



Commission économique pour l'Europe**Comité des transports intérieurs****Groupe de travail chargé d'examiner les tendances
et l'économie des transports****Groupe d'experts de l'évaluation des effets des changements climatiques
sur les transports intérieurs et de l'adaptation à ces changements****Vingtième-cinquième session**

Genève, 30 et 31 octobre 2023

Point 6 de l'ordre du jour provisoire

**Directives pour la prise en compte des changements climatiques
dans les processus de planification et les processus opérationnels****Protocole de test de résilience****Document soumis par la Vice-Présidente du Groupe d'experts
de l'évaluation des effets des changements climatiques
sur les transports intérieurs et de l'adaptation
à ces changements****I. Contexte**

1. Le présent document décrit dans les grandes lignes un protocole de test permettant d'évaluer de façon exhaustive la résilience des systèmes de transport. Il a été établi à la demande du Groupe d'experts de l'évaluation des effets des changements climatiques sur les transports intérieurs et de l'adaptation à ces changements (ci-après « le Groupe d'experts »). Les auteurs principaux sont B. T. Adey et H. Nasrazadani (Institut de gestion de la construction et des infrastructures, École polytechnique fédérale de Zürich). Les autres auteurs sont K. Chambers (Centre de recherche-développement en génie militaire, Corps du génie de l'armée des États-Unis), C. Walker (Centre national de recherche atmosphérique des États-Unis d'Amérique) et J. Dora (Climate Sense). Des contributions de fond ont été apportées par T. Popescu (Direction générale des infrastructures, des transports et des mobilités (France)), la Vice-Présidente du Groupe d'experts, J. Brooke (AIPCN), et L. Wyrowski (secrétariat de la Commission économique pour l'Europe (CEE)).
2. Le présent document est soumis par la Vice-Présidente du Groupe d'experts au nom de tous les auteurs pour examen et approbation par le Groupe d'experts.
3. Le présent document s'adresse aux acteurs du secteur des transports chargés de la planification, de l'analyse des risques et des processus décisionnels (décideurs, autorités du secteur, ingénieurs, consultants, etc.). L'objectif est que ces acteurs disposent d'une procédure normalisée d'estimation de la résilience de leurs systèmes, qui repose sur des approches tant qualitatives que quantitatives.



4. Le protocole met en lumière l'importance de la réduction des incertitudes et vise à aider les acteurs des transports à répertorier les composantes critiques des systèmes, les éventuelles mesures à prendre et les parties des systèmes qu'il convient d'analyser plus en détail. Il les aidera aussi à mieux cerner les vulnérabilités de leurs systèmes, à prendre des décisions en connaissance de cause et à élaborer des stratégies efficaces de renforcement de la résilience des réseaux de transport dans leur ensemble.

5. Le présent document se veut complémentaire d'autres normes et orientations relatives à l'évaluation des risques que les changements climatiques font peser sur les systèmes de transport, à l'évaluation de la résilience de ces systèmes et à leur adaptation, notamment des normes ISO 14090 (ISO, 2019), ISO14091 (ISO, 2021) et BS 8631 (BSI, 2021), du cadre Rail Adapt de l'UIC¹ (UIC, 2017), du cadre international de l'AIPCR pour l'adaptation des infrastructures routières aux changements climatiques (AIPCR, 2015) et du document d'orientation de l'AIPCN sur la planification de l'adaptation des ports et des voies de navigation intérieure aux changements climatiques (EnviCom WG 178).

II. Protocole de test de résilience

A. Introduction

6. Le présent document, qui fait fond sur l'article d'Adey *et al.* (2016), trace la voie à suivre pour concevoir et conduire un ou plusieurs tests de résilience d'un système de transport. Le transport de marchandises et de personnes est un élément essentiel du bon fonctionnement d'une société, et les infrastructures de transport sont conçues de manière à garantir un certain niveau de service.

7. Les interruptions de service causées par des événements perturbateurs, par exemple par des phénomènes naturels (inondations, fortes chutes de neige, etc.), peuvent avoir de lourdes conséquences sociétales (sect. II.B). Aussi les autorités doivent-elles gérer les infrastructures de transport de manière à limiter autant que possible les répercussions des phénomènes extrêmes, en prenant en considération les ressources disponibles et le potentiel retour sur investissement. Le protocole (sect. II.C et II.D) explique comment un test de résilience peut aider les autorités à déterminer si un programme d'intervention est nécessaire pour garantir que les infrastructures de transport continuent d'offrir un niveau de service acceptable en cas de phénomène climatique.

8. Des études de cas (sect. II.E) illustrent l'utilisation du protocole dans des conditions réelles (réseaux routiers et ferroviaires).

9. Un test de résilience peut s'inscrire dans le cadre d'une évaluation destinée à recenser les impacts des changements climatiques aux fins de l'élaboration d'un plan d'adaptation, ou à mesurer d'autres risques. La norme ISO 14090:2019 (« Adaptation au changement climatique – Principes, exigences et lignes directrices ») est la norme de référence dans le domaine de la planification de l'adaptation. Elle prévoit que les différents impacts des changements climatiques soient évalués, puis classés par ordre de priorité, et que des plans d'action soient ensuite établis pour y remédier (ISO, 2019). Elle n'impose toutefois pas d'étude d'impact d'un type particulier : il peut s'agir d'une évaluation des risques, d'une évaluation des vulnérabilités ou d'une analyse de seuil.

10. Les tests de résilience servent à évaluer la résilience d'un système de transport dans une situation particulière, c'est-à-dire à déterminer si le système pourra assurer le niveau de service prévu dans cette situation.

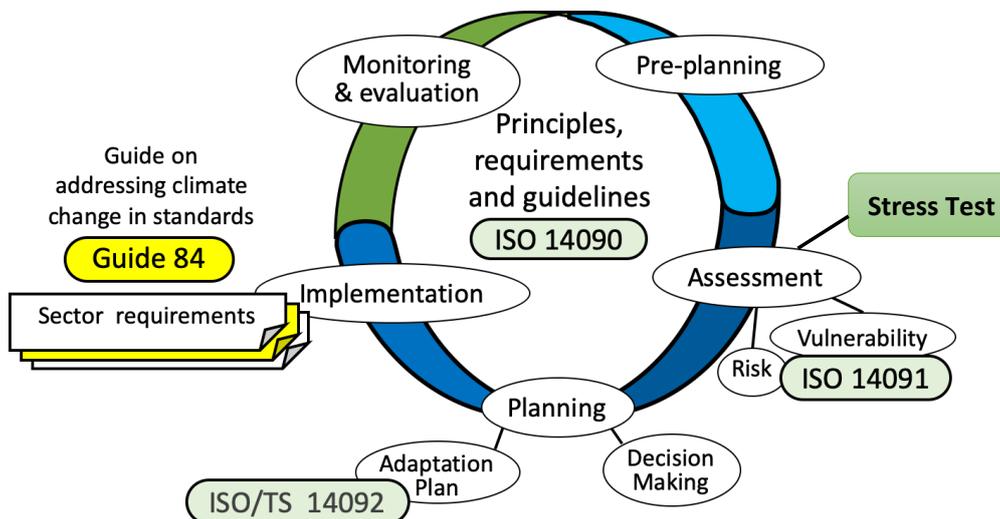
11. Les tests de résilience sont un type d'étude d'impact, et sont donc conformes aux exigences de la norme ISO 14090 (voir la figure I). Ils complètent l'analyse des vulnérabilités et des risques en évaluant la capacité des infrastructures à résister à des conditions extrêmes. Tandis que les évaluations des vulnérabilités et des risques permettent de détecter de potentielles failles sur la base d'aléas connus et de données historiques, les tests de résilience

¹ Union internationale des chemins de fer.

simulent des situations réelles (phénomènes extrêmes, pics de trafic, défaillances inattendues, etc.), mettant au jour des vulnérabilités et des faiblesses qu'une évaluation conventionnelle ne permettrait peut-être pas de repérer. En mettant un réseau en situation de tension et en évaluant les effets d'une telle tension sur le niveau de service, c'est-à-dire ses répercussions sur les activités humaines, les gestionnaires du réseau peuvent évaluer sa résilience, repérer ses principaux points faibles et établir des stratégies d'adaptation en vue d'accroître sa résilience.

Figure I

Vue d'ensemble schématique des normes ISO et de la procédure de test de résilience [d'après la norme ISO 14090 (ISO, 2019)]



12. Un test de résilience peut contribuer utilement à l'établissement d'un plan d'adaptation prenant en compte de nombreux effets que les changements climatiques sont susceptibles d'avoir sur un système de transport. Il peut être mené soit à un stade précoce de l'élaboration d'un nouveau plan, soit dans le cadre du renforcement d'un plan existant. Une approche intégrée de l'adaptation est le gage de systèmes de transport plus robustes et plus résilients face aux changements climatiques, qui continuent de fonctionner de façon efficace et sûre malgré les aléas climatiques.

B. Phénomènes climatiques

1. Les effets des changements climatiques : un problème à traiter dès aujourd'hui

13. Nous sommes en proie à une crise climatique d'ampleur mondiale, qui menace de compromettre la capacité des populations à bénéficier, dans des conditions d'égalité, de services de transport sûrs, fiables et accessibles. L'adaptation aux effets futurs des changements climatiques est un problème que nous ne pouvons ignorer plus longtemps et devons prendre à bras le corps dès aujourd'hui. D'après le *Global Risks Report* du Forum économique mondial, l'inaction face aux phénomènes climatiques extrêmes et aux changements climatiques est, à court et à moyen terme, l'une des principales menaces auxquelles le monde est confronté (WEF, 2019). Les effets des risques climatiques se font d'ores et déjà sentir, et nous avons une occasion unique de comprendre ces risques et de nous y préparer pour atténuer au maximum les répercussions que les changements climatiques auront sur les populations.

