

Plan National d'Adaptation au Changement Climatique, volet infrastructures et systèmes de transport | Action 3

Analyse des risques liés aux événements climatiques
extrêmes sur les infrastructures, systèmes et services
de transport | Recueil de concepts

Rédaction et relecture du rapport principal

CEREMA / DTecEMF

Claire Galiana

Guirec Prevot

CEREMA / DTecITM

Anne-Laure Badin / **pilotage**

Sophie Cariou

Marie Colin / **pilotage**

François Combes

Charlotte Coupe

Christian Cremona

Xavier Delache

Marc Di Martino / **pilotage**

Étienne Hombourger

Raphaël Jannot

Fabien Palhol

Yves Rougier

Yannick Tardivel

Jean-Marc Tarrieu

CEREMA / DTecTV

Marine Lericolais

CEREMA / DTerEst

Kevin Dehecq

Karl Marotta

CEREMA / DTerMed

Anne Chanal

Céline Trmal

CEREMA / DTerNC

Thomas Anselme

Rédaction et relecture du rapport principal (suite)

CEREMA / DTerNP

Véronique Berche

DGITM

Charlotte Coupé

Olivier Gavaud

André Leuxe

STAC

Catherine Bonari

Aubin Lopez

Rédaction des résumés des études de cas (annexes)

CEREMA / DTecITM

Marie Colin

Florence Comes

Étienne Hombourger

Sommaire

Avertissement	6
Avant-propos	7
Introduction	8
Chapitre I	10
1 - Méthodologie générale de l'analyse de risque et principaux concepts.....	11
1.1 - Concepts et définitions.....	11
1.2 - Approche méthodologique pour l'analyse de risque.....	14
1.3 - Liens avec les stratégies et mesures de protection.....	17
Chapitre II	18
2 - Cadre organisationnel du management du risque.....	19
2.1 - Cadre général.....	19
2.2 - Contextualisation de la démarche.....	21
2.3 - Premiers éléments de mise en œuvre de la démarche.....	21
Chapitre III	22
3 - Comment caractériser les aléas ?.....	23
3.1 - Connaître les aléas climatiques et leurs évolutions attendues dans le cadre du changement climatique.....	23
3.2 - Choix des aléas.....	25
3.3 - Caractérisation des aléas retenus.....	26
3.4 - Notation des aléas.....	27
3.5 - Références bibliographiques et cartographiques nécessaires à la caractérisation des aléas.....	28
Chapitre IV	33
4 - Comment caractériser la vulnérabilité physique d'un réseau de transport ?.....	34
4.1 - Notions de vulnérabilité physique et de criticité physique.....	34
4.2 - Découpage du réseau de transport étudié en systèmes ponctuels de transport et composants.....	35
4.3 - Vérification de la vulnérabilité du réseau face à un aléa.....	37
Chapitre V	41
5 - Comment évaluer la vulnérabilité fonctionnelle d'un réseau de transport ?.....	42
5.1 - Fonctions d'un réseau de transport.....	42
5.2 - Principes de l'analyse de criticité fonctionnelle.....	43
5.3 - Mener une analyse de criticité fonctionnelle.....	45
Chapitre VI	52
6 - Réalisation de l'analyse de risque.....	53
6.1 - Présentation de la méthode d'analyse de risque.....	53
6.2 - Réalisation des matrices de criticité physique et de risque.....	54
6.3 - Vers une cartographie des risques : confrontation des données « transport » aux données « climat » en utilisant la matrice des risques choisie.....	59
Annexes	60
7 - Acronymes.....	63
8 - Glossaire.....	65
9 - Bibliographie.....	66
10 - Études de cas.....	69
10.1 - Plan National Adaptation au Changement climatique – Évaluation des enjeux trafic via l'utilisation d'un modèle de déplacement.....	69
10.2 - Évaluation du coût des impacts du changement climatique et de l'adaptation en France.....	70
10.3 - Climate Impacts Vulnerability Assessment – Washington State Department Of Transportation Pilot Study 74	
10.4 - Assessing vulnerability and risk of climate change effects on transportation infrastructure – Hampton Roads Virginia Pilot.....	76

<i>10.5 - Étude de vulnérabilité des aérodromes vis-à-vis du changement climatique. Méthodologie d'évaluation de la vulnérabilité des infrastructures aéroportuaires aux impacts du changement climatique</i>	<i>80</i>
<i>10.6 - Méthodologie d'estimation des impacts économiques d'une perturbation dans les réseaux de transport de marchandises.....</i>	<i>82</i>
<i>10.7 - Liste bibliographique des études de cas.....</i>	<i>85</i>

Avertissement

Malgré les limites de ce document, la DGITM a souhaité que le CEREMA puisse le diffuser, pour fournir les premières références méthodologiques, même partielles, aux acteurs. À partir de cette diffusion, le CEREMA organise la collecte des retours d'utilisateurs potentiels sur ce document et sa mise à jour au vu des documents méthodologiques de même portée au niveau européen ou international.

En plus des travaux encore en cours, les réactions et commentaires au sujet de ce document seront étudiés pour aboutir au document final qui sera présenté sous la forme d'un guide méthodologique.

Ce document n'engage pas la position de la DGITM sur la conduite d'analyse de risque et d'études de vulnérabilité des infrastructures, systèmes et services de transport, ni a fortiori sur les stratégies et mesures de traitement de cette vulnérabilité.

Avant-propos

La lutte contre le changement climatique est une priorité nationale. La Conférence internationale sur le climat de 2015 « COP 21 », qui se tiendra à Paris, aura pour objectif de parvenir à un accord international permettant de contenir le réchauffement global en deçà de 2°C.

Malgré les efforts de réduction des émissions de gaz à effet de serre déployés, des changements climatiques portant sur les températures, mais aussi le cycle global de l'eau, le recul des neiges et des glaces, l'élévation du niveau moyen mondial des mers et la modification de certains extrêmes climatiques, vont affecter de nombreux secteurs : agriculture, forêt, tourisme, pêche, biodiversité, aménagement du territoire, bâtiments, infrastructures de transport...

En sus des efforts d'atténuation, il convient de se préparer à ce changement, sans quoi il risque d'induire des coûts et des dommages bien supérieurs à l'effort d'anticipation. Il s'agit en particulier dès aujourd'hui de réduire notre vulnérabilité aux variations climatiques afin d'éviter de forts dommages environnementaux, matériels, financiers mais aussi humains.

Complément indispensable aux actions d'atténuation déjà engagées, l'adaptation au changement climatique est devenue un enjeu majeur qui appelle une mobilisation nationale. La France s'est dotée d'un plan national d'adaptation au changement climatique (PNACC) en 2011.

Les impacts du changement climatique sur les réseaux de transports 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 dans le PNACC. Elles permettent d'analyser l'impact du changement climatique, de prévenir les vulnérabilités des 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.

Le présent rapport correspond à l'action 3 du volet « infrastructures et systèmes de transport » du PNACC. Il a pour objectif de proposer des éléments de méthode pour analyser les risques liés aux événements climatiques extrêmes sur les infrastructures, systèmes et services de transport. Pour cela, ce rapport est un premier recueil de concepts appelé à s'enrichir des études de cas et d'échanges d'expérience.

Les méthodes d'analyse de la vulnérabilité des réseaux de transport aux changements climatiques sont jusqu'à présent peu développées, même si des analyses de risques à certains aléas extrêmes, et à certaines parties de réseaux ont été développées. Ce rapport propose des éléments méthodologiques, à partir de travaux de la recherche scientifique ainsi que d'études de cas. Ce rapport permettra, en lien avec les gestionnaires de réseaux, de faciliter la réalisation des études locales de la vulnérabilité des réseaux. De nouvelles études de cas sont d'ores et déjà prévues pour 2015 et 2016.

Ce document a associé l'administration centrale et le réseau scientifique et technique du ministère. Il est mis à la disposition de l'ensemble des acteurs concernés, opérateurs de transport et gestionnaires d'infrastructure, bureaux d'études et collectivités territoriales maîtres d'ouvrage, qui sont invités à se saisir de ces outils d'analyse et à partager leur retour d'expérience en vue d'enrichir ce premier recueil méthodologique.

Direction générale des infrastructures, des transports et de la mer

Mai 2015

Introduction

Le Plan National d'Adaptation au Changement Climatique – PNACC – (MEDTL, 2011) est le résultat d'une construction collective partagée¹. Il a été rendu public le 20 juillet 2011 et est d'application immédiate pour une durée de 5 ans. Il se décline dans l'ensemble des politiques publiques : santé, urbanisme, eau, biodiversité, recherche, transport, etc.

Les impacts du changement climatique sur les réseaux de transport, quel que soit le mode considéré, pourraient augmenter au cours du siècle à venir. L'importance du bon fonctionnement de ces réseaux pour la société et l'économie ainsi que leur très longue durée d'utilisation rend nécessaire leur adaptation.

Pour cela, différentes actions ont été identifiées et décrites dans la fiche infrastructures et systèmes de transport du PNACC. Elles permettront d'analyser l'impact du changement climatique, de prévenir les vulnérabilités des systèmes de transport et de préparer l'amélioration de la résistance et de la résilience des infrastructures, existantes ou futures, pour assurer la continuité et la sécurité du transport des personnes et des biens. Ces actions sont les suivantes :

- action 1 : passer en revue et adapter les référentiels techniques pour la construction, l'entretien et l'exploitation des réseaux de transport (infrastructures et matériels liés au service) en métropole et en Outre-mer ;
- action 2 : étudier l'impact du changement climatique sur la demande de transport et les conséquences sur la réorientation de l'offre de transport ;
- action 3 : définir une méthodologie harmonisée pour réaliser les diagnostics de vulnérabilité des infrastructures et des systèmes de transport terrestre, maritime et aéroportuaire ;
- action 4 : établir un état de la vulnérabilité des réseaux de transport terrestre, maritime et aéroportuaire en métropole et Outre-mer et préparer des stratégies de réponses adaptées et progressives aux problématiques du changement climatique, globales et territoriales.

À la demande de la Direction Générale des Infrastructures, des Transports et de la Mer (DGITM) du MEDDE, un groupe de travail (GT) chargé de la mise en œuvre de ces différentes actions a été constitué en 2011. Ce groupe a rassemblé des membres du réseau scientifique et technique et des gestionnaires : CEREMA (Dter et DTec), CETU, IFRECOR, RFF, SNCF, STAC, STRMTG, VNF. Il s'est réuni à plusieurs reprises pour produire, entre autres, ce recueil de concepts méthodologiques.

