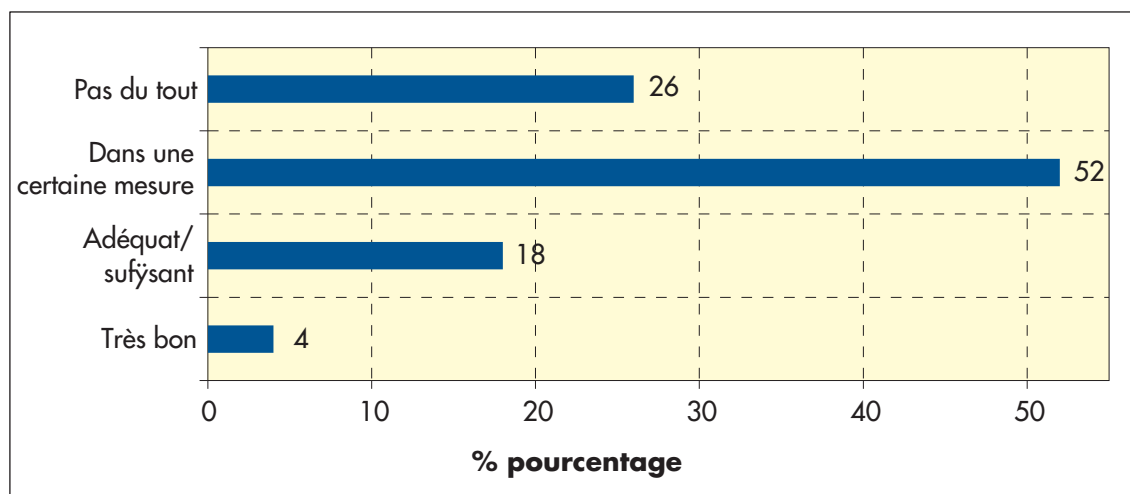
QUESTION 32. Estimez-vous que le degré actuel de collaboration nationale ou locale est adapté ou suffisant ?



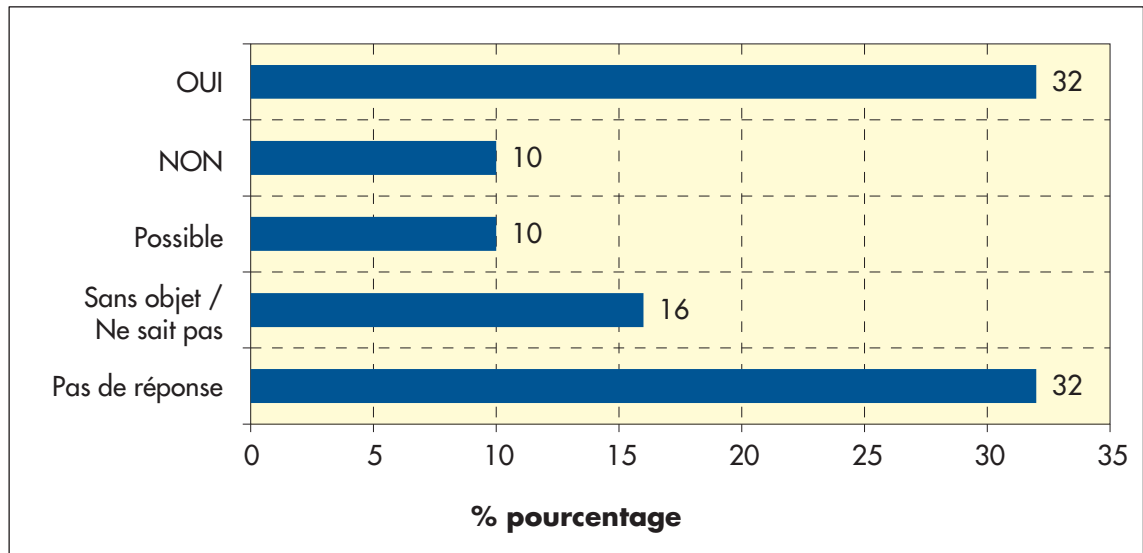
QUESTION 33. La coopération et l'échange d'informations à l'échelon régional ou sous-régional font-ils partie des pratiques en vigueur dans votre pays ? Si oui, quelle est la part de cette collaboration consacrée aux transports et comment se fait-elle ?