14. Dans son dernier rapport d'évaluation (GIEC AR6, 2022), le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) fait observer que l'accroissement de la fréquence et de l'intensité des phénomènes climatiques et météorologiques a des répercussions multiples et généralisées sur les systèmes humains et écologiques. Dans ce même rapport, il distingue les effets des changements climatiques et les risques climatiques : d'ores et déjà observables ; à court terme (2021-2040) ; à moyen terme (2041-2060) ; à long terme (2061-2100). L'ampleur et le rythme d'apparition des effets classés dans ces différentes catégories dépendront des mesures d'atténuation et d'adaptation prises à court

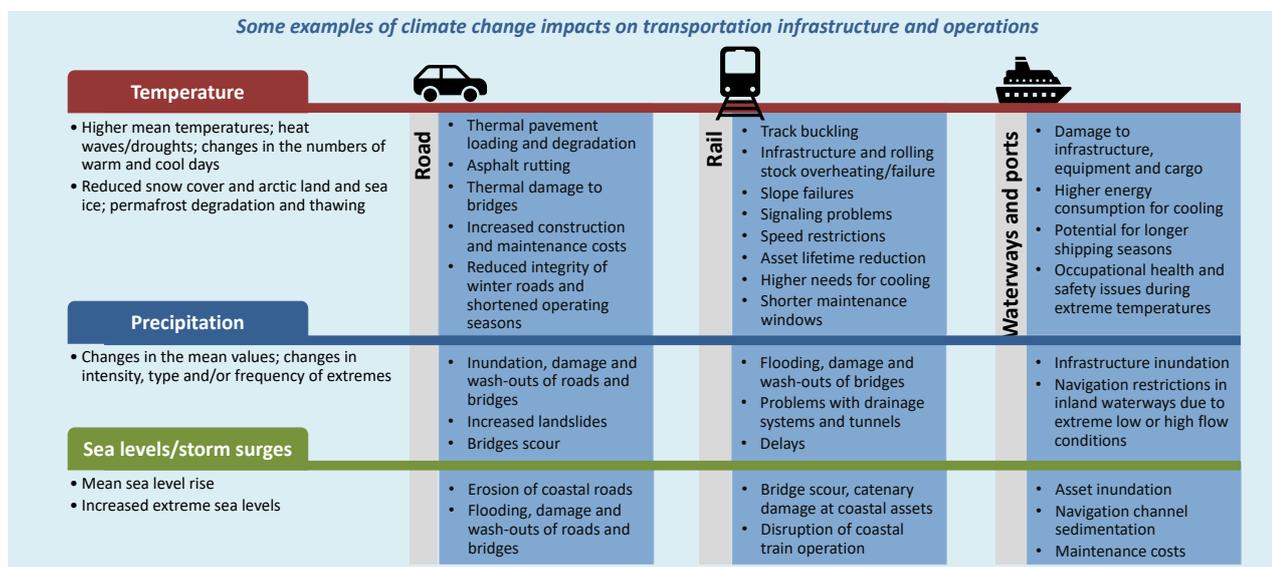
terme pour réduire les émissions, c'est-à-dire des profils représentatifs d'évolution de concentration (GIEC AR6, 2022). Quelles que soient les mesures prises, les changements climatiques entraîneront des pertes et préjudices, en particulier dans les petits États insulaires et les mégapoles situées dans des zones côtières de faible élévation (Monioudi *et al.*, 2018 ; Storlazzi *et al.*, 2018).

15. Les conclusions de la quatrième évaluation climatique nationale (*Fourth National Climate Assessment*) du U.S. Global Change Research Program sont analogues à celles du sixième rapport d'évaluation du GIEC, les auteurs mentionnant que des milliers d'études ont mis en évidence les changements à l'œuvre à l'échelle planétaire : hausse des températures de l'atmosphère, de la surface de la Terre et des océans, fonte des glaces de mer et des glaciers, élévation du niveau de la mer, acidification des océans et augmentation des concentrations de vapeur d'eau (USGCRP, 2018). Ces changements peuvent être répartis en deux catégories selon les effets qu'ils ont sur la fonction attendue d'un système (services de transport sûrs et efficaces, par exemple). La première catégorie englobe les évolutions chroniques et pérennes de la situation météorologique, qui mettent le système considéré sous tension et l'amènent à exercer sa fonction attendue dans des conditions durablement altérées. Il peut s'agir d'aléas climatiques tels que l'altération du régime des précipitations, la hausse des températures, la sédimentation, l'élévation du niveau de la mer ou l'érosion du littoral. La deuxième catégorie correspond aux chocs épisodiques qu'un système est amené à subir et doit absorber pour revenir à un fonctionnement normal. Ces facteurs de tension plus ponctuels ont souvent de profonds effets au niveau régional, qui peuvent être difficiles à résorber et entraîner des changements durables. On peut citer les phénomènes extrêmes les plus connus, tels que les inondations fluviales, les glissements de terrain, les coulées de débris, les tempêtes de glace, les tempêtes côtières, les incendies de forêt, les épisodes de sécheresse et les températures extrêmes.

2. Les effets des changements climatiques sur les secteurs des transports

16. Les secteurs des transports reposent sur des systèmes d'infrastructures complexes et pérennes, qui peuvent avoir besoin de plusieurs années pour s'adapter à des facteurs de tension et à des perturbations (Vajjarapu *et al.*, 2020). Leurs vulnérabilités climatiques peuvent être caractérisées de plusieurs manières. Les perturbations dites « directes » sont les perturbations subies par les infrastructures de transport elles-mêmes ; la plupart des travaux de recherche sur les vulnérabilités des systèmes de transport y sont consacrés. La figure II montre des exemples d'effets que les changements climatiques peuvent avoir sur les infrastructures et les services de transport. On trouvera des explications plus détaillées sur les perturbations propres à certains secteurs dans les sections suivantes.

Figure II
Exemples d'effets que les changements climatiques peuvent avoir sur les infrastructures et les services de transport (CEE, 2020)



17. Au-delà des perturbations directes, Markolf *et al.* (2019) ont mis en évidence la nécessité de cerner les perturbations indirectes que peuvent engendrer les changements climatiques afin de mesurer toute la complexité des systèmes de transport et des autres systèmes d'infrastructures critiques (énergie, eau, combustibles, communications, communautés, etc.). Les systèmes de transport ne fonctionnent pas en vase clos, ils sont étroitement liés à d'autres systèmes, et il faut tenir compte de cette interconnexion pour pouvoir définir des mesures d'adaptation efficaces. Si une route ou une voie ferrée menant à un port est inondée, par exemple, la circulation des biens, des services et des personnes dans le port est entravée. La résilience fonctionnelle du port est amoindrie même si ses infrastructures sont intactes. On trouvera dans les sections suivantes des informations sur les perturbations, notamment indirectes, que les changements climatiques provoquent dans différents secteurs des transports.

a) Routes

18. Dans les régions polaires, des défaillances structurelles des systèmes de transport routier sont à prévoir en raison du dégel du pergélisol et de l'érosion causée par le réchauffement des océans, les ondes de tempête et la fonte des glaces de mer (GIEC – Melvin *et al.*, 2017 ; Fang *et al.*, 2018 ; GIEC, « Cross-Chapter Paper 6 »). Les inondations liées aux changements climatiques pourraient faire doubler le nombre de retards et de trajets perdus dans la zone métropolitaine de Boston à l'horizon 2100 (Suarez *et al.*, 2005). Au Ghana, le coût médian des effets des changements climatiques sur les routes asphaltées du pays s'élèvera à 473,72 millions de dollars d'ici à 2100 si aucune mesure d'adaptation n'est prise (Twerefou *et al.*, 2014). Au Mexique, le coût des dégâts occasionnés aux routes principales du pays par les effets des changements climatiques pourrait être situé entre 1,3 milliard et 4,9 milliards de dollars (Espinet *et al.*, 2016). En France, on estime que la réparation des dégâts causés aux routes par les effets des changements climatiques coûtera 22 milliards d'euros entre 2020 et 2050 (Carbone 4, 2021). Dans son plan d'action climatique en faveur de la résilience (*Climate Action Plan for Resilience*), le Département des transports des États-Unis énumère les principales répercussions que les changements climatiques pourraient avoir sur les systèmes de transport routier :

- Augmentation de la fréquence et de la sévérité des inondations de tunnels souterrains et d'infrastructures de faible élévation qui nécessitent des opérations de drainage et de pompage ;
- Accentuation du phénomène de dilatation thermique des surfaces asphaltées en raison de l'élévation des températures et de l'accroissement de la durée des vagues de chaleur, avec pour conséquences potentielles une détérioration de l'état des routes et une diminution de leur durée de vie ;
- Hausse des coûts de maintenance et de construction des routes et des ponts du fait de l'élévation des températures et de l'exposition accrue de ces infrastructures ;
- Dégradation de l'asphalte sous l'effet de la hausse des températures, avec pour conséquences des remplacements plus fréquents, et donc davantage de restrictions d'accès, des embouteillages et des coûts de maintenance des routes plus élevés ;
- Endommagement des ponceaux et des infrastructures de drainage du fait de l'intensification des précipitations et de la précocité de la fonte des neiges ;
- Augmentation du risque d'accidents de la circulation en cas de phénomène météorologique extrême.

b) Chemins de fer

19. Les chemins de fer sont un bien mondial. Selon les estimations, la longueur totale des chemins de fer classiques s'élevait à environ 1 060 000 kilomètres de lignes en 2018 (AIE, 2023). Une grande partie des voies ferrées et des infrastructures connexes ayant été construites il y a plus de cent cinquante ans, leur bon fonctionnement en cas de phénomène météorologique extrême n'est pas garanti (Palin *et al.*, 2021). Aux États-Unis, les retards et les dégâts causés par la chaleur pourraient coûter jusqu'à 60 milliards de dollars d'ici à 2100 si aucun changement n'est apporté au régime de gestion des actifs ferroviaires (Chinowsky

et al., 2019). En outre, l'élévation du niveau de la mer, les ondes de tempête et les inondations côtières pourraient entraîner des pertes économiques et des perturbations supplémentaires (Neumann *et al.*, 2021). Ces perturbations auront des répercussions en cascade sur les chaînes d'approvisionnement mondiales et les réseaux de transport de marchandises, en plus de restreindre la mobilité des navetteurs et l'accessibilité de certaines localités, Palin *et al.* (2021) ont recensé les perturbations suivantes :

- Pannes des systèmes, déraillements et allongement des temps de parcours en raison de la déformation des rails et de leur dilatation thermique les jours de grande chaleur ;
- Endommagement des lignes aériennes, chutes de pierres, givrage et casse dus aux basses températures et aux cycles de gel/dégel ;
- Glissements de terrain, inondations, endommagement d'équipements électroniques et affouillement des ponts à cause des inondations et des glissements de terrain ;
- Endommagement d'infrastructures construites sur des terrains en pente et désalignement de voies et de poteaux en raison de la sécheresse et du compactage ou de l'assèchement des sols ;
- Affouillements et dégâts structurels dus aux inondations côtières et aux vagues.