En amont de la conception de ce document, le GT a réalisé un diagnostic des impacts potentiels des évolutions tendanciennes du climat attendus sur :

- les référentiels techniques de conception, d'entretien et d'exploitation des infrastructures et des systèmes de transport ;
- les infrastructures et systèmes de transport existants.

Les réflexions liées à ce diagnostic ont fait l'objet du rapport « Plan national d'adaptation au changement climatique, action 1, adaptation des infrastructures de transport au changement climatique : impacts potentiels sur les infrastructures et systèmes de transport, sur leurs référentiels de conception, dimensionnement et entretien, et besoins de précisions des projections climatiques ».

¹Rapport interministériel « évaluation du coût des impacts du changement climatique » (2008, 2009), concertation nationale en mode Grenelle (2010), concertation régionale (2010), consultation citoyenne (2010), table ronde finale (2010).

La réalisation du diagnostic a nécessité de connaître les évolutions climatiques majeures décrites dans les rapports d'évaluation du GIEC² et les rapports issus de la mission d'expertise dirigée par Jean Jouzel (Peings, 2011, 2012 ; Planton, 2012). Les évolutions considérées dans ce rapport sont :

- les évolutions graduelles, par exemple : augmentation de l'indice *température moyenne journalière* ;
- les évolutions d'occurrence d'événements, par exemple : augmentation de l'indice *valeurs extrêmes des précipitations quotidiennes*.

Les impacts potentiels de ces évolutions climatiques sur le patrimoine existant ont été discutés entre spécialistes et rapportés. De nombreuses infrastructures ont été traitées : infrastructures ferroviaires, maritimes et fluviales, routières, ouvrages en terre, ouvrages d'art, remontées mécaniques et transports guidés et voiries urbaines. Plusieurs centaines de documents de conception, d'entretien et d'exploitation ont été passés en revue. Les référentiels techniques pouvant être impactés par le changement climatique ont été listés, puis classés en trois catégories, par ordre de priorité d'adaptation. Enfin, les variables climatiques dont les projections sont nécessaires pour l'adaptation des référentiels techniques ont été identifiées et analysées.

Ce travail de diagnostic conduira à l'adaptation de la doctrine technique et à la recherche de nouvelles pratiques ou de nouveaux matériaux. Il devra être complété par un travail de veille quotidienne par les services éditant et utilisant des référentiels techniques de construction, d'entretien et d'exploitation des infrastructures et systèmes de transport.

La réalisation de ce diagnostic a donc permis de préparer le travail d'adaptation des infrastructures et systèmes de transport aux évolutions graduelles et d'occurrences d'événements. Il est également possible de préparer l'adaptation des infrastructures aux événements climatiques extrêmes, non anticipables facilement et localisés, notamment à l'aide d'analyses de risque.

Le présent document vise à apporter quelques éléments méthodologiques pour la réalisation des analyses de risque, quels que soient les types d'infrastructures et de réseaux de transport concernés. Sont entendus par extrêmes, les phénomènes de faible fréquence et dont les conséquences sont fortes (IPCC, 2012). En ce qui concerne les transports, il s'agit d'événements pouvant causer des ruptures de réseau, donc de service et menacer la sécurité et l'environnement.

Ce document constitue une première contribution partielle à l'action 3 du volet infrastructures et systèmes de transport du PNACC. Il vise essentiellement à présenter les concepts pertinents pour l'analyse des risques et à présenter leurs articulations entre eux. Il ne propose donc pas à proprement parler une méthodologie d'analyse de risque.

Malgré les limites de ce document, la DGITM a souhaité que le CEREMA puisse le diffuser, pour fournir les premières références méthodologiques, même partielles, aux acteurs. À partir de cette diffusion, le CEREMA organise la collecte des retours d'utilisateurs potentiels sur ce document et sa mise à jour au vu des documents méthodologiques de même portée au niveau européen ou international.

En plus des travaux encore en cours, les réactions et commentaires au sujet de ce document seront étudiés pour aboutir au document final qui sera présenté sous la forme d'un guide méthodologique.

Ce document n'engage pas la position de la DGITM sur la conduite d'analyses de risque et d'études de vulnérabilité des infrastructures, systèmes et services de transport, ni a fortiori sur les stratégies et mesures de traitement de cette vulnérabilité.

²Sur demande de la DGITM, le diagnostic s'est appuyé sur le 4^e rapport d'évaluation du GIEC (GIEC, 2007). Les différences majeures entre les 4^e et 5^e rapports ont été également décrites (GIEC, 2013).

Chapitre I

1 - Méthodologie générale de l'analyse de risque et principaux concepts

Ce chapitre a pour objet de présenter les principaux concepts et définitions, ainsi que le cadre méthodologique pour l'analyse des risques encourus par les infrastructures et systèmes de transport face aux événements extrêmes.

Dans un premier temps, ce chapitre précise les concepts utiles pour l'approche méthodologique proposée. En effet, l'analyse de risque couvre un domaine large : risques naturels, risques industriels, sûreté de fonctionnement, sécurité publique, ... et des langages différents sont utilisés pour chacune de ces approches. Les définitions proposées ici ne remettent pas en cause les définitions utilisées dans des cadres spécialisés de l'analyse de risque, mais permettent au lecteur de comprendre à quel concept se raccroche telle définition, dans ce document.

Dans un second temps, ce chapitre présente l'approche méthodologique générale de l'analyse de risque. Celle-ci recouvre schématiquement deux volets : une analyse de criticité dite « fonctionnelle », au sens des services de transport affectés par les aléas et une analyse de criticité dite « physique », au sens des éléments unitaires, physiques, d'un réseau de transport affectés par les aléas. Cette deuxième partie traite également de l'articulation entre ces deux volets et de leur degré d'approfondissement respectif possible. Elle insiste par ailleurs sur le caractère itératif des liens entre ces deux volets.

Dans un troisième temps, ce chapitre re-situe cette méthode dans le cadre plus large des stratégies de protection ou de « renforcement » des réseaux de transport.

Les chapitres suivants proposent un approfondissement des différents points présentés dans ce premier chapitre. Enfin, pour illustrer la démarche générale d'analyse de risque, sont jointes en annexe :

- des études déjà conduites, qui utilisent, en tout ou partie, le cadre méthodologique présenté dans ce recueil méthodologique ;
- des résumés d'études de risque qui ont permis d'alimenter la réflexion relative au développement du cadre méthodologique présenté dans ce document.

1.1 - Concepts et définitions

La figure 1 permet de visualiser la terminologie adoptée.

Schématiquement, un **réseau de transport** peut être décomposé en **systèmes ponctuels** : ouvrages d'art, gares, ports, aéroports, écluses, chaussées, quais, caténaires... Ces systèmes ponctuels sont eux même des assemblages de divers **composants**.

Les *aléas* sont ici entendus comme des événements climatiques exogènes aux systèmes de transport ainsi que leurs conséquences pour les territoires. Ils sont caractérisés par une intensité, une probabilité d'occurrence spatiale et une probabilité d'occurrence temporelle. Dans le cadre du présent rapport, seuls sont pris en compte les aléas climatiques extrêmes, non anticipables facilement et localisés. Il s'agit par exemple des canicules, inondations, glissements de terrain, submersions marines, vents forts, incendies de forêt...

Ils impactent les systèmes ponctuels de transport, qui ont une **vulnérabilité physique** plus ou moins forte en fonction des caractéristiques de leurs composants, de leur résistance, de leur comportement, etc. Cette analyse du croisement entre aléas et vulnérabilités physiques des systèmes ponctuels de transport est appelée analyse de la **criticité physique**. Elle relève d'une échelle plutôt microscopique.

Pour un système de transport, les **enjeux** sont le maintien de ses fonctionnalités. Schématiquement, on peut en distinguer trois types : les fonctions indispensables de transport - par exemple l'acheminement des secours, les fonctionnalités de desserte ou d'accessibilité de certaines zones, les fonctionnalités courantes de transport.

La défaillance ou la rupture d'un système ponctuel, causée notamment par l'impact d'un aléa extrême, impacte le niveau de service d'un réseau de transport et donc le maintien (éventuellement en situation dégradée) des fonctionnalités du réseau. Cette analyse du croisement entre enjeux et **vulnérabilités fonctionnelles** des réseaux de transport est appelée analyse de la **criticité fonctionnelle**. Elle relève d'une échelle plutôt macroscopique.

La vulnérabilité d'un système de transport peut donc schématiquement être décomposée en deux niveaux :

- au niveau microscopique : la vulnérabilité physique de ses composants, qui dépend des caractéristiques physiques des composants de l'infrastructure, de leurs résistances, de leur comportement, etc ;
- au niveau macroscopique : la vulnérabilité fonctionnelle du réseau d'infrastructure qui dépend des caractéristiques fonctionnelles du réseau, sa capacité, son caractère maillé ou non, etc.

Le croisement des aléas, des vulnérabilités physiques et fonctionnelles des infrastructures et des enjeux ou encore, l'analyse croisée de la criticité physique et de la criticité fonctionnelle est appelée analyse de risque.