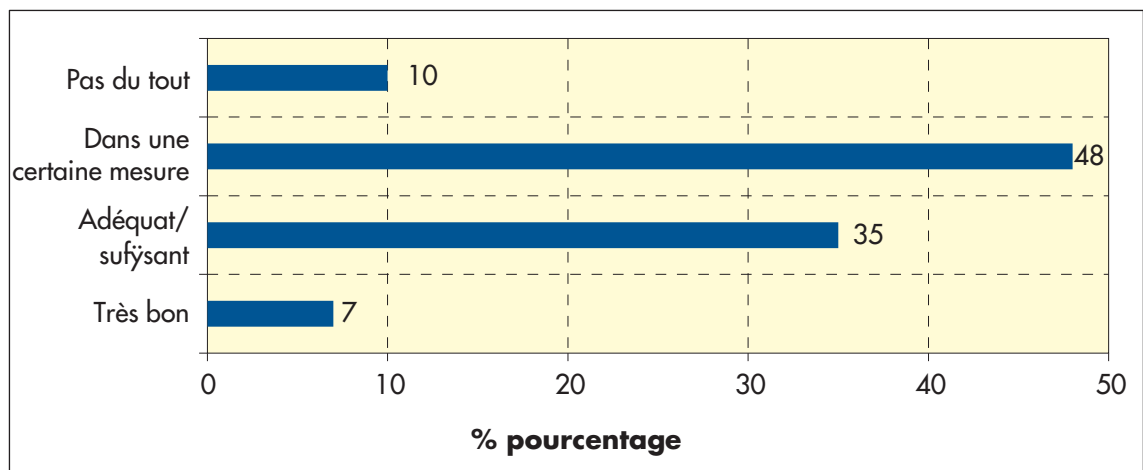
QUESTION 34. Le degré actuel de collaboration vous semble-t-il adéquat ou suffisant, à l'échelon régional ou sous-régional ?



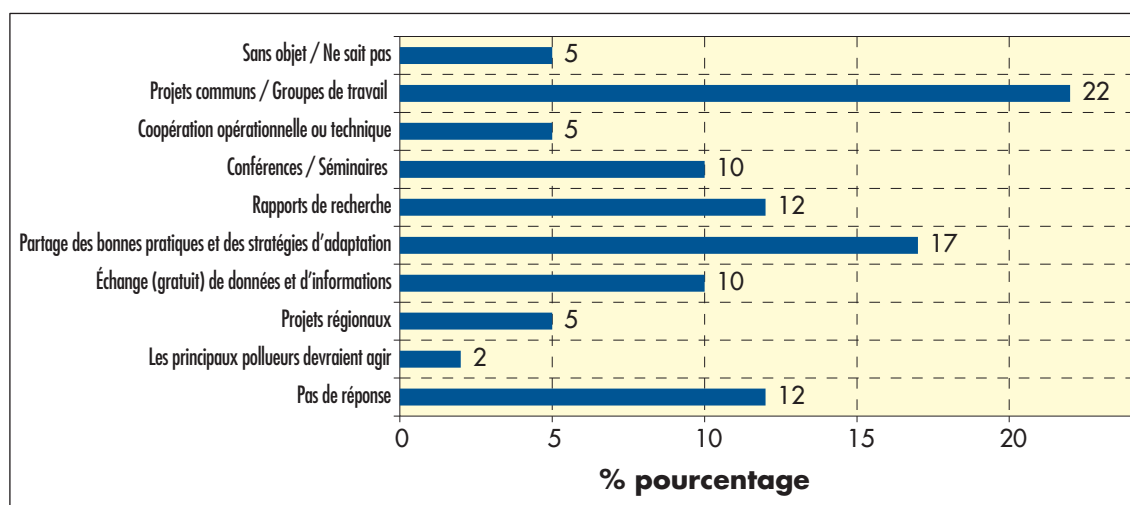
QUESTION 35. Pensez-vous qu'il faille envisager de modifier les accords existants dans la CEE sur les infrastructures (Accord européen sur les grandes routes de trafic international (AGR), Accord européen sur les grandes lignes internationales de chemin de fer (AGC), Accord européen sur les grandes voies navigables d'importance internationale (AGN), Accord européen sur les grandes lignes de transport international combiné et les installations connexes (AGTC)) dans le but de promouvoir ou de faciliter l'adaptation des réseaux de transport aux changements climatiques ?