20. Sur la côte est des États-Unis, 3 800 km de routes et de voies ferrées pourraient être inondés de manière temporaire ou permanente si le niveau de la mer s'élevait de 58 cm (Wright et Hogan, 2008). En Europe, les coûts associés au gondolage des chaussées, conséquence du stress thermique, des inondations côtières et fluviales, des vents de tempête et des incendies de forêt, pourraient être multipliés par dix (Forzieri *et al.*, 2018). La situation est d'autant plus préoccupante que de nombreux réseaux routiers et ferroviaires sont d'ores et déjà fortement détériorés (Neumann *et al.*, 2021).

c) Ports et voies de navigation intérieure

21. Les infrastructures portuaires et les voies de navigation intérieure sont très vulnérables à de nombreuses tensions et perturbations liées aux changements climatiques parce qu'elles sont situées dans des zones de faible élévation, à proximité des côtes et dans des plaines fluviales, parce que les opérations régionales sont hautement rationalisées, optimisées et singulières, et parce que tout retard ou accident a de lourdes répercussions, parfois en cascade, sur les chaînes d'approvisionnement (AIPCN, 2020A). Christodoulou et Demirel (2018) ont constaté que jusqu'à 60 % des ports maritimes de l'Union européenne risquaient d'être inondés à l'horizon 2100 si le niveau de la mer s'élevait d'un mètre (scénario le plus pessimiste). Les infrastructures portuaires et les voies de navigation intérieure sont des éléments clés du commerce mondial, puisque 11 milliards de tonnes de marchandises sont acheminées par la mer (80 % des marchandises échangées au niveau mondial), et elles sont particulièrement cruciales pour les pays en développement, qui représentent 61 % du volume total du commerce maritime (CNUCED, 2022). Si aucune mesure d'adaptation n'est prise, l'élévation du niveau de la mer et l'intensification des tempêtes pourraient, selon les estimations, entraîner des coûts supplémentaires de 25 milliards de dollars par an pour le secteur du transport maritime d'ici à 2100, un montant supérieur aux bénéfices d'exploitation enregistrés ces dernières années (Van Houtven *et al.*, 2022). Dans le cadre de son initiative Navigating a Changing Climate, l'Association mondiale pour les infrastructures de transport maritimes et fluviales (AIPCN) a recensé diverses répercussions que les changements climatiques étaient susceptibles d'avoir sur les activités du secteur, depuis la zone de navigation jusqu'à l'arrière-pays en passant par les usines de transformation et de fabrication (AIPCN, 2020B) :

- Interruption des opérations portuaires et endommagement d'infrastructures à cause de la saturation des systèmes de drainage ou du niveau élevé des nappes phréatiques ;
- Inondation de terminaux ou submersion de digues en raison de débits fluviaux élevés ou d'ondes de tempête ;
- Perturbations de la navigation en raison de débits fluviaux élevés ou de fortes houles (mer agitée, vagues extrêmes, etc.) ;

- Fermeture de canaux ou imposition de restrictions de tirant d'eau en raison de débits fluviaux faibles ou d'épisodes de sécheresse ;
- Imposition de restrictions de tirant d'eau ou augmentation du coût des opérations de dragage en raison du charriage et de l'accumulation de sédiments ou de débris et de l'érosion ;
- Ralentissement ou limitation des opérations portuaires pour cause de mauvaise visibilité (brouillard, neige ou autres précipitations) ;
- Dégradation ou corrosion excessive d'infrastructures en raison de changements dans la composition chimique de l'eau ;
- Perturbations de la navigation et des opérations portuaires du fait de changements dans le régime des vents (vitesse, force, direction et durée) ;
- Exposition des employés, des infrastructures et des marchandises à des conditions extrêmes de chaleur, d'humidité ou de froid ;
- Accroissement des exigences opérationnelles et des exigences de maintenance du fait de changements écosystémiques (croissance de la végétation, migration d'espèces, espèces envahissantes, etc.).

d) Aéroports

22. Le transport aérien est vulnérable aux phénomènes météorologiques, même de courte durée, qui provoquent des annulations ou retards importants et généralisés (Ryley *et al.*, 2020). Les effets des changements climatiques les plus susceptibles de nuire directement au transport aérien sont l'évolution des précipitations, des températures et du régime des vents, les phénomènes météorologiques extrêmes et l'élévation du niveau de la mer (Burbidge, 2018). De nombreux aéroports ne sont que 10 à 20 pieds au-dessus du niveau moyen de la mer et quelques-uns sont en dessous, comme l'aéroport de Schiphol (Amsterdam) et l'aéroport Louis Armstrong (La Nouvelle-Orléans) (Budd et Ryley, 2012). Leur nombre pourrait augmenter considérablement en fonction du rythme de l'élévation du niveau de la mer. Selon une étude, 100 aéroports seront sous le niveau de la mer en 2100 si le réchauffement de la planète atteint 2° C. Un grand nombre d'aéroports sont menacés en Europe, en Amérique du Nord et en Océanie, mais c'est en Asie du Sud-Est et de l'Est que les risques sont les plus élevés (Yesudian et Dawson, 2021). La même étude a mis en évidence un autre problème commun à de nombreux systèmes de transport : les petits aéroports côtiers n'auront vraisemblablement pas accès au financement de l'adaptation dans des conditions d'égalité avec les autres. Les conséquences pourraient être dévastatrices pour les îles de faible élévation où le transport aérien est un impératif à la fois économique, social et médical (Yesudian et Dawson, 2021). Jusqu'à présent, les débats sur les changements climatiques ont principalement porté sur l'atténuation, mais l'adaptation suscite de plus en plus d'attention (Ryley *et al.*, 2020). En 2018, 86 % des acteurs sondés dans le cadre d'une enquête de l'Organisation européenne pour la sécurité de la navigation aérienne ont déclaré que l'adaptation aux changements climatiques serait essentielle à la pérennité du secteur de l'aviation (Burbidge, 2018). Le Département des transports des États-Unis (USDOT, 2022) et d'autres ont répertorié plusieurs risques supplémentaires que les changements climatiques faisaient peser sur le secteur aérien, dont les suivants :

- Perturbations du trafic aérien en raison de phénomènes météorologiques extrêmes, notamment de fortes précipitations, qui retardent les départs et les arrivées, voire nécessitent l'annulation de vols, parfois pendant de longues périodes ;
- Diminution des performances des aéronefs (charge et autonomie) en raison de l'augmentation des températures ;
- Complexification des décollages et des atterrissages du fait de changements dans le régime des vents (direction et force) et de l'augmentation des températures ;
- Multiplication des turbulences et modification de la durée des voyages en raison de l'altération du régime des vents ;

- Réduction de la capacité d'accueil des aéroports et perturbations du réseau en raison de l'élévation du niveau de la mer.

C. Les tests de résilience : un moyen pour les autorités de déterminer si un programme d'intervention est nécessaire pour garantir que les infrastructures de transport continuent d'offrir un niveau de service acceptable en cas de phénomène climatique

23. Pour réduire autant que possible et au moindre coût les répercussions que les phénomènes extrêmes sont susceptibles d'avoir sur les services de transport et donc sur les activités humaines, les gestionnaires d'infrastructures de transport doivent :

a) Avoir une idée précise de l'ensemble des services fournis par l'infrastructure considérée et de sa résilience face aux aléas naturels potentiellement perturbateurs ;

b) Savoir comment renforcer la résilience d'un système de transport pour remédier à une interruption de service consécutive à un aléa et assurer le niveau de service prévu pendant et après un phénomène extrême. En d'autres termes, ils doivent définir des objectifs de résilience.

24. Le protocole ici présenté décrit les étapes à suivre pour mesurer, à l'aune d'objectifs de résilience, la capacité d'un système de transport à continuer de fournir un service ou un ensemble de services en cas d'aléa. L'objectif est de mettre en évidence les problèmes de résilience et leurs causes, et de déterminer les mesures les plus rationnelles à prendre pour que la résilience du système atteigne un niveau acceptable.

25. Les étapes doivent être réalisées de manière itérative, d'un niveau général à un niveau de détail de plus en plus grand le cas échéant, étant entendu que des évaluations quantitatives plus détaillées nécessitent plus de temps et potentiellement une puissance de calcul plus élevée. Des tests de résilience sont effectués à chaque itération.

26. Un test de résilience consiste à tester un ou plusieurs scénarios hypothétiques, conçus pour déterminer si un système de transport peut continuer d'assurer un niveau de service suffisant lorsque surviennent un ou plusieurs événements potentiellement perturbateurs. Les scénarios peuvent être construits en supposant que toutes les composantes du système fonctionnent normalement, ou qu'une ou plusieurs composantes fonctionnent dans des conditions sous-optimales. Si un test de résilience vise à vérifier qu'un système de transport régional peut assurer un niveau de service satisfaisant s'il se produit, au cours de l'année civile à venir, un événement pluviométrique tel qu'il n'en survient que tous les cinq cents ans, par exemple, ce test peut être effectué en considérant que le système fonctionne comme prévu, ou en faisant une ou plusieurs des suppositions suivantes :

a) Les profondeurs d'affouillement sont supérieures de [25 %] aux profondeurs considérées comme typiques en cas d'inondation ;

b) Les mécanismes de protection contre les crues peuvent retenir un volume d'eau inférieur de [25 %] au volume qu'ils ont été conçus pour retenir ;

c) Le nombre de travailleurs disponibles pour remettre en état l'infrastructure endommagée est inférieur de [25 %] au nombre généralement prévu pour une telle situation ;

d) Le taux d'utilisation de l'infrastructure pendant ou après l'événement est supérieur de [25 %] à ce qu'il devrait normalement être dans cette situation.