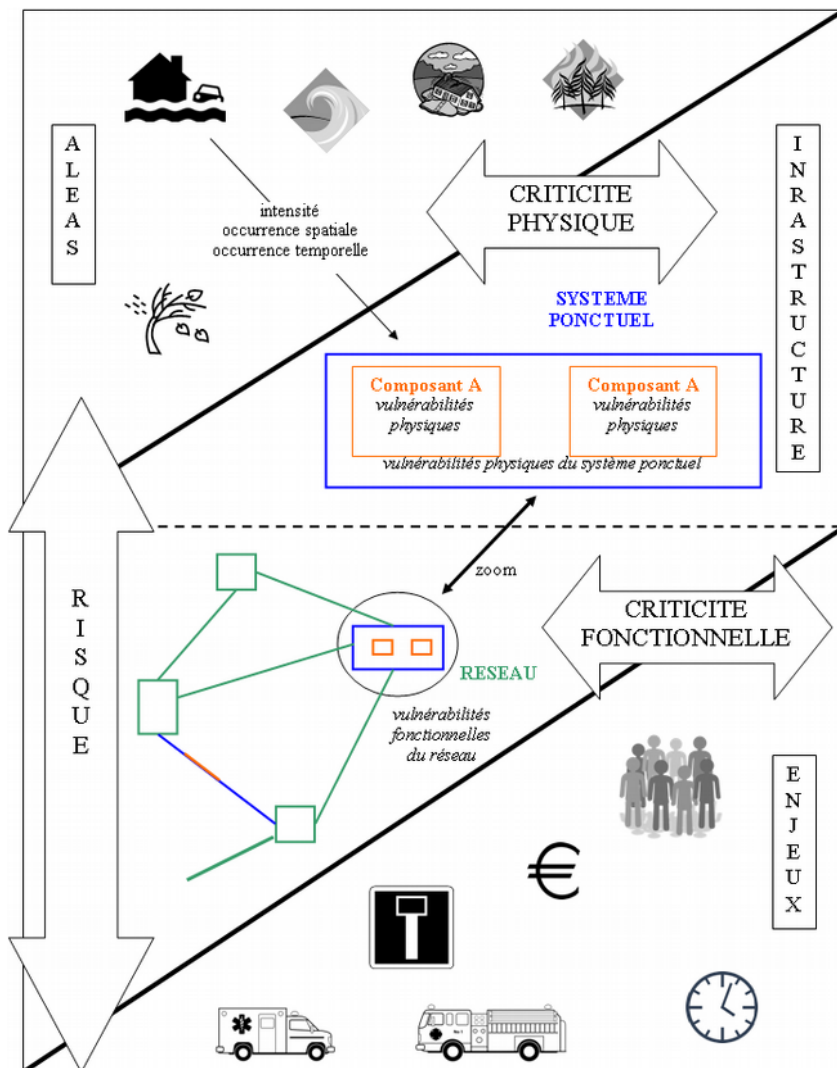


Figure 1 : Visualisation des concepts. Source : DGITM

1.2 - Approche méthodologique pour l'analyse de risque

Il convient dans un premier temps de définir le périmètre de l'analyse de risque suivant les objectifs fixés : il peut par exemple être décidé de réaliser l'analyse sur un territoire donné, le long d'un itinéraire, pour des infrastructures représentatives, les infrastructures les plus âgées... Il faut ensuite réaliser l'analyse de risque. Pour cela, il est nécessaire de croiser aléas, vulnérabilités physiques et fonctionnelles des infrastructures et enjeux. L'objectif est d'identifier les éléments du réseau les plus exposés aux aléas du changement climatique, c'est-à-dire les infrastructures présentant un risque fort. Cela revient donc à réaliser successivement des analyses de criticité fonctionnelle et physique.

D'un point de vue méthodologique, deux approches sont envisageables :

- réaliser dans un premier temps une analyse de criticité physique, c'est-à-dire déterminer l'impact de chacun des aléas sur chacun des systèmes ponctuels (et de leurs composants) du réseau de transport en fonction de ses caractéristiques et notamment de ses vulnérabilités physiques afin de déterminer quels sont les systèmes ponctuels susceptibles de subir des dommages importants. Puis, dans un second temps, à l'échelle du réseau, examiner la manière dont les défaillances des systèmes ponctuels peuvent se combiner et réaliser une analyse de criticité fonctionnelle sur le réseau, c'est-à-dire regarder comment sont affectées les fonctionnalités du système de transport par la rupture d'un ou de plusieurs systèmes ponctuels ;
- réaliser dans un premier temps une analyse de criticité fonctionnelle, c'est-à-dire, déterminer quels sont les systèmes ponctuels qui composent le réseau dont la rupture serait la plus coûteuse pour ce qui est des fonctionnalités via un croisement des enjeux avec les caractéristiques des réseaux de transport. Puis dans un second temps, réaliser une analyse de criticité physique des systèmes ponctuels identifiés comme critiques d'un point de vue fonctionnel, c'est-à-dire croiser les aléas et les vulnérabilités physiques de ces systèmes ponctuels afin de voir si les systèmes ponctuels dont la rupture est la plus coûteuse sont susceptibles de connaître effectivement une rupture lorsqu'ils sont soumis à divers aléas.

Pour réaliser ces analyses de criticité physique et fonctionnelle, il convient de pouvoir :

- caractériser les aléas (chapitre 3). Il s'agit entre autres de préciser les évolutions climatiques attendues dans le cadre du changement climatique, les types d'aléas retenus pour mener l'analyse et d'identifier leurs caractéristiques : intensité, probabilité d'occurrence spatiale et probabilité d'occurrence temporelle. Des références bibliographiques et cartographiques sont notamment fournies ;
- caractériser la vulnérabilité physique d'un réseau de transport (chapitre 4) exposé à un aléa. Il s'agit de décomposer le réseau étudié en systèmes ponctuels et composants, puis d'évaluer la vulnérabilité de chacun des composants et des systèmes ponctuels aux divers aléas, ainsi que la vulnérabilité globale des systèmes ;
- caractériser le fonctionnement du réseau de transport en cas de dégradation ou de rupture d'un de ses systèmes ponctuels (chapitre 5). Il s'agit de décrire les fonctionnalités des réseaux de transport et d'évaluer l'impact de la perte de capacité ou de la rupture d'un segment de réseau sur ces fonctionnalités, de manière qualitative ou quantitative.

Le croisement des analyses de criticité physique et fonctionnelle aboutit finalement à l'analyse de risque (chapitre 6). En pratique, les analyses de criticité fonctionnelle et physique peuvent être menées de façon concomitante, afin d'affiner progressivement l'analyse sur les cas où le niveau de risque est important. Il est possible de distinguer deux niveaux d'analyse :

- l'analyse simplifiée : il s'agit de caractériser les aléas, les vulnérabilités physiques et fonctionnelles des infrastructures et les enjeux à partir de dires d'experts ou de retours

d'expériences. En effet, les services en charge de la gestion des infrastructures de transport disposent généralement au sein de leur structure de viviers d'experts qui connaissent très bien le réseau ou les infrastructures ponctuelles dont ils sont responsables. Ces experts peuvent être sollicités pour produire des avis sur les vulnérabilités physiques ou fonctionnelles des réseaux de transport. Il en va de même pour les experts aléas sur un territoire donné. Les experts peuvent également s'appuyer sur une analyse historique des événements climatiques passés pour établir des scénarios d'impacts physiques et fonctionnels sur les réseaux ;

- l'analyse détaillée : ce type d'analyse consiste à recourir à des études scientifiques et techniques fines permettant de caractériser – via l'utilisation d'outils et de modèles souvent complexes – les aléas (modèles climatiques), les comportements des infrastructures ponctuelles (calcul de structure, sûreté de fonctionnement) face à ces aléas, et le fonctionnement du réseau de transport (modèles de déplacement) en cas de dégradation ou de rupture d'un ou plusieurs segments.

Les outils et modèles requis pour l'analyse détaillée peuvent être coûteux à développer et leur utilisation peut être chronophage. Il est donc généralement difficile de les utiliser pour réaliser une analyse de risque détaillée de manière exhaustive sur un territoire donné. Il convient donc de procéder par itérations successives, en adaptant à chaque niveau les méthodes mobilisées : analyse simplifiée ou analyse détaillée.

À chaque étape, il convient de distinguer :

- les infrastructures présentant une criticité physique ou fonctionnelle faible et donc, un risque faible ;
- les infrastructures présentant une criticité physique ou fonctionnelle moyenne ou forte. Pour ces infrastructures, le risque est potentiellement fort. Il convient donc de procéder à des analyses complémentaires.

Dans certains cas, les analyses simplifiées ne permettent pas de connaître le niveau de criticité physique ou fonctionnelle. Dans ce cas, il convient naturellement de procéder à des analyses détaillées.

La figure 2 donne un exemple de méthode d'analyse commençant par l'analyse de la criticité fonctionnelle.

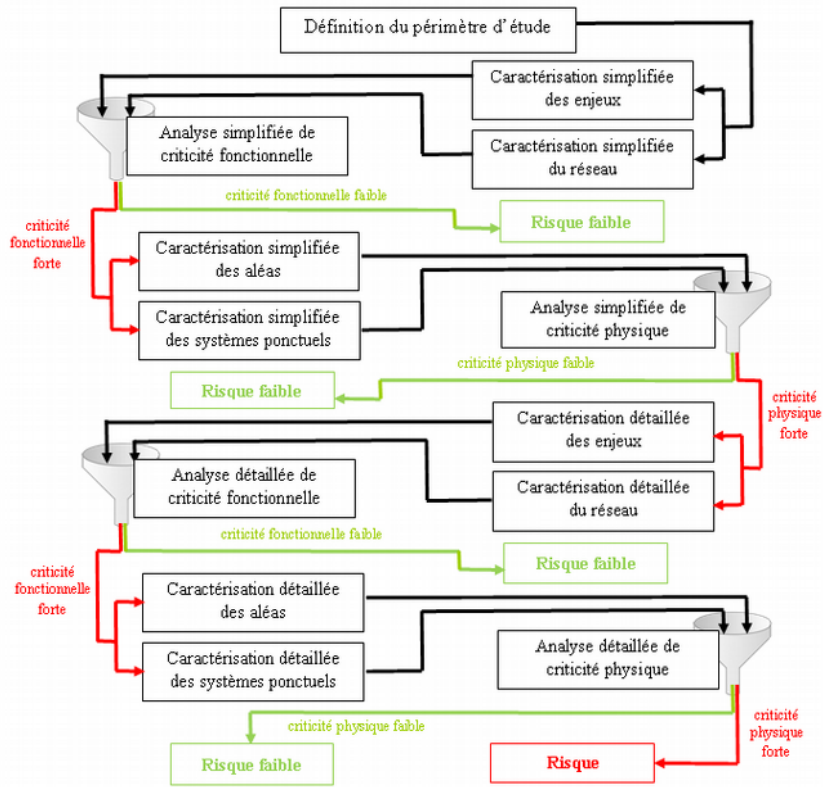
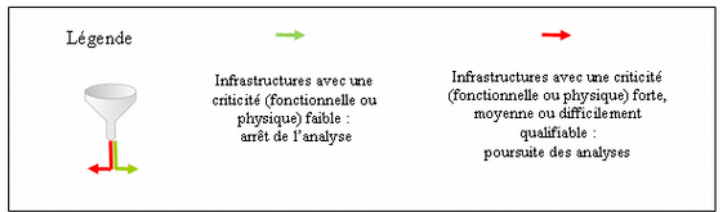


Figure 2 : Exemple de méthode d'analyse de risque. Source : DGITM

1.3 - Liens avec les stratégies et mesures de protection

Après avoir identifié grâce à l'analyse de risque les systèmes et / ou réseaux à niveau de risque important, il est possible dans un second temps d'identifier les « mesures de protection » à mettre en place afin de diminuer le niveau de risque.