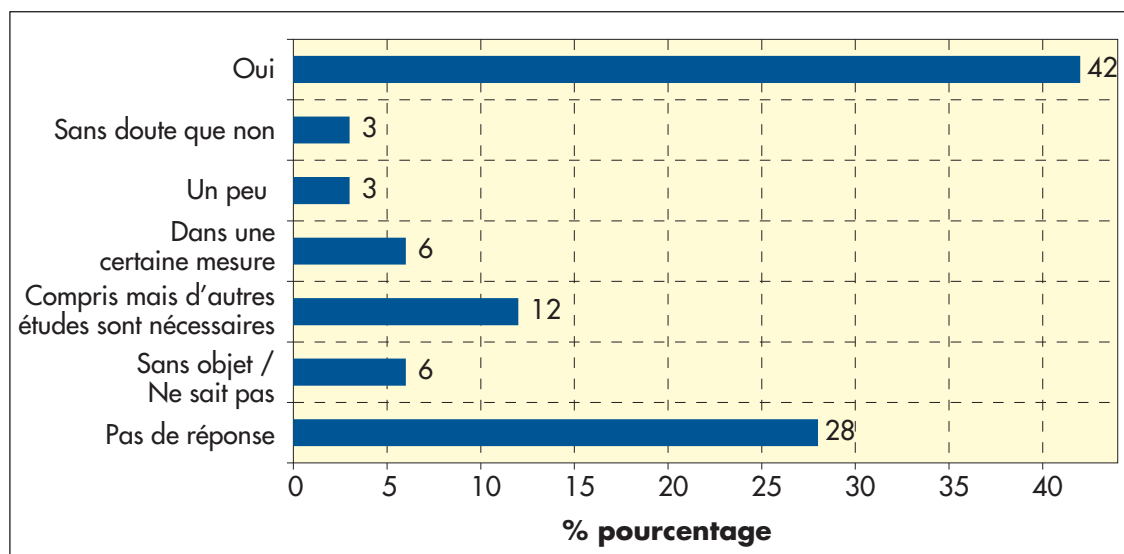
QUESTION 36. Estimez-vous le degré de coopération internationale adéquat ou suffisant ?



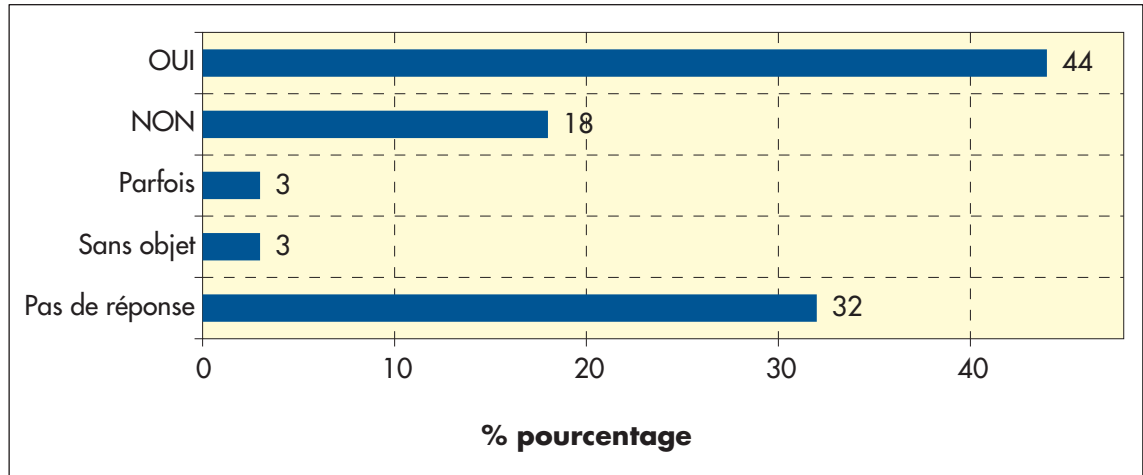
QUESTION 37. À votre avis, quel type de coopération internationale seraient utiles pour trouver des solutions d'adaptation aux changements climatiques ?