27. Le niveau de résilience considéré comme acceptable varie d'une situation à l'autre. Il dépend :

- Des normes relatives au risque individuel et au risque sociétal, le risque individuel correspondant à la répartition du risque entre les personnes potentiellement touchées, et le risque sociétal à la relation entre le nombre de personnes subissant un préjudice donné et la fréquence des aléas d'une gravité analogue (ERM, 1998) ;

- Des mesures qu'il est possible de prendre pour accroître la résilience de l'infrastructure et du coût de ces mesures (critère similaire à celui du niveau de risque économiquement optimal).

28. Dans le cadre d'un test de résilience, les scénarios doivent d'abord être testés à un niveau de modélisation peu détaillé (opinions d'experts structurées, par exemple), puis progressivement à des niveaux de plus en plus détaillés (simulations informatiques, par exemple), jusqu'à ce qu'il puisse être déterminé si le niveau de risque est acceptable ou non. Plus le niveau de détail sera grand, plus le test demandera de temps et d'efforts.

29. La notion de risque acceptable étant subjective, les parties prenantes doivent se concerter pour définir ensemble le niveau de risque qu'elles considèrent comme acceptable. La définition peut varier selon les systèmes de transport, les gestionnaires d'infrastructures et les régions.

30. Une fois les résultats des tests de résilience obtenus et analysés, il peut être décidé si le système satisfait ou non aux exigences. Si le niveau de résilience est acceptable, aucune intervention n'est nécessaire. Si le niveau de résilience est insuffisant, des mesures doivent être prises pour le renforcer.

31. Les mesures peuvent concerner n'importe quelle composante du système. Il peut par exemple s'agir :

- De détourner le cours d'une rivière afin d'éviter tout contact avec les infrastructures en cas d'inondation ;
- De renforcer les infrastructures pour qu'elles puissent résister aux eaux de crue ;
- De construire une deuxième route afin de limiter les perturbations du trafic si la première route est inondée ;
- De modifier le calendrier des opérations de transport pour éviter autant que possible les retards excessifs ;
- De mettre en place des systèmes de prévision et d'alerte ;
- D'améliorer les procédures de maintenance et de contrôle ;
- D'adopter une stratégie d'adaptation ou une approche évolutive de la gestion du système.

32. Les interventions prévues ne peuvent pas nécessiter plus de ressources qu'il n'y a de ressources disponibles, et l'utilisation des ressources doit être optimisée de manière à renforcer au maximum la résilience du système.

D. Étapes d'un test de résilience

1. Renseignements d'ordre général

33. Les étapes d'un test de résilience, telles que décrites dans la présente section, ont été définies compte tenu du fait que différentes situations requièrent différents types de modèles, qui offriront différents niveaux de détail. De surcroît, il sera souvent souhaitable de procéder au test de résilience de manière itérative, dans le respect des principes suivants :

- Travailler en étapes (analyse qualitative sur une courte période, puis analyse quantitative sur une plus longue période si nécessaire, par exemple) ;
- Partir d'un niveau de modélisation peu détaillé pour aller vers des niveaux plus détaillés ;
- Envisager toutes les possibilités, étant entendu qu'il existe de nombreux tests de résilience possibles et de nombreuses façons de les réaliser.

2. Définir le test de résilience

34. L'étape de la définition du test de résilience consiste à répertorier les éléments à vérifier pour pouvoir déterminer si la résilience d'une infrastructure face à un aléa naturel est suffisante ou s'il faut planifier et mener des interventions pour la renforcer. Il s'agit de définir [le ou les] scénarios à étudier pour chaque test de résilience, ainsi que les niveaux acceptables de perturbation des services et d'augmentation des coûts d'intervention. On peut par exemple considérer que la résilience d'une infrastructure face à un événement pluviométrique tel qu'il n'en survient que tous les cent ans est acceptable si les coûts liés à la remise en état de cette infrastructure et à la perte de temps subie par les usagers n'excèdent pas 1 % du PIB.

35. Dans un premier temps, il faut réfléchir à la zone et à la période que doit couvrir chaque scénario. Ces paramètres influenceront sur la représentation du système et sur les prescriptions relatives au test de résilience, qu'il s'agisse des ressources nécessaires (main-d'œuvre, par exemple) ou des résultats escomptés (niveau de précision, par exemple). Ils influenceront également sur la portée et le degré de détail de l'évaluation. En outre, il convient de réfléchir aux niveaux auxquels le test de résilience doit être effectué. Par exemple, si la résilience face aux inondations et aux glissements de terrain doit dépasser une certaine valeur seuil, on procédera à un seul test de résilience, qui comprendra des scénarios d'inondation et des scénarios de glissement de terrain. En revanche, si la résilience face aux inondations doit dépasser une valeur seuil et la résilience face aux glissements de terrain une autre valeur seuil, on procédera à deux tests de résilience distincts, qui comprendront des scénarios d'inondation pour le premier et des scénarios de glissement de terrain pour le second.

36. La définition du test de résilience est une étape complexe, car une multitude de parties prenantes donnent leur point de vue sur une multitude de questions, et toutes ont en outre leurs propres attentes quant aux éclairages que devra apporter le test. Les parties prenantes dépendront de la situation, mais il s'agira vraisemblablement des gestionnaires des infrastructures, d'autorités et administrations locales, de responsables politiques, d'agences de protection de l'environnement, de représentants d'organismes locaux de promotion du développement et de spécialistes de différentes composantes du système de transport (dispositifs de lutte contre les inondations, infrastructures (ingénieurs en structures, par exemple), flux de circulation, reconstruction, etc.). L'une des valeurs à définir au cours de cette étape peut par exemple être le niveau de perturbation de la circulation considéré comme acceptable à la suite d'un événement pluviométrique tel qu'il n'en survient que tous les cinq cents ans. Ce niveau acceptable peut être calculé en utilisant comme paramètres l'allongement total des temps de parcours et le temps nécessaire pour remettre l'infrastructure en état.

37. L'étape de la définition du test de résilience débouche sur un ensemble de questions claires, dont les réponses, apportées par le test, permettront d'établir soit que la résilience de l'infrastructure face à un aléa naturel est suffisante, soit qu'il faut planifier et mener des interventions pour la renforcer.

3. Choisir une approche

38. L'étape du choix d'une approche consiste à déterminer :

a) Le type d'approche à adopter (qualitative, semi-qualitative ou quantitative) pour chaque étape des tests et la forme que prendront ces approches. De manière générale, les tests menés selon une approche qualitative sont moins chronophages, plus approximatifs et plus holistiques, tandis que les tests menés selon une approche quantitative prennent plus de temps, sont plus précis et permettent d'étudier des scénarios particuliers. Il est recommandé d'adopter dans un premier temps une approche qualitative, puis, si les résultats ne sont pas satisfaisants, de procéder à des analyses quantitatives plus approfondies des composantes du système pour lesquelles une plus grande précision est nécessaire. Le passage d'une analyse qualitative à des analyses quantitatives de plus en plus détaillées peut également se faire de manière itérative, par exemple en utilisant d'abord des modèles hydrauliques à une dimension pour déterminer l'étendue d'une inondation, puis en passant à des modèles à deux ou trois dimensions, si nécessaire et faisable compte tenu des ressources disponibles ;

b) Si un appui informatique sera requis et, dans l'affirmative, sous quelle forme et à quelle étape de la procédure. En général, plus une approche quantitative est détaillée, plus il faudra de moyens informatiques. Le niveau exact de l'appui nécessaire dépendra évidemment des composantes du système à analyser et du niveau de détail de l'analyse. Par exemple, si des modèles informatiques sont utilisés pour calculer le risque que des ponts soient submergés en cas d'inondation, ces modèles devront permettre de simuler des écoulements d'eau en trois dimensions ;

c) Le degré de participation des représentants de différents groupes de parties prenantes à chaque étape des tests et la forme que prendra cette participation. Un test mené selon une approche qualitative peut par exemple consister pour une équipe d'analystes à préparer les différents volets du test de résilience, puis à organiser un atelier pour présenter ses travaux et les résultats à toutes les parties prenantes, qui pourront faire part de leurs observations. L'équipe pourra ensuite revoir l'analyse si besoin en tenant compte des remarques des parties prenantes. Le nombre et la fréquence des ateliers dépendront bien entendu de la durée du projet et des souhaits des parties prenantes. Une analyse qualitative étalée sur neuf mois pourrait par exemple comprendre 5 à 7 ateliers d'une durée de quatre heures chacun. Il convient de noter qu'en situation réelle, une participation plus ou moins active des différentes parties prenantes peut s'avérer nécessaire.

39. L'étape du choix d'une approche consiste aussi à prendre des décisions quant à la façon d'évaluer la résilience d'une infrastructure face à de multiples aléas. De telles décisions peuvent être compliquées, surtout lorsque les tests font intervenir des valeurs cumulatives et des aléas combinés. Il faut notamment déterminer s'il faut définir des seuils d'acceptation pour les résultats de tests de résilience fondés sur des simulations d'un aléa unique, ou pour les résultats cumulés de tests fondés sur des simulations d'aléas multiples. Il peut s'agir, par exemple, de décider s'il faut définir un niveau acceptable d'allongement des temps de parcours pour un scénario d'événement pluviométrique tel qu'il n'en survient que tous les cent ans et pour un scénario de tremblement de terre tel qu'il n'en survient que tous les cent ans, pris séparément, ou pour des scénarios impliquant à la fois un événement pluviométrique et un tremblement de terre, en prenant en considération les effets conjugués de ces deux événements sur le fonctionnement du système.

4. Définir la représentation du système de transport (infrastructures, environnement et organisation)

40. L'étape de la définition de la représentation du système de transport consiste à :

- a) Définir les limites du système dans l'espace et dans le temps ;
- b) Définir les événements à considérer ;
- c) Définir les relations entre les événements.

41. Le type et le nombre des événements à considérer dépendent du niveau de détail de l'analyse/du modèle, étant entendu qu'il est recommandé de partir d'un niveau de modélisation peu détaillé pour aller vers des niveaux plus détaillés. Pour recenser les événements infrastructurels à considérer dans la première itération d'un scénario, par exemple, on peut modéliser une section de route de 10 km comprenant 3 ponts, 4 tronçons de route et un tunnel, qui peuvent tous être en état de fonctionnement ou non.