Ces mesures de protection peuvent prendre des formes très diverses. Elles peuvent se situer au niveau des différents composants du risque : au niveau des aléas (ex : construction de digues), de l'infrastructure (ex : renforcement des structures, augmentation de la capacité des réseaux, gestion du trafic) ou encore des enjeux (ex : relocalisation de certaines activités, desserte spécifiquement renforcée pour les lieux de secours et de soins). Par ailleurs, les mesures de protection peuvent être techniques ou organisationnelles.

Il conviendra alors de mener une évaluation des coûts et des avantages de la mise en place d'une mesure ou d'une combinaison de mesures de protection du réseau de transport.

Chapitre II

2 - Cadre organisationnel du management du risque.

L'impact potentiel du changement climatique sur ces infrastructures est au cœur du présent document qui vise à proposer un cadre d'analyse de risque. Ce dernier est destiné à fournir aux maîtres d'ouvrages, gestionnaires, opérateurs, etc., un outil de diagnostic qui peut les aider à considérer le changement climatique et ses impacts dans la planification, le développement, le renouvellement, l'entretien et la gestion de leurs infrastructures. Ce cadre doit donc :

- favoriser une bonne pratique de la planification, du développement, du renouvellement, de l'entretien et de la gestion sur la base de risques encourus. Ces bonnes pratiques doivent aider les organismes à contribuer à l'élaboration d'une politique efficiente d'investissement ;
- favoriser la soutenabilité à long terme des infrastructures par une meilleure compréhension de la vulnérabilité au changement climatique et des possibilités d'adaptation.

Il est indispensable, d'une part, de s'assurer que les risques du changement climatique peuvent être déterminés avec précision et, d'autre part, de fournir la nature et le calendrier des réponses au changement climatique afin de s'assurer d'une gestion optimale des réseaux d'infrastructures par les maîtres d'ouvrages et opérateurs.

2.1 - Cadre général

Les théories d'analyse de risque et de maîtrise des risques ont suscité au cours de ces dernières années un intérêt grandissant. Elles consistent à gérer le risque en l'identifiant, l'analysant, et évaluant la nécessité de le modifier par un traitement spécifique pour satisfaire à des exigences prédéfinies. L'analyse de risque apparaît également comme une méthode structurée pour appliquer le principe de précaution et pour réaliser certains choix stratégiques. En ce sens, son cadre général est bien adapté à l'appréciation des conséquences induites sur les systèmes de transport vis-à-vis du changement climatique.

La norme NF-ISO-31000 (2010) définit clairement le cadre organisationnel de la gestion / management du risque. Le succès de ce dernier dépendra en grande partie de l'efficacité du cadre institutionnel décrit par la figure 3.

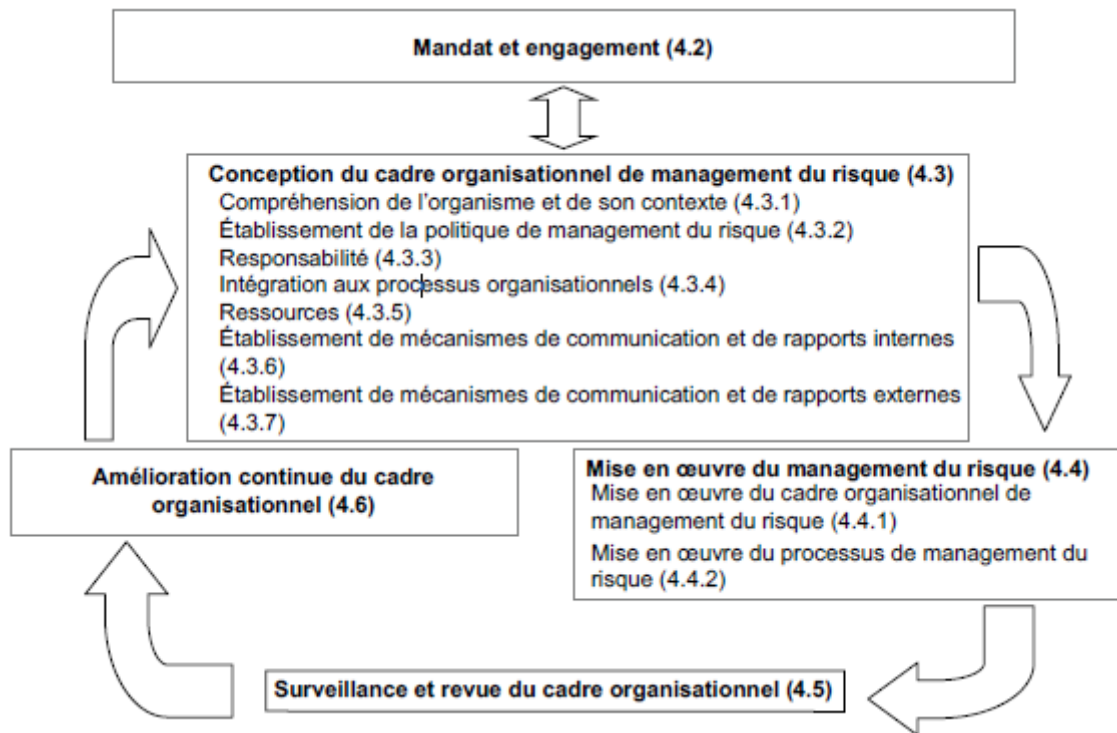


Figure 3 : Cadre organisationnel du management du risque. Source : NF-ISO-31000 (2010)

Ce cadre n'est pas destiné à prescrire un système de management, mais plutôt à aider les maîtres d'ouvrages et les opérateurs à intégrer le management du risque dans leur système de management global. Ces derniers doivent l'adapter et le décliner aux besoins spécifiques. Le processus de management du risque par lui-même est décrit par la figure 4.

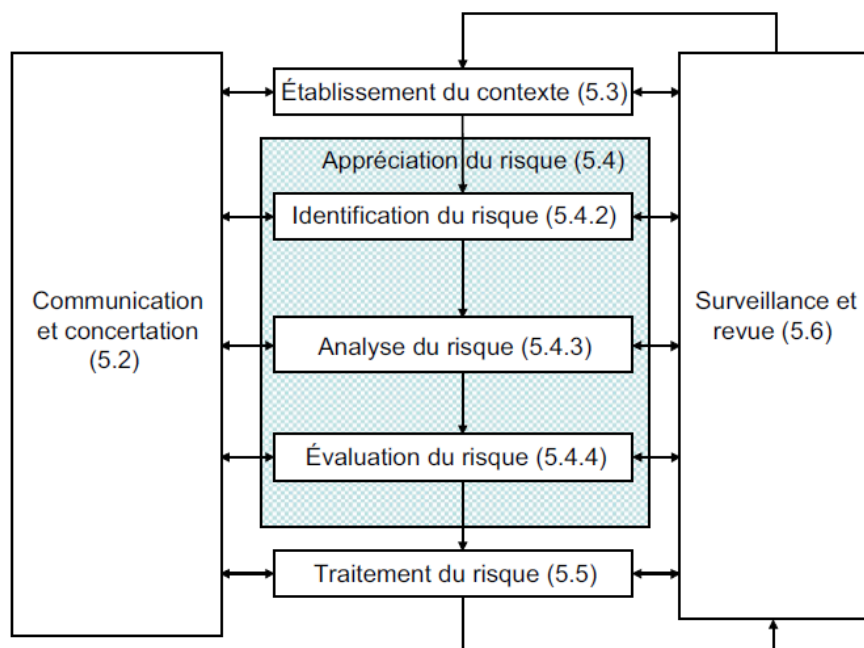


Figure 4 : Processus de management des risques. Source : NF-ISO-31000 (2010)

2.2 - Contextualisation de la démarche

En premier lieu, l'efficacité d'une approche par management du risque sera conditionnée par l'engagement fort et durable du maître d'ouvrage ou de l'opérateur de l'infrastructure. Celui-ci doit définir et approuver la politique de management du risque et fixer des indicateurs de performance du management cohérents avec sa stratégie de gestion.

En second lieu, la norme NF-ISO-31000 (2010) insiste sur l'importance d'évaluer et de comprendre le contexte (environnement) interne et externe, car il influence la conception du cadre organisationnel. Le contexte externe inclut l'environnement social et culturel, politique, légal, réglementaire, financier, etc., les relations avec les parties prenantes externes, leurs perceptions du risque notamment... Le contexte externe est multi-échelle par nature : à ce titre, une attention particulière doit être apportée au contexte international en matière de politique d'adaptation au changement climatique, mais aussi local (région, département...). Le contexte interne recouvre tout ce qui, au sein de la maîtrise d'ouvrage ou de l'organisation opératrice, peut influencer la manière dont le risque sera géré (culture, processus, stratégie...). Le contexte interne est supposé être peu influencé par l'échelle d'étude (international/national/local). Néanmoins des spécificités dans l'organisation peuvent exister et doivent donc être prises en compte. Il convient enfin de fixer les objectifs, les stratégies, les domaines d'application et les paramètres des activités de l'opérateur où le processus de management du risque s'applique. Ceci couvre notamment la nécessité de justifier et de spécifier les ressources servant à sa mise en œuvre, et d'explicitier les responsabilités et la traçabilité des actions (figure 4).

2.3 - Premiers éléments de mise en œuvre de la démarche

Une des premières étapes de la réalisation d'une analyse de risque est la définition de ses objectifs, qui va de pair avec le choix du territoire étudié. Cette étape conditionne notamment le choix des ressources à mobiliser, la méthodologie de l'analyse (chapitre 6.1), etc.

Pour réaliser une analyse de risque, il est d'usage de constituer un groupe de travail où sont représentés :

- des spécialistes des transports, par exemple une association, des personnes chargées de l'exploitation, l'entretien et de l'évolution et du renforcement technique des réseaux ;
- des spécialistes du climat, capables d'apporter des informations sur les événements météorologiques passés et les évolutions du climat attendues ;
- des spécialistes du territoire étudié, ayant une connaissance générale de leur territoire : aléas passés, enjeux locaux, fonctionnement pratique des réseaux de transport, etc. ;
- d'autres spécialistes, selon les besoins et objectifs de l'analyse de risque et notamment, des spécialistes des réseaux d'énergie et de communication. En effet, une dégradation de ces réseaux peut impacter le fonctionnement des réseaux de transport.