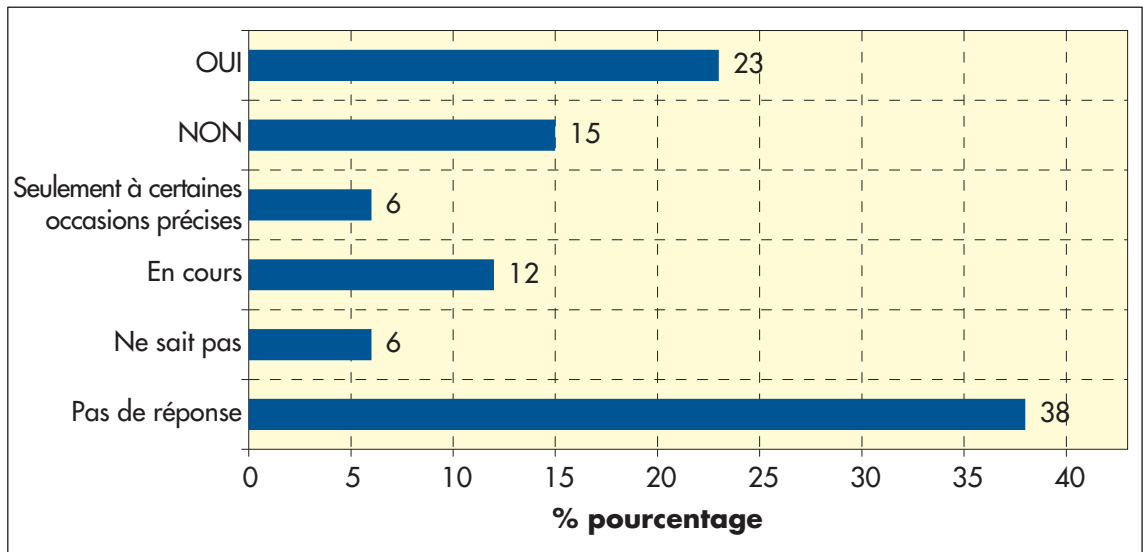
QUESTION 38. L'administration publique, l'entreprise ou l'organisation que vous représentez a-t-elle conscience de la vulnérabilité de l'infrastructure routière ou ferroviaire aux risques naturels (par exemple, ponts vulnérables en cas d'inondation) ?



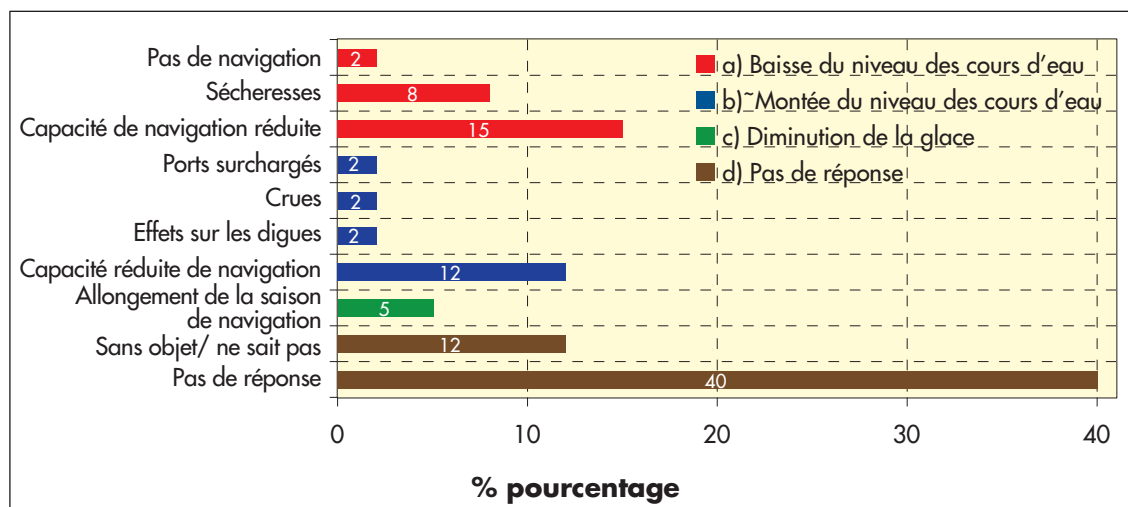
QUESTION 39. Si oui, des priorités ont-elle été établies, à savoir probabilité de survenue plus importante et effets du phénomène (par exemple quelle est la probabilité pour qu'un tronçon de chaussée ou de voie ferrée soit endommagé par une inondation et quelles en sont les conséquences ?)