42. La deuxième itération peut consister à modéliser la même section de route de 10 km, mais en considérant séparément les différents éléments constitutifs de chacun des ponts (colonnes, piliers, tabliers, culées, etc.). L'étape de la définition de la représentation du système de transport nécessitera sans doute de nombreuses itérations la première fois. Si un même système fait l'objet de plusieurs tests de résilience, par exemple à des intervalles de cinq ans, moins d'itérations seront nécessaires, car le niveau de détail souhaité sera connu à l'avance.

43. Les cinq sous-étapes sont les suivantes : a) définir les limites du système ; b) définir les événements ; c) définir les scénarios ; d) définir les relations ; e) choisir les modèles. Elles sont décrites dans les sous-sections ci-après.

a) Définir les limites du système

44. L'étape de la définition des limites du système consiste à délimiter, dans l'espace et dans le temps, le système à analyser/modéliser.

i) Définition du système considéré

45. Le système englobe tous les éléments à considérer pour déterminer si les niveaux de résilience face à divers aléas naturels sont suffisants, à savoir :

- Le milieu naturel (quantité de pluie, volume d'eau dans les cours d'eau, etc.) ;
- Les infrastructures physiques (comportement d'un pont lorsque le niveau d'eau est élevé, par exemple) ;
- Les comportements humains (évolution de la circulation lorsqu'un pont routier est inaccessible, hiérarchisation des interventions, etc.).

46. Comme il faut étudier l'évolution du système dans le temps, il est utile d'examiner, sur la période considérée, la corrélation spatiale et temporelle entre les différents événements et les différentes activités. Il s'agit notamment de définir des hypothèses quant à la façon dont le système réagira dans des situations particulières et de considérer les événements en cascade. À cet égard, il convient de garder à l'esprit que la réalisation d'un test de résilience implique de tenir compte de tous les processus stochastiques qui interviennent au cours de la période considérée. Il appartient aux parties prenantes de déterminer si tous ces processus ont bien été pris en considération.

47. Un test de résilience nécessite donc de concevoir des modèles offrant une représentation suffisamment précise de l'évolution des aléas, des infrastructures et des conséquences des aléas, ainsi que de leurs interactions, de sorte qu'un tableau complet du système puisse être dressé, que l'efficacité des programmes d'intervention puisse être mesurée et que les risques associés à ces programmes puissent être évalués. De fortes pluies peuvent par exemple provoquer des inondations, qui peuvent non seulement endommager des ponts, mais aussi provoquer des glissements de terrain susceptibles de bloquer l'accès à des routes. Dans un pareil cas, les analystes doivent concevoir un modèle qui leur permettra de calculer la quantité de pluie susceptible, sur une période donnée, de déclencher un glissement de terrain. À un niveau de détail très faible, la modélisation peut reposer sur des opinions d'experts. Une autre solution, plus complexe, consiste à construire un modèle quantitatif grâce auquel il sera possible d'estimer le degré de stabilité des talus bordant une route et donc la probabilité qu'un glissement de terrain se déclenche compte tenu de facteurs tels que la quantité de pluie par unité de temps, la teneur en eau du sol, les caractéristiques mécaniques du sol, la quantité d'eau susceptible de s'évaporer et les variations de la température dans le temps. Les analystes et les parties prenantes devront déterminer le niveau de détail qu'ils jugent suffisant.

ii) Les limites spatiales

48. La définition des limites spatiales consiste à délimiter l'environnement naturel et bâti à analyser/modéliser, et à décider de la façon dont cet environnement doit être subdivisé. Il faut notamment définir où les actifs se trouvent, où des aléas sont susceptibles de se produire et où ces aléas pourraient causer des dégâts.

49. Les limites spatiales utilisées aux fins de l'analyse du système peuvent varier selon les éléments considérés, l'ajout d'éléments rendant plus complexe la conception des scénarios. Le nombre de ces éléments peut être limité par un manque de connaissances et de données, mais évoluer de façon itérative au fur et à mesure de l'acquisition de nouvelles connaissances et informations. Par exemple, les infrastructures considérées pourraient être circonscrites au périmètre physique d'une ville, mais des données sur les précipitations enregistrées à l'échelle d'un bassin versant plus large pourraient être pertinentes. Il est relativement simple de délimiter les lieux où pourraient se situer les événements sources, les

aléas et les objets à considérer aux fins de l'évaluation générale des risques. Il est plus complexe de délimiter le périmètre à considérer pour construire des scénarios utiles, qui apportent un éclairage aussi complet que possible sur la résilience du système et couvrent ensemble tous les aspects de cette résilience. Il faut en effet concevoir des scénarios permettant de modéliser les événements susceptibles de causer des aléas, et certains de ces événements pourraient survenir en dehors du périmètre considéré, et donc être difficiles à repérer. La rupture d'un barrage peut par exemple entraîner des inondations en aval, dans une région située au-delà de la zone d'intérêt initialement définie. Autre problème de taille à prendre en compte au stade de la délimitation du périmètre d'un scénario, les perturbations du système peuvent s'étendre au-delà de la zone de responsabilité directe du gestionnaire des infrastructures concernées. L'effondrement d'un pont autoroutier sur un réseau autoroutier transeuropéen, par exemple, peut entraver la libre circulation des marchandises dans de nombreux pays.

iii) *Les limites temporelles*

50. Comme les limites spatiales, les limites temporelles dépendent des éléments du système à analyser. La définition des limites temporelles consiste à délimiter la période sur laquelle l'environnement naturel et bâti doit être analysé/modélisé, et à décider de la façon dont cette période doit être subdivisée. Par exemple, un événement pluviométrique peut causer des inondations dont les conséquences pourraient persister deux ans plus tard. En outre, on pourrait imaginer que se produise, au cours de la période considérée, un « second » événement pluviométrique tel qu'il n'en survient que tous les cent ans, en raison de facteurs tels que la saturation des bassins versants et le peu de temps laissé à l'eau du « premier » événement pour s'écouler.

51. Un système peut être analysé/modélisé comme étant statique ou dynamique. Lorsque le système est considéré comme statique, les changements qui surviennent au fil du temps sont ignorés (densification de la circulation, par exemple). Lorsqu'il est considéré comme dynamique, ces changements sont pris en compte. Le choix de l'une ou l'autre approche dépend de la situation. À cet égard, le temps nécessaire pour procéder à l'analyse est une considération majeure, une analyse fondée sur un modèle dynamique étant sensiblement plus chronophage. Le dynamisme du système est également un facteur important : il convient de déterminer si le système est susceptible d'évoluer au cours de la période considérée. Si un système de transport urbain est soumis à un test de résilience qui n'est réitéré que tous les dix ans et qu'une nouvelle autoroute doit être construite dans la région au cours des dix prochaines années, ce système devrait faire l'objet d'une modélisation dynamique, de sorte que les changements qui vont survenir chaque année au cours de cette période de dix ans puissent être pris en considération.

52. L'étape de la définition des limites du système prend fin une fois que les limites spatiales et temporelles de chaque partie du système à analyser ont été fixées.

b) Définir les événements

53. L'étape de la définition des événements consiste à recenser tous les événements à analyser/modéliser (en cascade ou non), qui vont généralement des événements sources aux événements sociétaux. Les événements sources sont ceux qui, du point de vue de la modélisation en tout cas, surviennent sans déclencheur et sont à l'origine de tous les autres événements. Les événements sociétaux sont les événements liés à des activités humaines, qu'il est donc possible de quantifier aux fins de l'évaluation de la résilience du système. Ils correspondent aux conséquences que les facteurs de tension considérés ont sur les activités humaines. Tous les événements autres que les événements sociétaux ne sont que des précurseurs et ne sont pris en compte, dans l'estimation de la résilience du système, que dans la mesure où ils ont des répercussions sur des activités humaines (réparation d'un pont, impossibilité de voyager, etc.).

54. Le nombre de types d'événements considérés peut varier en fonction de la situation et du niveau de détail de l'analyse/du modèle, mais de manière générale, les cinq principaux types d'événements considérés sont les suivants : les événements sources, les aléas, les événements infrastructurels, les événements altérant l'utilisation du réseau et les événements sociétaux. Tous les événements peuvent être situés dans l'espace et dans le temps, et leur intensité doit être mesurée. La zone d'intérêt peut être petite (effondrement d'un tunnel) ou grande (perturbations de la circulation à l'échelle de l'Europe). La période considérée peut se mesurer en minutes (avalanche), en jours (inondations) ou même en mois (vague de chaleur). L'intensité d'un événement est donnée par les valeurs des attributs d'intérêt de cet événement. Le nombre de mesures d'intensité utilisées pour décrire un événement dépend de la situation et du niveau de détail nécessaire. On trouvera des informations plus détaillées dans le tableau ci-dessous.

55. Les détails nécessaires pour décrire l'intensité d'un événement dépendent du problème considéré et du niveau de détail souhaité. Si des événements d'un quelconque niveau ou des ensembles entiers de mesures d'intensité sont exclus, les raisons de ce choix doivent être explicitées, car les risques associés à ces événements seront également exclus de l'évaluation des risques.

56. L'étape de la définition des événements s'achève par l'établissement d'une liste de tous les événements à inclure dans la représentation du système.

Principaux types d'événements

<i>Type d'événement</i>	<i>Description</i>	<i>Exemples</i>	<i>Commentaires</i>	<i>Exemples de mesures d'intensité</i>
Événement source	Un événement susceptible de déclencher un aléa.	Fortes pluies ou chutes de neige	Un événement source est le premier événement d'un scénario, qui débouchera sur un événement sociétal. On peut également parler d'événement déclencheur.	Dans le cas de fortes pluies, précipitations de type x , avec un débit d'eau supérieur à y mm^2/s pendant plus de 5 heures.
Aléa	Un événement susceptible de provoquer un événement infrastructurel.	Inondation, glissement de terrain ou avalanche	Un aléa est normalement déclenché par un événement source, mais il est parfois modélisé directement en tant qu'événement source lui-même. En plus de provoquer un événement infrastructurel, un aléa peut aussi déclencher un autre aléa : un tremblement de terre peut par exemple causer un glissement de terrain.	Dans le cas d'une inondation, niveau d'eau atteignant une profondeur de x m pendant une durée de y heures aux endroits a , b et c , et volume d'eau entrant en contact avec le pont i supérieur à j m^3/s .
Événement infrastructurel	Un événement qui altère une infrastructure et est susceptible de modifier l'utilisation de cette infrastructure ou certains comportements humains.	État de tous les éléments d'infrastructure considérés à chaque instant pendant une inondation	Pour définir les événements infrastructurels, il convient de considérer séparément les différents éléments d'infrastructure en se demandant par quels événements ces éléments pourraient être altérés et en déterminant l'état dans lequel un élément donné se trouverait si un certain événement se produisait. Il s'agit d'une tâche complexe,	Dans le cas de l'effondrement d'un pont, les dommages entraînant la fermeture totale de la route, les dommages entraînant la fermeture d'une voie de circulation et les dommages n'entraînant aucune interruption de la circulation.