Les spécialistes du groupe de travail vont être amenés à échanger fréquemment, notamment pour décider d'une échelle de valeur commune pour les deux variables nécessaires à l'analyse de criticité physique : occurrence des aléas et niveau de vulnérabilité physique des réseaux étudiés. De la même manière, les membres du groupe de travail doivent s'entendre sur une échelle concernant la criticité fonctionnelle.

Chapitre III

3 - Comment caractériser les aléas ?

Pour évaluer les criticités physique et fonctionnelles des réseaux de transport, il est nécessaire de connaître les aléas impactant le territoire étudié et leurs évolutions attendues dans le cadre du changement climatique, ainsi que leurs impacts potentiels sur les réseaux de transport. Tous les aléas ne peuvent être traités dans le cadre d'une analyse de risque : seuls ceux dont les impacts sont les plus significatifs doivent être retenus. Il faut ensuite caractériser ces aléas et évaluer la probabilité qu'ils impactent les réseaux étudiés en leur attribuant une note.

Ces étapes sont principalement réalisées par des spécialistes du climat, en dialogue avec des spécialistes des transports.

3.1 - Connaître les aléas climatiques et leurs évolutions attendues dans le cadre du changement climatique

De nombreuses études, mondiales, nationales et régionales mettent l'accent sur les impacts physiques susceptibles d'affecter le domaine des transports du fait des évolutions tendancielle des aléas climatiques et des évolutions des événements extrêmes (URS, 2010 ; IPCC, 2012). Ces impacts dépendent naturellement de la zone géographique considérée et du contexte socio-économique. Les évolutions des températures, de la pluviométrie, du vent, du climat de houle et des niveaux de l'eau et enfin, des événements extrêmes semblent constituer les principaux effets du changement climatique sur le secteur du transport (CGEDD, 2013 ; EEA, 2012 ; FHWA, 2012).

Le tableau ci-dessous présente les principales évolutions climatiques attendues de ces variables, ainsi que des aléas qu'ils entraînent (EEA, 2012 ; GIEC, 2007, 2013 ; Peings, 2011, 2012 ; Planton, 2012). Il est à noter que l'évolution de la biodiversité a également été prise en compte, car elle pourrait impacter le domaine des transports aériens.

Variable climatique concernée	Évolutions climatiques retenues	
	Évolutions tendancielles	Exemples d'aléas extrêmes
Température	Augmentation des températures moyennes en France	Augmentation des périodes de sécheresse à l'horizon 2100 Augmentation des valeurs extrêmes de température Augmentation du nombre de jours de vagues de chaleur Canicule Incendie de forêt
Précipitations	Évolution de la pluviométrie	Augmentation des valeurs extrêmes et du nombre de jours des précipitations Diminution du nombre de jours de chutes de neige Inondation Glissement de terrain, éboulement, coulée de boue, chute de pierres, etc.
Vent	Evolution des régimes de vent	Évolution des régimes de vents violents Vent violent : tempête, tornade, etc.
Climat de houle et niveau marin	Augmentation du niveau de la mer (érosion et submersion permanente)	Surcote marine (submersion temporaire)
Niveau des eaux souterraines	Évolution du niveau des eaux souterraines diminution des débits fluviaux en lieu avec l'augmentation du nombre de jours de canicules.	Évolution du niveau des eaux souterraines Inondation
Événements extrêmes		Modification du régime cyclonique Cyclone
Biodiversité	Évolution de la biodiversité (augmentation du péril animalier) Augmentation du nombre d'oiseaux migrateurs du fait de l'augmentation des températures, Augmentation de la prolifération des algues dans les cours d'eau due à l'augmentation du nombre de jours de canicules	

Tableau 1 : Exemples d'extrêmes climatiques et d'aléas liés

Cette liste d'aléas n'est pas exhaustive et pourra être complétée dans le cadre de l'analyse de risque. Pour cela, il est nécessaire de chercher des références bibliographiques relatives à la compréhension du changement climatique et des évolutions attendues de variables climatiques. Des références sont données au chapitre 3.5.

3.2 - Choix des aléas

Pour des raisons pratiques, il n'est pas possible de retenir l'ensemble des aléas listés au cours de l'étape précédente (chapitre 3.1). Comment choisir les aléas pertinents pour l'analyse de criticité physique (FHWA, 2012 ; STAC, 2013 ; VDOT, sans date ; WSDOT, 2011) ?

En première approche, il est possible de retenir l'ensemble des aléas présentés au chapitre 3.1, ainsi que de leurs conséquences potentielles sur les territoires. Il s'agit par exemple de l'évolution des populations de certaines espèces d'oiseaux migrateurs liée à la hausse moyenne des températures, de l'augmentation de la prolifération des algues dans les cours d'eau due à l'augmentation du nombre de jours de canicules, de la diminution des débits fluviaux en lieu avec l'augmentation du nombre de jours de canicules, etc.

La liste d'aléas à étudier sera ensuite modifiée :

- selon les objectifs de l'analyse de risque. Certaines études de risque peuvent choisir de se centrer sur un aléa, ou encore sur tous les aléas susceptibles de se produire sur un territoire donné ;
- selon le périmètre de l'analyse de risque : territoire étudié (2.3), horizons temporels choisis, etc.

Enfin, les échanges entre les experts, sur la base de leur connaissance des événements passés qui ont impactés les infrastructures, peuvent aider à préciser encore la liste des aléas à étudier. Ainsi, à ce stade, il est possible de déjà retenir les aléas susceptibles d'avoir un impact significatif sur ces systèmes, afin d'avoir une vision la plus « optimale » sur les problématiques éventuelles dues au changement climatique. Déterminer et choisir ces aléas potentiellement impactant se fait de façon itérative, en parallèle de la décomposition des réseaux étudiés en systèmes et composants. Une méthodologie de décomposition est proposée au chapitre 4.2 : elle permet d'aboutir à une description fine des réseaux étudiés, les éléments de description peuvent être repris dans une matrice (chapitre 4). Il est possible d'utiliser cette matrice pour vérifier l'impact de chaque aléa sur les réseaux considérés.

Il est intéressant de commencer par une vérification de l'impact possible des aléas listés sur les réseaux étudiés en restant à un faible niveau de détail. Pour cela, il est possible de reprendre la liste d'aléas constituée précédemment (chapitre 3.1) et de vérifier leurs impacts potentiels sur les grandes familles de systèmes ponctuels constitutifs des réseaux étudiés (chapitre 4.3). Le résultat peut également être présenté sous forme de tableau (tableau 2).

		Aléas à retenir éventuellement		
		Aléa n°1	Aléa n°2	...
Réseaux étudiés	Famille de systèmes ponctuels n°1	Impact de l'aléa n°1 sur la famille de systèmes ponctuels n°1 ?	Impact de l'aléa n°2 sur la famille de systèmes ponctuels n°1 ?	...
	Famille de systèmes ponctuels n°2	Impact de l'aléa n°1 sur la famille de systèmes ponctuels n°2 ?	...	
		

Tableau 2 : Tableau de vérification des impacts potentiels des aléas sur les réseaux étudiés, à un faible niveau de détail

Au fur et à mesure de la réalisation de l'étape de décomposition des réseaux étudiés (chapitre 4.2), il est possible de préciser l'impact potentiel des aléas sur ces réseaux (chapitre 4.3). À ce moment, il sera possible de retenir de nouveaux aléas ou de décider de ne pas retenir tous ceux précédemment listés. Le résultat se présente à nouveau sous la forme d'un tableau. (tableau 3)

			Aléas à retenir éventuellement		
			Aléa n°1	Aléa n°2	...
Réseaux étudiés	Système ponctuel n°1	Composant n°1	Impact de l'aléa n°1 sur le composant n°1 ?	Impact de l'aléa n°2 sur le composant n°1 ?	...
		Composant n°2	Impact de l'aléa n°1 sur le composant n°2 ?	...	
			
	Système ponctuel n°2	Composant n°1			
		Composant n°2			
		...			
	...				

Tableau 3 : Tableau de vérification des impacts potentiels des aléas sur les réseaux étudiés, à un niveau fin de détail

3.3 - Caractérisation des aléas retenus

Après avoir déterminé les aléas dont l'impact peut être significatif pour les réseaux étudiés, il est nécessaire de les caractériser pour le présent et le futur et donc, de définir des scénarios climatiques. Ceci permet par la suite d'évaluer leur probabilité d'occurrence, indispensable pour la réalisation de l'analyse de criticité physique.

En gestion des risques, un aléa est caractérisé par :

- *une intensité*. Elle traduit la quantification d'un événement. Elle peut être mesurée ou estimée. En pratique, il existe des seuils des classes relatifs au phénomène climatique étudié – pluie, gel, neige, vent, chaleur, etc. (GIEC, 2007, 2013 ; Peings, 2011, 2012 ; Planton, 2012) ;
- *une occurrence spatiale : prédisposition et extension*. Elle est conditionnée par des facteurs de prédisposition ou de susceptibilité, par exemple géologique. L'extension spatiale de l'aléa peut être d'une part, très variable, de très locale (quelques km²) à nationale et, d'autre part, difficile à estimer. C'est le cas par exemple pour une avalanche ou un mouvement de terrain. Il convient également de différencier l'occurrence spatiale de l'aléa et le territoire impacté : des précipitations très localisées peuvent entraîner des inondations à large échelle ;
- *une occurrence temporelle de l'aléa : instant et durée*. Elle peut être estimée qualitativement (négligeable, faible, forte) ou quantitativement par périodes de retour (décennale à centennale par exemple). La durée du phénomène doit être également prise en compte et peut varier de l'ordre de l'heure, de la journée, de la semaine ou du mois.

Il peut être intéressant de définir :

- des scénarios d'évolutions climatiques plutôt pessimistes, plutôt optimistes et enfin, médians, pour tenir compte des incertitudes liées aux projections climatiques ;
- ou des scénarios à différentes échelles de temps, par exemple aux horizons 2030, 2050, voire 2100. Ceci permet de tenir compte des évolutions des aléas attendues dans le cadre du changement climatique : l'intensité et la durée de chaque aléa peut en effet augmenter ou baisser, la période de retour peut évoluer : un événement bi-décennal pouvant devenir décennal, etc. Par ailleurs, définir des scénarios à différentes échelles de temps permet de travailler à la fois sur des stratégies d'adaptation à court et long termes.