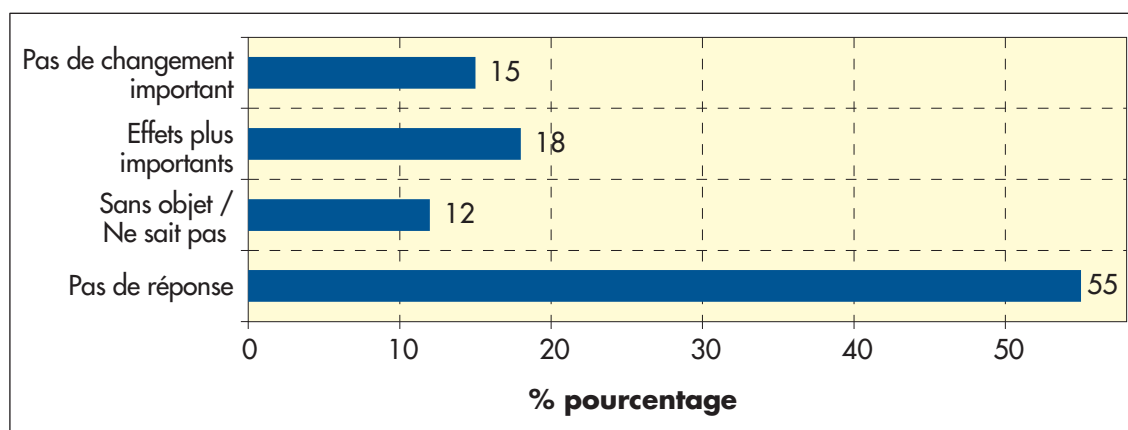
QUESTION 40. Un mécanisme d'évaluation a-t-il été mis en place pour évaluer le niveau de risque actuel ?



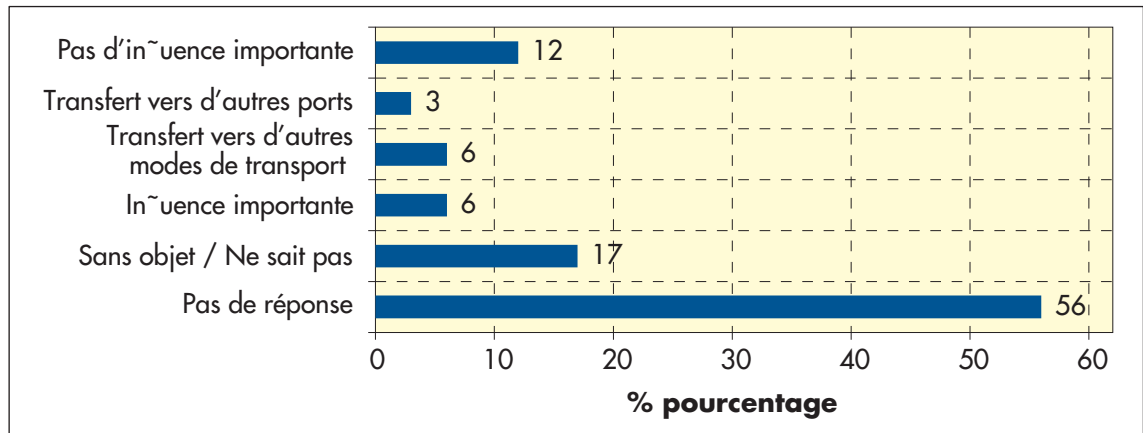
QUESTION 41. Quels sont, à votre avis, les effets des changements climatiques sur l'infrastructure du transport fluvial ?



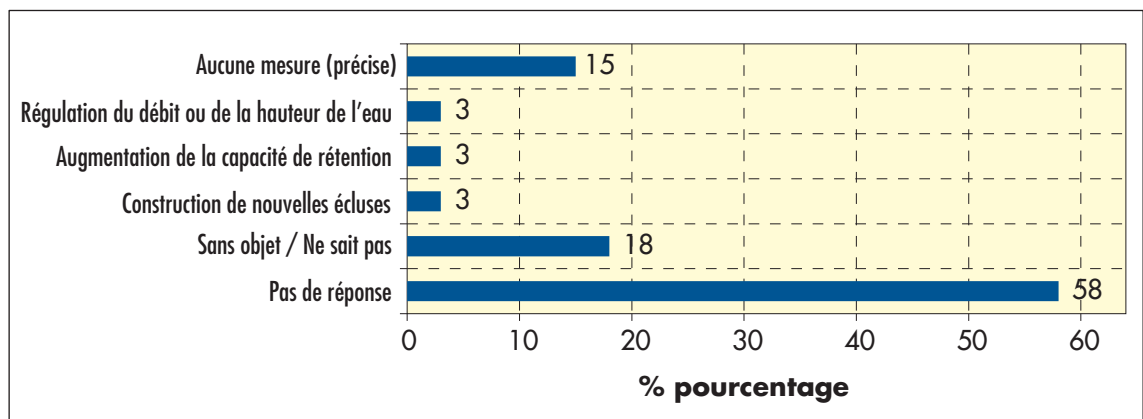
QUESTION 42. Quelle sera à votre avis l'ampleur de ces effets par rapport aux phénomènes climatiques existants (hautes et basses eaux saisonnières) ?