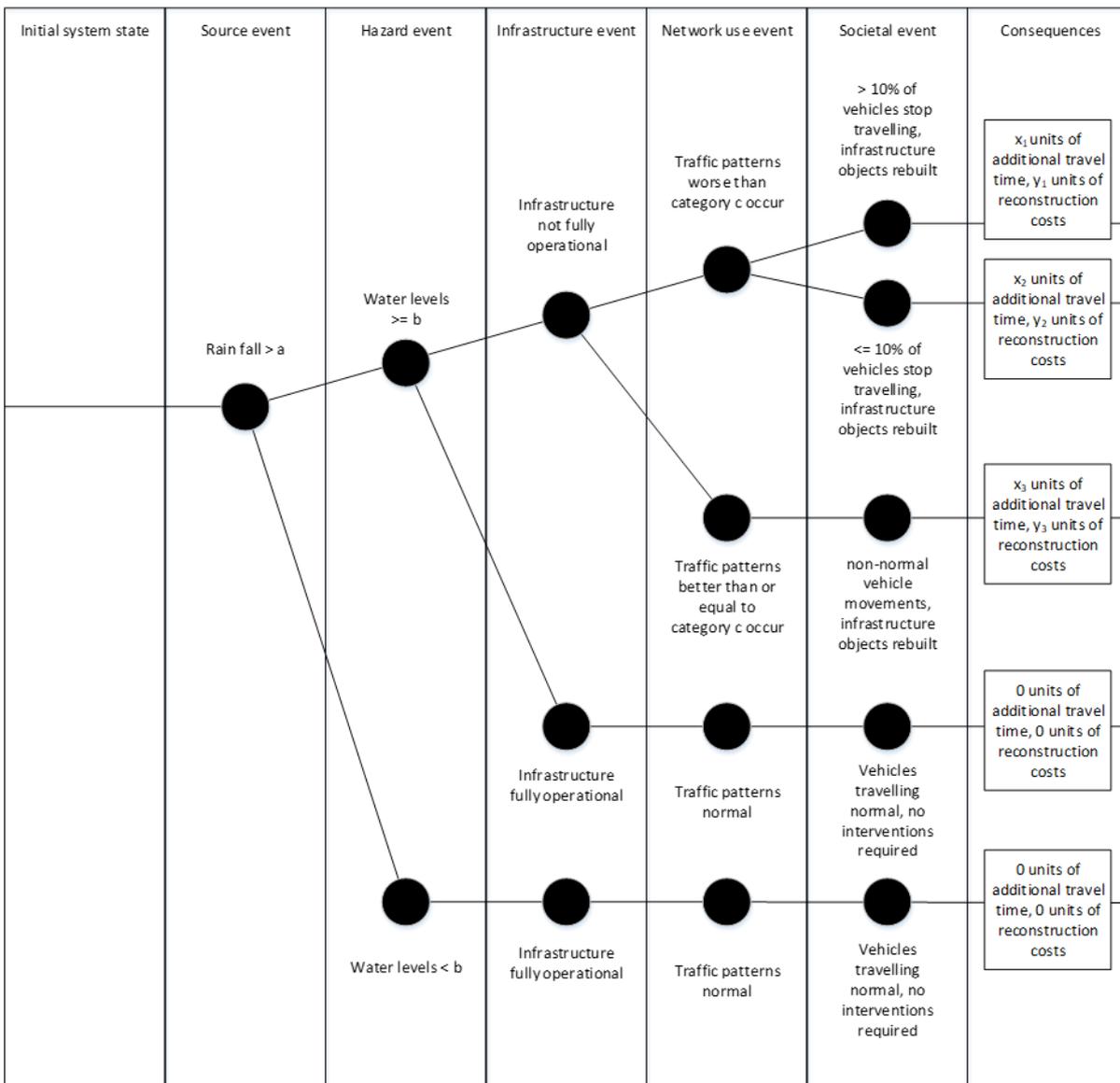
<i>Type d'événement</i>	<i>Description</i>	<i>Exemples</i>	<i>Commentaires</i>	<i>Exemples de mesures d'intensité</i>
			car bien souvent, de nombreux éléments peuvent être altérés par un événement, mais les effets peuvent être mineurs (rupture d'une barre de renforcement sur un pont pendant un tremblement de terre, par exemple) ou au contraire considérables (effondrement du pont, par exemple).	
Événement altérant l'utilisation du réseau	Un événement qui altère l'utilisation d'une infrastructure et est susceptible de modifier certains comportements humains.	Le niveau d'utilisation du réseau après la fermeture d'une partie de celui-ci à cause d'une inondation.	La probabilité que se produise un tel événement est particulièrement difficile à estimer parce qu'elle dépend de la corrélation spatiale et temporelle et des relations physiques entre les événements sources, les aléas et les événements infrastructurels. Ces derniers peuvent donner lieu à des événements en cascade.	En raison de la fermeture du couloir de transport ferroviaire de marchandises qui relie Rotterdam à Genève, 50 % des marchandises sont transportées par camion, 40 % sont acheminées via d'autres itinéraires ferroviaires et 10 % ne sont pas livrées.
Événement sociétal	Un événement qui a une incidence sur des activités humaines.	Les actions de personnes ou de groupes de personnes auxquelles une valeur peut être attribuée, y compris les activités de remise en état des infrastructures après une inondation et la perte de temps subie par les utilisateurs du réseau.	Pour modéliser les actions de personnes ou de groupes de personnes, il est souvent utile de regrouper ces personnes ou groupes de personnes en catégories en fonction de leurs comportements généraux, ce regroupement dépendant lui-même de la façon dont les comportements sont modélisés. Des événements sociétaux peuvent entraîner d'autres événements sociétaux. Si ce n'est pas le cas, une valeur doit être attribuée à l'événement. Cette valeur est alors utilisée aux fins de l'évaluation des risques en tant que conséquence.	Coût des travaux de reconstruction pour les gestionnaires des infrastructures Coût de l'allongement des temps de parcours pour les usagers Montant des pertes économiques liées à l'allongement des temps de parcours ou à la non-livraison de marchandises

c) Définir les scénarios

57. L'étape de la définition des scénarios consiste à relier les événements entre eux, des événements sources aux événements sociétaux, sous la forme d'un arbre d'événements. La figure III est un exemple d'arbre d'événements, volontairement simplifié pour des raisons de clarté. Il va de soi que, dans la plupart des situations, les arbres compteront sensiblement plus de branches et de sous-catégories d'événements. Pour construire un arbre, il faut déterminer les valeurs des mesures d'intensité obtenues à l'étape de la définition des événements, ces valeurs apportant un éclairage sur les relations entre les différents événements. Les scénarios

sont définis sans estimer la probabilité que surviennent les différents événements et sans chiffrer leurs conséquences.

Figure III
Définition des scénarios : exemple d'arbre d'événements simple (Adey *et al.*, 2016)



58. Pour chaque représentation d'un système, il existe un nombre infini de scénarios et un nombre infini de façons de représenter ces scénarios, c'est-à-dire de représenter la réalité et l'évolution d'une situation dans le temps. Un soin particulier doit être apporté à la sélection des scénarios sur lesquels reposera chaque test de résilience, car les tests doivent couvrir toutes les situations importantes aux yeux des parties prenantes. Il faut éviter que, une fois tous les tests effectués, une partie prenante se rende compte qu'un aléa (tremblement de terre, par exemple) n'a fait l'objet d'aucune simulation.

59. Afin de concevoir, pour chaque test de résilience, un nombre suffisant de scénarios, il est utile de considérer les trois points de départ suivants :

- Partir des événements sources et réfléchir aux incidences que ces événements pourraient avoir sur les infrastructures, puis aux réactions des usagers ;
- Partir des événements sociétaux et réfléchir aux dommages que les infrastructures devraient subir pour que de tels événements surviennent ;
- Partir des événements infrastructurels et regarder dans les deux directions.

60. Il est important de recenser tous les scénarios utiles, car si des scénarios sont exclus à ce stade, ils ne pourront pas être pris en compte par la suite, et l'estimation des risques pourrait être faussée. Pour limiter autant que possible le risque d'omission de scénarios, il faut que des spécialistes de tous les domaines concernés soient associés à cette étape des travaux (climatologues et météorologues, hydrologues et spécialistes des inondations, ingénieurs civils et ingénieurs en structures, spécialistes de la gestion des risques, ingénieurs géotechniques, responsables de la planification des transports et spécialistes des transports, spécialistes de la gestion du trafic, scientifiques spécialisés dans les questions environnementales, spécialistes de la cybersécurité, professionnels de la gestion des urgences, spécialistes des sciences sociales et comportementales, économistes, spécialistes des questions juridiques et réglementaires, etc.).

61. L'étape de la définition des scénarios s'achève par l'établissement d'une liste de tous les scénarios à analyser.

d) Définir les relations

62. Pour estimer la probabilité que se produisent les événements en cascade envisagés dans les scénarios, il faut établir des modèles des relations entre les différents événements. Par exemple, pour calculer le volume d'eau qui entrera en contact avec un pont pendant une inondation, on doit modéliser la façon dont l'eau de pluie à l'origine de l'inondation se met à ruisseler en surface et atteint le cours d'eau enjambé par le pont, éventuellement en tenant compte du volume d'eau qui s'infiltré dans le sol, s'évapore ou est retenu dans des bassins de rétention temporaires. L'ampleur des efforts à consacrer à ce travail de modélisation dépend de la situation et du niveau de détail souhaité. Dans certains cas, il peut suffire d'utiliser des courbes de fragilité fondées sur des opinions d'experts, par exemple pour estimer le montant des dommages qu'un seul pont pourrait subir pendant une inondation.