Dans ce cas, la caractérisation des aléas sera réalisée plusieurs fois : à un scénario sera associé une analyse de criticité physique et donc, une analyse de risque. La définition de scénarios permet également de prendre en compte les combinaisons potentielles d'aléas. Par exemple, il est possible de définir un scénario avec augmentation de l'intensité des événements pluvieux extrêmes, auquel pourra être associé des inondations plus fréquentes.

L'intensité, la probabilité d'occurrence spatiale et la probabilité d'occurrence temporelle doivent être renseignées dans le tableau, lorsque c'est possible, pour chaque aléa et chaque scénario. L'occurrence temporelle et / ou l'intensité sont déterminantes pour la phase de notation de l'aléa, tandis que l'occurrence spatiale intervient plus en aval de l'analyse de criticité physique.

3.4 - Notation des aléas

Après avoir caractérisé les aléas climatiques, les spécialistes du climat et des réseaux de transport doivent évaluer l'importance de leurs impacts pour définir une stratégie de prévention et d'adaptation. Il faut alors définir une échelle adaptée pour noter la probabilité d'occurrence temporelle de l'aléa et / ou son intensité. Il s'agit en pratique d'établir des définitions pour chaque niveau de l'échelle et de répondre ainsi collégalement aux questions du type : qu'est-ce qu'une occurrence/intensité forte/moyenne/faible d'un aléa climatique ? Une fois tous les 1, 2, ..., 10 ans ? Etc.

Un exemple d'échelle à quatre niveaux prenant en compte l'occurrence temporelle est donné dans le tableau ci-dessous (tableau 4). D'autres exemples sont également disponibles dans la bibliographie.

Classe	Catégorie Fréquence	Description	Probabilité d'occurrence par heures de service
4	Probable	L'événement redouté est susceptible d'apparaître plusieurs fois au cours de la vie du système.	$> 10^{-5}$
3	Rare	L'événement redouté est susceptible d'apparaître une fois au cours de la vie du système.	$10^{-5}-10^{-7}$
2	Improbable	L'événement redouté est très peu probable, mais le risque d'apparition pendant la vie du système n'est pas nul.	$10^{-7}-10^{-9}$
1	Extrêmement improbable	L'événement redouté est si peu probable que le risque d'apparition pendant la vie du système peut être considéré comme nul.	$< 10^{-9}$

Tableau 4 : Exemple d'échelle à 4 niveaux, utilisée pour caractériser la probabilité des événements climatiques retenus dans le cadre d'une analyse de risque donnée

À ce stade, pour préparer l'étape de croisement « aléas x vulnérabilité physique » de l'analyse de criticité physique (6.2.2), il est conseillé de consigner dans un tableau les éléments suivants :

- les aléas retenus ;
- leurs caractéristiques, décrites selon la méthodologie proposée en 3.3 ;
- leur notation selon l'échelle définie comme indiqué précédemment.

Le résultat obtenu peut se présenter sous la forme d'un tableau (tableau 5).

Aléas retenus		
Aléa n°1	Aléa n°2	...
Caractéristiques	Caractéristiques	...
Note attribuée à l'aléa n°1	Note attribuée à l'aléa n°2	...

Tableau 5 : Tableau de synthèse des éléments de caractérisation et des notes attribuées aux aléas retenus

3.5 - Références bibliographiques et cartographiques nécessaires à la caractérisation des aléas

Il est utile d'avoir accès à des bases de données sur les évolutions climatiques attendues dans le cadre du changement climatique et les statistiques des événements climatiques passés. Ceci permet, d'une part, de connaître les aléas climatiques potentiellement impactant, leurs évolutions attendues dans le cadre du changement climatique et, d'autre part, de choisir puis caractériser ceux nécessaires à l'analyse de risque. Quelques bases de données et leurs utilisations possibles dans le cadre des analyses de risque sont présentées dans les paragraphes ci-dessous.

3.5.1 - Comprendre le changement climatique

Changement climatique :

« un changement dans l'état du climat qui peut être identifié (p.e. à l'aide de tests statistiques) par des changements dans la moyenne et / ou dans la variabilité de ses propriétés, persistant sur une longue durée, typiquement des décennies ou plus. Le changement climatique peut avoir pour origine des processus naturels internes, des forcages ou des modifications humaines persistantes dans la composition de l'atmosphère ou l'utilisation des territoires. »

(IPCC, 2012)³

Les membres du Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat (GIEC) sont unanimes : « Le réchauffement du système climatique est sans équivoque » (GIEC, 2007). Les conclusions du groupe, exposées dans son 5^{ème} rapport publié en 2013, sont formelles : le changement climatique est en cours et ses effets auront des conséquences sur le climat à court et moyen termes. Les précédents travaux du GIEC (le 4^{ème} rapport – GIEC, 2007) ont été validés par l'Académie des sciences en octobre 2010, notamment sur la réalité du réchauffement climatique, sur la responsabilité principale des émissions anthropiques dans ce phénomène et sur l'importance d'une modélisation du climat futur. C'est donc sur les scénarios du 4^{ème} rapport que se baseront les chapitres suivants.

³La notion d'événement climatique extrême correspond dans ce rapport à la définition proposée par le Groupe International d'Experts Climat (GIEC) dans son *Rapport spécial sur la gestion des risques de catastrophes et de phénomènes extrêmes pour les besoins de l'adaptation au changement climatique* (SREX) (IPCC, 2012).

Principe général de la modélisation climatique

Les modèles climatiques sont des outils mathématiques très complexes, capables de reconstituer l'évolution des éléments qui composent le système climatique. Le principe des modèles climatiques repose sur la représentation mathématique, par un ensemble d'équations, des phénomènes physiques qui gouvernent l'évolution de l'atmosphère et de l'océan. Ces équations sont mises en place sur une grille de calcul qui recouvre, avec un maillage à différentes résolutions, la surface du globe, l'épaisseur de l'atmosphère et la profondeur de l'océan. La résolution de ces équations aux différents points du maillage et la confrontation de ces résultats à ceux observés permettent d'améliorer les équations et le paramétrage utilisés. Une des entrées qu'il est nécessaire de fournir à ces modèles climatiques est l'évolution de la concentration de l'atmosphère en gaz à effet de serre (GES).

Scénarios climatiques

Le GIEC a proposé différents scénarios d'évolutions possibles des émissions anthropiques et des concentrations en GES et particules pour le XXI^e siècle :

- le scénario A1 est associé à une croissance économique rapide, à une population mondiale atteignant un maximum au milieu du siècle avant de décliner et au développement de nouvelles technologies plus efficaces. Il est aussi caractérisé par une convergence entre régions, en particulier du revenu par habitant. Dans le cas du scénario A1, l'évolution technologique respecte un équilibre entre les sources d'énergie ;
- le scénario A2 est associé à un monde très hétérogène, avec un développement économique essentiellement régional, un accroissement continu de la population et une évolution technologique plus lente que pour les autres scénarios ;
- le scénario B1 décrit un monde convergent avec une population mondiale culminant au milieu du siècle comme pour le scénario A1. L'accent est placé sur des solutions mondiales orientées vers une viabilité économique, sociale et environnementale, y compris une meilleure équité ;
- le scénario B2 décrit un monde où l'accent est placé sur des solutions locales dans le sens de la viabilité économique, sociale et environnementale. La population mondiale s'accroît de manière continue mais à un rythme plus faible que dans le scénario A2. L'évolution technologique est moins rapide et plus diversifiée que dans les scénarios B1 et A1.

Il convient de prendre conscience qu'une analyse de risque peut se baser sur d'autres scénarios, compte tenu de l'évolution rapide des études et projections sur le sujet.

Modèles climatiques

Que nous réserve le siècle prochain ? On pense que les évolutions des températures, des précipitations, des événements extrêmes et des niveaux d'eau constitueront les principaux effets du changement climatique sur le secteur des transports. Pour mieux comprendre ce qui pourrait survenir dans un futur proche ou plus lointain, les scénarios du GIEC ont été utilisés dans des modèles climatiques à l'échelle de la France, dans le cadre d'une mission d'expertise confiée à Jean Jouzel, vice-président du Groupe 1 « Éléments scientifiques » du GIEC, en janvier 2011.

À l'échelle de la France, les évolutions climatiques sont simulées à partir des modèles climatiques régionaux français, comme par exemple : ARPEGE-Climat et LMDz, respectivement développés par le CNRM-Météo-France (Centre national de recherches météorologiques) et l'IPSL (Institut Pierre-Simon Laplace) :

- le modèle ARPEGE-Climat utilisé à Météo-France est dérivé du modèle de prévision opérationnelle à courte échéance ;
- le modèle LMDz est aussi un modèle de circulation générale à maille variable ;
- le modèle ALADIN-Climat utilisé à Météo-France est dérivé du modèle de prévision opérationnelle à courte échéance ALADIN ;
- le modèle MAR est quant à lui, comme ALADIN-Climat, un modèle couvrant un domaine à aire limitée ;

- enfin, le projet ANR SCAMPEI⁴ (Piazza et al., 2012) apporte une réponse plus précise à la question du changement climatique dans les régions de montagne de la France Métropolitaine. Il s'appuie en partie sur des modèles de simulation issus de l'expertise dirigée par Jean Jouzel. Les phénomènes extrêmes, l'enneigement et les incertitudes y sont modélisées avec une maille plus fine (8 km) pour tenir compte au mieux de la complexité topographique.

À l'échelle mondiale, pour produire ses rapports et les scénarios climatiques qui les accompagnent, le GIEC utilise 23 modèles de type AOGCM (les plus complexes).

Incertitudes inhérentes à la modélisation et à la science du climat

Basées sur des modèles complexes et diverses hypothèses de prospective socio-économique, des incertitudes subsistent quant aux prédictions du climat futur. Elles sont liées :

- à la variabilité naturelle du climat ;
- aux scénarios d'émissions de GES et en particulier, aux émissions de GES liées aux politiques de réduction d'émission de GES qui seront adoptées par nos sociétés et aux modélisations des émissions de GES ;
- à la capacité des modèles climatiques à reproduire le fonctionnement du climat.