QUESTION 43. À votre avis, dans quel mesure les changements climatiques pourraient produire des effets sur la navigation fluviale et entraîner un transfert vers d'autres modes de transport ?



QUESTION 44. Quelles mesures avez-vous prévu ou adopté pour rendre les infrastructures et le transport fluvial résistants aux changements climatiques ?



Crédits photo: Pont ferroviaire de Putna Seaca (Roumanie) endommagé par des inondations en 2005 © Club Ferroviar (page 1 de couverture et pages XII, 56 et 110).
Gara de Nord, Bucarest, fortes chutes de neige et blizzard, janvier 2008 © Club Ferroviar. (p. 18, 54).
Inondations du Danube à Budapest (Hongrie) 2013, Internet (p. 126, 188, 200).
Ville de Baja, inondation du Danube, Hongrie, 2013. Photographie de M. Otto Michna (p. 99, 100).
Shutterstock (p. XX, XXII).

Effets des changements climatiques et adaptation à ces changements dans les réseaux de transport internationaux

L'une des nombreuses conséquences des changements climatiques est la sollicitation sans précédent des infrastructures, mais aussi la nécessité de remettre constamment en question les modalités de l'activité économique, mais aussi, tout simplement, nos modes de vie. Le présent rapport se penche sur les effets des changements climatiques dans le secteur des transports et décrit les mesures à prendre pour adapter les voies routières, ferroviaires, de navigation fluviale et les ports.

Les informations ayant servi à l'établissement du présent rapport ont été soigneusement analysées en vue d'identifier les composantes de l'infrastructure et des services de transport qui seront touchés. Pour dresser le tableau le plus actualisé possible de la situation, des initiatives nationales, des études de cas et des projets de recherche ont été passés en revue, tout comme des expériences sur les mesures d'adaptation de toute une série de modes de transports. Enfin, les meilleures pratiques suivies en matière de politiques nationales relatives à la gestion des risques et au renforcement de la résilience ont été analysées.

Selon les conclusions du rapport, les retombées sont différentes selon le mode de transport considéré. Ainsi, les infrastructures et les services de transport côtier, comme les ports et les installations de navigation côtière, risquent d'être gravement touchés par une élévation du niveau des mers, une hausse de la température de l'eau, une intensité accrue des tempêtes et des ondes de tempêtes, et des modifications éventuelles du régime des vagues.

Le réseau routier et ferroviaire, les gares ferroviaires et routières, ainsi que les installations portuaires risquent de pâtir de modifications dans le schéma des précipitations qui font varier le débit des cours d'eau. Ces phénomènes peuvent aussi avoir des conséquences sur l'intégrité structurelle et l'entretien des routes, des voies ferrées, des ponts, des tunnels, des systèmes d'évacuation des eaux pluviales, des télécommunications et des systèmes de gestion du trafic, qui nécessiteraient des travaux d'entretien et de réparation plus fréquents.

Par ailleurs, des vents extrêmement violents peuvent endommager et compliquer les opérations routières et ferroviaires, et provoquer des dégâts à certaines installations portuaires, comme les grues et les terminaux de chargement. Le secteur des transports peut aussi être affecté indirectement, en raison de la destruction des récoltes par le vent.

Les mesures d'adaptation décrites dans le présent rapport visent à réduire ces vulnérabilités et à accroître la résilience aux effets des changements climatiques. Selon notre analyse, qui fait l'objet du présent rapport, la logique d'anticipation de l'adaptation au changement climatique passe par une décision consciente d'investir dans l'élaboration et la mise en œuvre de plans et de stratégies d'adaptation. Cette solution sera difficile à mettre en œuvre, non seulement à cause de son coût, mais aussi parce qu'elle n'est pas facile à reproduire dans tous les contextes et qu'il ne s'agit pas d'une solution unique qui convient à toutes les situations.

Information Service
United Nations Economic Commission for Europe

Palais des Nations
CH - 1211 Geneva 10, Switzerland
Telephone: +41(0)22 917 44 44
Fax: +41(0)22 917 05 05
E-mail: info.ece@unece.org
Website: <http://www.unece.org>