63. Dans d'autres cas, il peut être souhaitable d'utiliser des courbes de fragilité distinctes pour chaque élément d'une infrastructure, par exemple pour estimer le montant des dommages qu'une grande digue pourrait subir pendant une inondation, étant donné que beaucoup d'éléments sont susceptibles de lâcher. De manière générale, il convient de déployer des efforts supplémentaires pour parvenir à un plus grand niveau de détail lorsqu'on estime que les informations ainsi obtenues éclaireront la prise de décisions. S'ils n'apportent pas plus de clarté, ces efforts supplémentaires n'en valent pas la peine.

64. Bien que les exemples donnés ici soient ciblés, les réflexions générales valent pour tous les types d'événements (événements sources, aléas, événements infrastructurels, événements altérant l'utilisation du réseau et événements sociétaux). Si possible, il faut tenir compte des données disponibles au moment de décider du niveau de détail adapté pour la modélisation des relations. Il pourra s'avérer nécessaire d'analyser certaines parties du système en profondeur pour vérifier que les relations entre les événements sont définies avec la précision souhaitée. Il peut s'agir de recueillir des données sur la pluviosité, de mesurer le niveau qu'atteignent des cours d'eau pendant un événement pluviométrique, de tester la résistance des colonnes de ponts à la pression de l'eau, de fermer des routes pour observer l'évolution de la circulation ou de procéder à des tests pour mesurer le temps que prend la remise en état d'infrastructures endommagées, par exemple.

65. L'étape de la définition des relations prend fin une fois que les relations entre tous les événements sont clairement établies.

e) Choisir les modèles

66. Une fois qu'on a défini les limites du système, les événements, les scénarios et les relations, on choisit les modèles à utiliser pour estimer la résilience. Il importe de faire appel à des spécialistes des domaines concernés pour déterminer les modèles les mieux adaptés aux travaux d'analyse à mener et en comprendre les modalités d'application.

67. Les modèles peuvent être des approximations fondées sur des opinions d'experts (Devia *et al.*, 2015) (« un événement pluviométrique tel qu'il n'en survient que tous les cent ans submergera le pont »), des relations déterministes simples (« 1 mm de précipitations dans le bassin versant fait monter le niveau de l'eau sous le pont de 0,5 mm ») ou des simulations avancées (modélisation hydraulique en trois dimensions du bassin versant, par exemple) (Rong *et al.*, 2020).

68. L'étape du choix des modèles consiste aussi à sélectionner le logiciel à utiliser, et à estimer les besoins en matériel informatique et en puissance de calcul dans le cas où un appui informatique serait requis (HEC-RAS, Arc GIS, etc.) (Adey *et al.*, 2016 ; Hackl *et al.*, 2018). Elle prend fin une fois que tous les modèles et le logiciel nécessaires pour estimer la résilience ont été choisis.

5. Estimer la résilience

69. L'étape de l'estimation de la résilience consiste à estimer la probabilité que chacun des scénarios se produise et les valeurs à attribuer aux événements sociétaux associés aux différents scénarios si ceux-ci se produisent, puis, le cas échéant, à agréger les résultats. Par exemple, si les scénarios retenus sont ceux d'un événement pluviométrique tel qu'il n'en survient que tous les cent ans et d'un événement pluviométrique tel qu'il n'en survient que tous les cinq cents ans, les pertes de temps de parcours causées par ces deux événements doivent être estimées et éventuellement agrégées compte tenu de la probabilité que ceux-ci se produisent au cours de l'année à venir. Si plusieurs mesures sont utilisées (allongement des temps de parcours et accidents, par exemple), toutes doivent être estimées pour les deux scénarios, puis agrégées. De surcroît, des valeurs devront être attribuées à l'allongement des temps de parcours et aux accidents, puis combinées pour obtenir une estimation unique de la résilience du système. Le moyen le plus simple de procéder est d'attribuer aux événements sociaux une valeur monétaire estimative (une unité de temps perdu pourrait avoir une valeur de 20 euros et une blessure légère due à un accident pourrait avoir une valeur de 100 000 euros, par exemple). Ces valeurs peuvent généralement être trouvées dans des documents méthodologiques de référence ou des codes nationaux ou européens, notamment dans les suivants (liste non exhaustive) :

- *Handbook on the external costs of transport*, Commission européenne, 2019 ;
- *Référentiel méthodologique pour l'évaluation des projets de transport*, DGITM, France, 2014.

70. La résilience peut être estimée avec ou sans appui informatique, c'est-à-dire selon une approche quantitative ou qualitative, et le niveau de détail peut également varier selon la situation et les informations, données et ressources disponibles. Ainsi, avec un appui informatique, la réduction du niveau de service (allongement des temps de parcours, etc.) en cas d'événement pluviométrique tel qu'il n'en survient que tous les cent ans peut être simulée (1 000 000 heures, par exemple), puis le nombre obtenu peut être multiplié par la valeur unitaire de 20 euros/heure. Sans appui informatique, il faudra demander à des experts leur opinion sur la réduction du niveau de service, puis multiplier le nombre obtenu par la valeur unitaire de 20 euros/heure. Des outils tels que la méthode Delphi peuvent être utilisés pour synthétiser les opinions des experts.

71. Il importe de prêter une attention particulière au degré de certitude avec lequel peuvent être estimées, pour chaque scénario, la probabilité qu'un événement se produise et les conséquences de cet événement. Il est conseillé de considérer la sensibilité de ces valeurs aux hypothèses de modélisation et de prendre cette sensibilité en compte dans l'interprétation et l'évaluation des résultats. Les indicateurs de la sensibilité des valeurs sont les suivants :

- Les divergences d'opinion entre experts ;
- La disponibilité de l'information ;
- La qualité de l'information ;
- Le niveau de connaissance des personnes chargées de l'analyse des risques ;
- Les limites des modèles utilisés.

72. Les paramètres à faire varier dans le cadre de l'analyse de sensibilité doivent être ceux dont l'effet sur les valeurs de résilience est le plus marqué.

73. L'étape prend fin une fois obtenue l'estimation de la résilience du système de transport.

6. Évaluer la résilience

74. L'étape de l'évaluation de la résilience consiste à vérifier que l'estimation de la résilience est valable aux yeux des parties prenantes. Cette vérification est effectuée quelle que soit l'approche utilisée (qualitative, semi-quantitative ou quantitative).

75. Le travail d'évaluation consiste en grande partie à étudier la façon dont les parties prenantes perçoivent les risques et à comparer leur point de vue à celui des analystes, sur la base duquel la résilience a été estimée. Il s'agit aussi de prendre du recul sur l'analyse et de se demander si tous les facteurs importants ont bien été modélisés de manière satisfaisante. La modélisation d'un système n'étant jamais parfaite, il peut arriver que, au terme de l'étape de l'évaluation de la résilience, un décideur prenne une décision qui ne cadre pas avec les résultats du test de résilience. Un tel choix doit toutefois être justifié. En pareil cas, il pourrait être utile de procéder à un nouveau test de résilience en améliorant la modélisation du système de transport.

76. L'étape de l'évaluation de la résilience consiste également à apprécier le caractère satisfaisant ou non du test de résilience, notamment de sa définition, de l'approche utilisée, de la représentation du système et de l'estimation de la résilience. Elle se termine une fois que les responsables sont parvenus à l'une des conclusions suivantes :

a) Le test de résilience a été conduit de manière satisfaisante et les niveaux de résilience sont acceptables (résultat positif) ;

b) Le test de résilience a été conduit de manière satisfaisante et les niveaux de résilience ne sont pas acceptables (résultat négatif) ;

c) Le test de résilience n'a pas été conduit de manière satisfaisante (résultat considéré à titre provisoire comme positif ou négatif jusqu'à ce que l'analyse soit approfondie).

77. Il est conclu que le test de résilience n'a pas été conduit de manière satisfaisante lorsqu'il n'est pas possible de déterminer si les niveaux de résilience sont acceptables ou non. La raison peut être que le système ou certains éléments du système n'ont pas été modélisés de façon suffisamment détaillée, ou que les modèles utilisés laissent planer une trop grande incertitude.

78. Si le test de résilience n'a pas été conduit de manière satisfaisante, il faut déterminer les parties du système à analyser plus en détail. Si le résultat du test est négatif, un programme d'intervention, qui prévoit des mesures de renforcement de la résilience, peut être élaboré. Si le résultat est positif, il n'est pas nécessaire de prendre des mesures de renforcement de la résilience.

7. Déterminer les parties du système à analyser plus en détail

79. L'étape consiste à déterminer les parties du système à analyser plus en détail lors de la prochaine itération du test de résilience. Ces parties sont celles dont une analyse plus approfondie réduira le plus sensiblement l'incertitude qui entoure l'estimation de la résilience. Il faut veiller à ne pas sélectionner uniquement des parties du système pour lesquelles il est supposé qu'une réduction de l'incertitude se traduira par une estimation plus favorable du niveau de résilience, et donc potentiellement par un résultat positif au test. En d'autres termes, les parties pour lesquelles une réduction de l'incertitude pourrait déboucher sur une estimation moins favorable du niveau de résilience ne doivent pas être négligées. Pour éviter que les parties du système à analyser soient sélectionnées sur la base de préférences, il convient d'évaluer les incertitudes associées à chaque partie du système. Souvent, cette évaluation reposera sur des opinions d'experts. Les experts pourraient par exemple estimer qu'une grande incertitude entoure l'événement pluviométrique considéré et l'évolution de la circulation à la suite de l'effondrement d'un pont, mais qu'il y a en revanche

peu d'incertitude quant au comportement du pont en cas de contact avec un volume d'eau de $x \text{ m}^3/\text{s}$ et au temps nécessaire pour reconstruire le pont en cas d'effondrement.

80. Il convient d'établir une liste de moyens de réduire l'incertitude, en précisant pour chacun les avantages et coûts escomptés. Cette liste doit notamment prévoir des examens approfondis de certaines parties du système, comme des tests de résistance des ponts ou des simulations d'inondations plus détaillées. Les parties du système à analyser plus en détail pourront ensuite être sélectionnées compte tenu des ressources disponibles, des efforts à déployer et du temps nécessaire. Si les ressources sont limitées, les parties retenues doivent être celles dont une analyse plus approfondie réduira le plus sensiblement l'incertitude.

E. Études de cas

81. La présente section devra être complétée une fois que le protocole de test de résilience aura été appliqué dans le cadre de projets.