Les modèles du GIEC proviennent de différents centres de recherche. Ils se distinguent par leur paramétrisation. Leurs différences résultent avant tout de choix documentés faits par les équipes scientifiques qui les conçoivent. L'utilisation de ces modèles permet de produire des résultats plus robustes parce que moins dépendants du choix de paramétrisation. Cette méthodologie permet de réduire l'incertitude et d'en préciser les marges.

Pour l'échelle française, le PNACC s'appuie sur les résultats présentés dans les rapports de janvier 2011 et février 2012 issus de la mission d'expertise confiée à Jean Jouzel (Peings, 2011, 2012 ; Planton, 2012). Afin de prendre en compte les incertitudes liées à la modélisation climatique et aux scénarios d'émission utilisés, le rapport de janvier 2011 s'est basé sur deux modèles – ARPEGE-Climat et LMDz – et deux scénarios : le scénario A2, considéré comme plutôt pessimiste et le scénario B2, plutôt optimiste. Quant au rapport de février 2012, il s'est basé sur :

- trois modèles climatiques, chacun pour trois périodes de 30 ans : 1961-1990 en période de référence, 2021-2050 pour un futur proche et 2071-2100 pour la fin du siècle ;
- les scénarios A2 et B2 ;
- des simulations basées sur le scénario de concentration en GES et en aérosols A1B.

L'ensemble des simulations est rendu disponible dans la base de données DRIAS⁵ (Donner accès aux scénarios climatiques Régionalisés français pour l'Impact et l'Adaptation de nos Sociétés et environnements).

Projections climatiques considérées

Des données de projections climatiques issues de nombreuses modélisations sont disponibles pour l'échelle mondiale dans différents rapports du GIEC. Plusieurs rapports font état des projections climatiques disponibles aux échelles nationale et régionale et de travaux scientifiques en cours sur le sujet. En particulier, les rapports rédigés sous l'expertise de Jean Jouzel (Peings et al, 2012) répondent à la demande du ministère de l'Écologie, du Développement durable, des Transports et du Logement, dans le cadre de la stratégie d'adaptation française, qui l'a missionné afin d'organiser les travaux des météorologues projectionnistes⁶ pour fournir des projections climatiques.

⁴<http://www.cnrm.meteo.fr/scampe>

⁵<http://www.drias-climat.fr/>

⁶Au sein du Centre National de Recherches Météorologiques de Météo-France et de l'Institut Pierre Simon Laplace

Les résultats des projections climatiques disponibles lors de la rédaction du présent guide sont ceux issus du 4^{ème} rapport d'évaluation du GIEC et des rapports de janvier 2011 et février 2012 issus de la mission d'expertise confiée à Jean Jouzel. Les principales catégories de variables climatiques étudiées sont la température, les précipitations, le niveau des eaux souterraines, le vent, les événements météorologiques extrêmes, le niveau des mers et le climat de houle, la biodiversité en France métropolitaine et d'outre-mer.

3.5.2 - Définir des scénarios climatiques

Base de données des projections climatiques

La question de l'adaptation au changement climatique nécessite des informations très localisées à différentes échelles de temps. Une part de ces informations est aujourd'hui produite par les laboratoires de recherche sur le climat, sous forme de scénarios climatiques. Compte tenu de leur technicité, elles sont encore difficilement accessibles et exploitables par les acteurs socio-économiques. En faciliter l'accès est essentiel. Le portail *Drias les futurs du climat* (<<http://www.drias-climat.fr/>>) répond à cette nécessité en permettant à tous les acteurs concernés par l'adaptation aux changements climatiques (collectivités territoriales, services de l'État, bureaux d'études, entreprises...) de consulter et obtenir aisément les données et produits issus des modèles numériques de simulation climatique. L'ouverture du portail *Drias les futurs du climat* constitue une réalisation transversale majeure du plan national d'adaptation au changement climatique. Météo-France continuera d'en assurer l'enrichissement, en lien avec les actions de recherche menées au sein des communautés scientifiques française et internationale. *Drias les futurs du climat* offre un accès libre et gratuit aux dernières avancées de la modélisation et des services climatiques. Les informations présentées sont les données régionalisées des projections climatiques les plus récentes produites par les acteurs de la recherche sur le climat en France (CERFACS, CNRM, IPSL), en particulier le projet SCAMPEI. Les paramètres et indicateurs sont représentés à différentes résolutions, sur toute la France métropolitaine.

Le portail est organisé autour de trois espaces :

- un espace Découverte, qui propose des cartes interactives représentant différents indicateurs climatiques. Cet espace permet une analyse immédiate et une bonne appréhension des jeux de données et produits accessibles sur le portail ;
- un espace Accès données et produits qui permet, après une étape d'identification, de commander et de télécharger les projections climatiques régionalisées sous format numérique (brutes ou corrigées par rapport à l'observation). Cet espace est principalement destiné aux utilisateurs avertis qui exploiteront par exemple ces informations pour des études d'impact ;
- un espace Accompagnement, permet par ailleurs de disposer par le biais de textes explicatifs, d'une foire aux questions, et d'un centre d'accompagnement, des informations nécessaires pour une bonne utilisation des services proposés par *Drias les futurs du climat*.

D'autres sources d'informations peuvent également être utilisées, comme le site de Météo France⁷, qui permet de suivre l'évolution de la pluviométrie et de la température localement ainsi que d'avoir accès à leurs projections.

Enfin, différents documents synthétisent des données relatives aux évolutions climatiques attendues à une échelle plus locale. Au niveau régional par exemple, les Schémas Régionaux du Climat, de l'Air et de l'Énergie (SCRAE) offrent un aperçu des changements climatiques attendus à l'échelle régionale à différents horizons. Ils définissent également une analyse de la vulnérabilité de la région considérée aux effets des changements climatiques. Ces documents sont évalués et peuvent être révisés. Le décret paru au JO du 18 juin 2011 fixe leur contenu et les modalités d'élaboration (articles R, 222-1 à R, 222-7 du Code de l'environnement).

⁷<www.meteofrance.com/climat/france>

Retour d'expériences et analogies climatiques

Lorsque l'on se projette dans l'avenir pour définir des scénarios climatiques dans le cadre d'une analyse de risque, il n'est pas évident d'obtenir des références chiffrées sur les évolutions des aléas. Par exemple, quelle serait la conséquence d'une augmentation de l'intensité des pluies pour le débit des voies navigables ? Afin de dépasser cette difficulté, il faut pouvoir « transposer » sur le futur les événements actuels, à l'aide notamment d'une base de données sur ces événements actuels. Dans le cas de l'exemple précédent, il faudrait disposer de l'information suivante : « pour un événement pluviométrique extrême d'intensité actuelle Y, j'ai un débit correspondant de X ». Alors, si on prévoit une intensité de la pluviométrie deux fois plus importante en 2100 qu'aujourd'hui, on peut soit :

- définir à dire d'expert que le débit correspondant est de 2X, avec des possibilités de glissements par exemple ;
- travailler sur un modèle de calcul pour estimer ce débit.

Il est également possible de se baser sur :

- une veille de retour d'expériences : événements extrêmes, canicule de 2003, tempêtes connues...
- et / ou des analogies avec des territoires subissant déjà ces conditions climatiques.

Chapitre IV

4 - Comment caractériser la vulnérabilité physique d'un réseau de transport ?

La criticité physique consiste à déterminer l'impact de chacun des aléas retenus sur chacun des systèmes ponctuels (et de leurs composants) de transport en fonction de ses caractéristiques et notamment, de ses vulnérabilités physiques. Ceci permet de déterminer les systèmes ponctuels susceptibles de subir des dommages importants.

L'analyse de criticité physique est réalisée en deux étapes : elle est conduite dans un premier temps à l'échelle globale des grandes familles de systèmes des réseaux étudiés, puis détaillée au niveau de chaque système et de chacun de leurs composants. Ainsi, il est nécessaire de bien connaître les réseaux étudiés en les décomposant en systèmes ponctuels et composants et en détaillant leurs caractéristiques et vulnérabilités physiques. La caractérisation des réseaux et de leurs vulnérabilités face aux aléas climatiques est affinée au fur et à mesure de la progression de l'analyse de risque, dans un processus itératif. Le niveau de détail dépend des objectifs attendus, qu'ils concernent un réseau donné (optimisation des interventions sur le réseau, anticipation d'investissements lourds, réévaluation des mesures d'exploitation, mise en place de consignes d'urgence pour la sécurité des usagers, ...) ou la priorisation des interventions sur un parc d'infrastructures.

4.1 - Notions de vulnérabilité physique et de criticité physique

Les facteurs de vulnérabilité sont introduits comme des éléments aggravants le risque (absence d'alertes, effets de site...) ou de sensibilité des éléments de l'infrastructure face aux événements climatiques (buses obstruées, ouvrages dégradés, système d'évacuation des eaux plus ou moins performants...). La vulnérabilité est un concept largement utilisé dans plusieurs domaines de recherche, mais sa définition est souvent ambiguë et soulève parfois des malentendus. Le choix retenu dans ce rapport est de distinguer vulnérabilité fonctionnelle et vulnérabilité physique, cette dernière étant définie comme la sensibilité d'un réseau à un aléa climatique particulier, c'est-à-dire l'amplitude du dommage produit par l'occurrence de cet aléa. Il n'existe donc pas de vulnérabilité physique intrinsèque mais une vulnérabilité physique pour chacun des aléas concernés. La vulnérabilité physique dépend des éléments exposés et de leurs résistances, comportements, etc.

Un système peut donc être vulnérable à un aléa mais robuste et résilient pour d'autres. À ce titre, il convient de distinguer ces deux concepts : robustesse et résilience. La robustesse est la capacité d'un système à fonctionner en situation dégradée face à cet aléa donné si celui-ci a conduit à un dysfonctionnement (dommage). La résilience correspond à la capacité du système à recouvrer en totalité ou en partie le fonctionnement après l'occurrence de l'aléa.

La criticité physique est une notion à mettre en relation avec la vulnérabilité physique et peut être vue comme une caractéristique d'un composant ou d'un ensemble de composants dans un système. Là aussi, plusieurs définitions sont données dans la littérature scientifique. Une interprétation est que les systèmes et composants critiques sont ceux essentiels au fonctionnement du réseau de transport. Cette criticité physique peut être jugée d'une part, par l'amplitude de l'aléa, d'autre part, par la vulnérabilité du système face à cet aléa, d'où le croisement de ces deux notions.