F. Recommandations supplémentaires

82. La présente section, qui devra également être complétée une fois que le protocole de test de résilience aura été appliqué dans le cadre de projets, pourrait contenir des recommandations et des leçons tirées des études de cas.

G. Références

- Adey, B. T., Hackl, J., Lam, J. C., van Gelder, P., Van Erp, N., Prak, P., Heitzler, M., Iosifescu, I. et Hurni, L., 2016, « Ensuring acceptable levels of infrastructure related risks due to natural hazards with emphasis on stress tests », premier symposium international sur la gestion des actifs d'infrastructure (SIAM), Kyoto, Japon, janvier 2021-2022, DOI : 10.3929/ethz-b-000114177.
- BSI (British Standards Institution), 2021, « Adaptation to climate change - Using adaptation pathways for decision making » (BS 8631).
- Budd, L. C. S. et Ryley, T. J., 2012, « Chapter 3. An international dimension : Aviation », in Ryley, T. J. et Chapman L. (dir. Publ.), *Transport and Climate Change*, Emerald, Bingley, Royaume-Uni.
- Burbidge, R., 2018, « Adapting aviation to a changing climate: Key priorities for action », in *Journal of Air Transport Management*, 71, 167-174.
- Carbone 4, 2021, « Net Zero Initiative – 2020-2021 – Rapport final », France.
- Chinowsky, P., J. Helmen, S. Gulati, Neumann, j. et Martinich, J., 2019, « Impacts of climate change on operation of the US rail network », in *Transport Policy*, 75, 183–191, DOI: 10.1016/j.tranpol.2017.05.007.
- Devia, G. K., Ganasri, B. P. et Dwarakish, G. S., 2015. « A Review on Hydrological Models », in *Aquatic Procedia*, 4 : 1001–1007, <https://doi.org/10.1016/J.AQPRO.2015.02.126>.
- ERM, 1998, « Landslides and boulder falls from natural terrain: interim risk guidelines », in *GEO Report*, No. 75, Geotechnical Engineering Office.
- Espinet, X., A. Schweikert, N. van den Heever et P. Chinowsky, 2016, « Planning resilient roads for the future environment and climate change: quantifying the vulnerability of the primary transport infrastructure system in Mexico », in *Transport Policy*, 50 (2016), pp. 78-86, 10.1016/j.tranpol.2016.06.003.

- Fang, Z., P.T. Freeman, C.B. Field et K.J. Mach, 2018, « Reduced sea ice protection period increases storm exposure in Kivalina », in *Arctic Science*, 4(4), 525–537, doi:10.1139/as-2017-0024.
- Forzieri, G., A. Bianchi, F. Silva, M. Herrera, A. Leblois, C. Laval, J. Aerts et L. Feyen, 2018, « Escalating impacts of climate extremes on critical infrastructures in Europe », in *Global Environmental Change*, 48, 97–107, doi: 10.1016/j.gloenvcha.2017.11.007.
- Gratton, G., Williams, P., Padhra, A. et S. Rapsomanikis, 2022, « Reviewing the impacts of climate change on air transport operations », in *The Aeronautical Journal*, 126(1295) : 209-221. doi:10.1017/aer.2021.109.
- Hackl, J., J. C. Lam, M. Heitzler, B. T. Adey et L. Hurni, 2018, « Estimating network related risks: A methodology and an application in the transport sector », in *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 18 : 2273–2293. <https://doi.org/https://doi.org/10.5194/nhess-18-2273-2018>.
- AIE (Agence internationale de l'énergie), « Global line kilometers of conventional rail », 2000-2018, AIE, Paris. Date de consultation : 22 janvier 2023. <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-line-kilometers-of-conventional-rail-2000-2018>, AIE. Licence : CC BY 4.0.
- GIEC AR6 (sixième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat), 2022, « Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability ».
- ISO, 2019, « Adaptation to climate change – Principles, requirements and guidelines » (ISO 14090:2019).
- ISO, 2021, « Adaptation to climate change – Guidelines on vulnerability, impacts and risk assessment » (ISO 14091:2021).
- Markolf, S. A., C. Hoehne, A. Fraser, M. V. Chester et B. S. Underwood, 2019, « Transportation resilience to climate change and extreme weather events – Beyond risk and robustness », in *Transport Policy*, 74: 174–186. Pergamon. <https://doi.org/10.1016/J.TRANPOL.2018.11.003>.
- Melvin, A.M. *et al.*, 2017, « Climate change damages to Alaska public infrastructure and the economics of proactive adaptation », in *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 114(2), E122–E131, doi:10.1073/pnas.1611056113.
- Monioudi, I. N *et al.*, 2018, « Climate change impacts on critical international transportation assets of Caribbean Small Island Developing States (SIDS): The case of Jamaica and Saint Lucia », in *Regional Environmental Change*, 18(8), 22112225, doi:10.1007/s10113-018-1360-4.
- Neumann, J. E., Chinowsky, P., Helman, J. *et al.*, « Climate effects on US infrastructure: the economics of adaptation for rail, roads, and coastal development » in *Climatic Change*, 167, 44 (2021). <https://doi.org/10.1007/s10584-021-03179-w>.
- Palin, E. J., Stipanovic Oslakovic, I., Gavin, K. et Quinn, A., 2021, « Implications of climate change for railway infrastructure », in *Wiley Interdisciplinary Reviews : Climate Change*, 12(5), p.e728.
- AIPCN (Association mondiale pour les infrastructures de transport maritimes et fluviales), 2020A, « Resilience of the Maritime and Inland Waterborne Transport System », in *PIANC Report Number 193*. <https://www.pianc.org>.
- AIPCN (Association mondiale pour les infrastructures de transport maritimes et fluviales), 2020B, « Climate Change Adaptation Planning for Ports and Inland Waterways », in *PIANC Report Number 178*. <https://www.pianc.org>.
- AIPCR (Association mondiale de la route), 2015, « International climate change adaptation framework for road infrastructure ».

- Rong, Y., T. Zhang, Y. Zheng, C. Hu, L. Peng et P. Feng, 2020, « Three-dimensional urban flood inundation simulation based on digital aerial photogrammetry », in *Journal of Hydrology*, 584: 124308. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2019.124308>.
- Ryley, T., Baumeister, S. et Coulter, L., 2020, « Climate change influences on aviation: A literature review », in *Transport Policy*, 92. pp. 55-64. ISSN 0967-070X orcid.org/0000-0002-8072-2534.
- Schweikert, A., Chinowsky, P., Kwiatkowski, K. et Espinet, X., 2014, « The infrastructure planning support system: analyzing the impact of climate change on road infrastructure and development », in *Transport Policy*, 35 (2014), pp. 146-153, 10.1016/j.tranpol.2014.05.019.
- Spirre Clark, S., Cheseter, M. V., et Seager, T. P., 2018, « The vulnerability of interdependent urban infrastructure systems to climate change: could Phoenix experience a Katrina of extreme heat? », in *Sustainable and Resilient Infrastructure* 10.1080/23789689.2018.1448668.
- Storlazzi, C. D. *et al.*, 2018, « Most atolls will be uninhabitable by the mid-21st century because of sea-level rise exacerbating wave-driven flooding », in *Science Advances*, 4(4), eaap9741, doi:10.1126/sciadv.aap9741.
- Suarez, P., W. Anderson, V. Mahal et T. R. Lakshmann, 2005, « Impacts of flooding and climate change on urban transportation: a systemwide performance assessment of the Boston Metro Area. Transport », in *Transportation Research Part D*, 10 (2005), pp. 231-244, 10.1016/j.trd.2005.04.007.
- Twerefou, D. K., Adjei-Mantey, K. et Strzepek, N. L., 2014, « The economic impact of climate change on road infrastructure in sub-Saharan Africa countries: evidence from Ghana », No. 2014/032, WIDER Working Paper.
- UIC (Union internationale des chemins de fer), 2017, « RAIL ADAPT Adapting the railway for the future ».
- CNUCED (Conférence des Nations Unies sur le commerce et le développement), 2022, « UNCTAD Handbook of Statistics », disponible à l'adresse <https://unctadstat.unctad.org/EN/Index.html> (date de consultation : 22 janvier 2023).
- CEE, 2020, « Climate Change Impacts and Adaptation for Transport Networks and Nodes », Genève.
- USDOT, 2021, « Climate Action Plan - Revitalizing Efforts to Bolster Adaptation and Increase Resilience », Office of the Secretary of Transportation, Washington. https://www.transportation.gov/sites/dot.gov/files/2021-10/Climate_Action_Plan.pdf.
- USGCRP (U. S. Global Change Research Programs Fourth National Climate Assessment), 2018, « Impacts, Risks, and Adaptation in the United States: Fourth National Climate Assessment », Volume II [Reidmiller, D. R., C. W. Avery, D. R. Easterling, K. E. Kunkel, K. L. M. Lewis, T. K. Maycock et B. C. Stewart (dir. Publ.)], U. S. Global Change Research Program, Washington, États-Unis, 1515 pp. doi : 10.7930/NCA4.2018.
- Vajjarapu, H., Verma, A. et A. Hemanthini, 2020, « Evaluating climate change adaptation policies for urban transportation in India », in *International Journal of Disaster Risk Reduction*, Volume 47. 101 528, SSN 2212-4209, <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2020.101528>.
- Van Houtven, G., Gallaher, M., Woollacott, J. et Decker, E., 2022, « Act Now or Pay Later: The Costs of Climate Inaction for Ports and Shipping », Environmental Defense Fund et RTI International. <https://www.edf.org/sites/default/files/press-releases/RTI-EDF%20Act%20Now%20or%20Pay%20Later%20Climate%20Impact%20Shipping.pdf>.

- WEF (Forum économique mondial), 2019, « The Global Risks Report 2019 », quatorzième édition, Forum économique mondial, Genève, ISBN : 978-1-944835-15-6.
- Wright, K. M. et C. Hogan, 2008, « The Potential Impacts of Global Sea Level Rise on Transportation Infrastructure », ICF International, Washington (2008).
- Yesudian, A. N. et R. J. Dawson, 2021, « Global analysis of sea level rise risk to airports », in *Climate Risk Management* 31, <https://doi.org/10.1016/J.CRM.2020.100266>.
-