La notion de vulnérabilité est particulièrement importante et a été introduite dans les travaux scientifiques et techniques pour pallier la critique souvent formulée que les études de risque sont trop souvent « aléa-centrées », c'est-à-dire ne tenant pas compte des capacités du système à résister à leur exposition.

4.2 - Découpage du réseau de transport étudié en systèmes ponctuels de transport et composants

Les systèmes ponctuels constitutifs d'un réseau de transport ne sont pas tous aussi sensibles aux différents aléas climatiques. Un découpage du réseau de transport étudié en systèmes ponctuels, puis un découpage de chaque système en composants est nécessaire. Ces découpages vont permettre de réaliser la phase de caractérisation de la vulnérabilité de chaque élément du réseau étudié, dans le cadre de l'analyse de criticité physique.

Un processus par itération est préconisé pour limiter le travail de décomposition aux systèmes voire composants les plus sensibles à chaque aléa. Par exemple, la connaissance précise des systèmes de drainage routier sera pertinente par rapport à l'aléa « fortes pluies », mais ne le sera pas par rapport à l'aléa « canicule ». En effet, plus la description du réseau est fine, plus le travail d'analyse qui suivra sera long et complexe. Il est donc nécessaire d'adapter le niveau de détail aux objectifs de l'analyse (chapitre 2.3). Il convient également d'adapter le niveau de détail aux données disponibles pour mener à bien les analyses. C'est pourquoi, il est généralement recommandé de commencer par décomposer le réseau de transport étudié en grandes familles de systèmes ponctuels plutôt que d'en détailler très précisément tous les composants dès le début de l'analyse. Ceci est d'autant plus vrai lorsque les analyses portent sur des réseaux conséquents, par exemple, des réseaux situés sur des territoires étendus.

Une fois la décomposition réalisée, il est également nécessaire de décrire les composants et systèmes. Selon l'infrastructure et la composition du groupe d'experts, cette description pourra prendre en compte le maillage interne du réseau de transport collectif et l'ensemble du système multimodal de déplacements. Par ailleurs, il peut être utile d'y consigner les enjeux des éléments des réseaux : cette partie est détaillée au chapitre 4.

Il est nécessaire de reprendre ce travail sous forme de tableau afin de pouvoir réaliser l'étape de croisement « caractéristiques des aléas x vulnérabilité physique des réseaux étudiés », c'est-à-dire, l'analyse de criticité physique. Un exemple de tableau de décomposition (tableau 6), est donné ci-dessous. Cet exemple, issu du projet COUNTERACT⁸, correspond à une décomposition d'un réseau de transport collectif urbain. Son niveau de précision très fin est plus particulièrement adapté à des systèmes localisés urbains, mais ne serait pas préconisé pour une étude plus large sur le territoire d'une agglomération.

⁸COUNTERACT est un projet européen où la méthode de cartographie des risques présentée dans ce document de travail a été éprouvée dans l'analyse des vulnérabilités des infrastructures de transport face au risque terroriste.

Catégorie cible			
Catégorie	Sous-catégorie 1	Lieu/Objet	Descriptif
	Sous-catégorie 2
Métro	Station de métro place de la République	Accès piétons	Escalators 1-4
			Entrées annexes
		Entrées principales	
		Accès véhicules	
	Stations de métro (toutes)	Ligne 2	Accès au quai
	PCC	PCC 1	
PCC 2			
Bus	Réseau de bus	Arrêts	Arrêts (tous)
			Arrêts ligne 10
		Matériel roulant	
		Dépôt	

Tableau 6 : Résultat du découpage d'un réseau de transport : exemple de grille utilisée dans le projet COUNTERACT (COUNTERACT Consortium)

Dans cet exemple, la catégorie correspond au « réseau étudié ». Ses sous-catégories ou « systèmes », sont décomposés en lieu/objet ou « composants ».

L'approche proposée précédemment est bien sûr transposable à d'autres types de réseaux ou de systèmes. Il est ainsi possible de décomposer un réseau en grandes familles de systèmes, par exemple : ouvrages d'art (ponts, tunnels, etc.), gares, sections de voies ferrées, ports, sections de voies fluviales, aéroports, sections de routes... Il est également possible de décomposer chacun de ces systèmes en composants, par exemple pour le réseau ferroviaire : les lignes ferroviaires, les rails, les caténaires, les objets relatifs à la signalisation, les ouvrages d'art...

4.3 - Vérification de la vulnérabilité du réseau face à un aléa

Grâce au tableau de décomposition des réseaux étudiés, il est possible d'identifier les principaux systèmes et / ou composants du réseau. Il s'agit maintenant de vérifier que ces systèmes et / ou composants sont réellement exposés. Pour cela, il est nécessaire de tenir compte des impacts que peuvent engendrer les aléas sur les réseaux étudiés, en fonction des facteurs de vulnérabilité de ses composants et de ses systèmes.

4.3.1 - Détermination des facteurs de vulnérabilité physique du réseau

Cette étape nécessite la réalisation d'une liste de facteurs de vulnérabilité physique. On peut citer comme facteurs prioritaires à prendre en compte dans les analyses (projet RIMAROCC, 2010 ; FHWA, 2012) :

- l'âge de l'infrastructure, de quelques années à plus de 100 ans ;
- la durée de vie programmée et l'état du système par rapport à cette durée ;
- les règles de conception, absentes, anciennes ou modernes ;
- les matériaux utilisés ;
- les procédures d'inspection et de maintenance existantes, allant de l'absence complète d'action à une inspection systématique détaillée après chaque événement exceptionnel ;
- les données de retours d'expériences des comportements des réseaux étudiés face aux aléas climatiques ;
- l'élévation de l'infrastructure (par rapport au niveau de la mer ou d'un cours d'eau) ;
- etc.

Parmi ces facteurs, certains sont plus difficiles à évaluer et alors, moins discriminants.

En fonction du niveau de détail de l'analyse, il peut être nécessaire de compléter la liste des facteurs de vulnérabilités.

4.3.2 - Vérification de la vulnérabilité d'un composant face à un aléa

Après avoir pris connaissance de la liste des facteurs de vulnérabilité physique des composants et / ou systèmes des réseaux étudiés, il faut vérifier leur vulnérabilité face à un aléa. Pour cette étape, les experts des réseaux étudiés, en lien avec les autres experts du groupe de travail, pourront s'appuyer sur la définition de scénarios d'impacts d'aléas. Ces scénarios doivent permettre de décrire qualitativement – à l'aide de la liste de facteurs de vulnérabilité – ou quantitativement – à l'aide de logiciels – le type de vulnérabilité du composant face à l'aléa, en tenant compte de la liste précédemment établie. Il est également utile de vérifier si la vulnérabilité d'un composant à un aléa peut avoir des conséquences pour la vulnérabilité de tout le système, voire tout le réseau étudié : « la vulnérabilité du composant n°X peut-elle avoir des conséquences sur la vulnérabilité d'un autre composant ? ». Par exemple :

- un composant n°1 du système étudié est vulnérable à un aléa n°1 ;
- le composant n°2 du système n'est pas vulnérable à l'aléa n°1, mais la dégradation du composant n°1 est susceptible d'entraîner sa dégradation.

Dans ce cas, il faut ré-évaluer la vulnérabilité du composant n°2 au regard de la vulnérabilité du composant n°1. Il est par exemple possible de définir :

- que les deux composants ont la même vulnérabilité à l'aléa étudié ;
- ou encore, si une forte dégradation du composant n°1 entraîne une faible dégradation du composant n°2, que le composant n°1 est très vulnérable à l'aléa n°1 et le composant n°2, moyennement vulnérable à cet aléa.

La définition de ces scénarios d'impacts peut également s'appuyer sur :

- des scénarios d'évolution socio-économique (VDOT, sans date). Les évolutions économiques peuvent avoir un impact sur le niveau d'entretien des systèmes étudiés ;
- des scénarios d'évolution des territoires, qui permettent de tenir compte des évolutions de l'urbanisation et donc, de l'évolution des lieux à enjeux de desserte ;
- d'autres scénarios comme des scénarios d'évolution des politiques étatiques en ce qui concerne la gestion du patrimoine d'infrastructures (VDOT, sans date). De même, les impacts plus larges sur le territoire peuvent être projetés, pour tenir compte des éventuels effets induits. Par exemple, un aléa impactant les réseaux de transport d'énergie peut impacter indirectement la circulation ferroviaire.

Après, il est possible de consigner les évaluations de la vulnérabilité en combinant les tableaux de décomposition des aléas étudiés et de caractérisation des aléas (tableau 5, éventuellement sans les notes attribuées aux aléas) en un seul tableau (tableau 7).

			Aléas à retenir éventuellement		
			Aléa n°1	Aléa n°2	...
			Caractéristiques	Caractéristiques	Caractéristiques
Réseaux étudiés	Système ponctuel n°1	Composant n°1	Comment et en quoi le composant n°1 est-il vulnérable à l'aléa n°1 ?	Comment et en quoi le composant n°1 est-il vulnérable à l'aléa n°2 ?	
		Composant n°2	Comment et en quoi le composant n°2 est-il vulnérable à l'aléa n°1 ?	...	
		...			
	Système ponctuel n°2	Composant n°1			
		Composant n°2			
		...			
			

Tableau 7 : Tableau de vérification de la vulnérabilité potentielle des systèmes et composant d'un réseau, à un niveau fin de détail

4.3.3 - Notation de la vulnérabilité physique du réseau

Après avoir complété le tableau de vulnérabilité (tableau 7), il faut enfin attribuer une note de vulnérabilité à chaque système et composant du réseau étudié. Pour cela, il est nécessaire de définir une échelle de vulnérabilité. De la même façon que pour la définition de l'échelle des aléas (chapitre 3.4), il faut établir des définitions pour chaque niveau de l'échelle.

À ce stade, le résultat obtenu peut être présenté sous la forme d'un tableau, comme celui ci-dessous (tableau 8) :

Réseaux étudiés	Système n°1	Composant n°1	Note de vulnérabilité du composant n°1 (système n°1)
		Composant n°2	Note de vulnérabilité du composant n°2 (système n°1)
	
	Système n°2	Composant n°1	...
		Composant n°2	...
	

Tableau 8 : Tableau de notation des vulnérabilités physiques

4.3.4 - Ressources pour évaluer la vulnérabilité d'un réseau face à un aléa

Différentes méthodologies sont envisageables pour établir une liste de facteurs de vulnérabilité et effectuer la pondération.

Retours d'expérience

La consultation des experts peut se faire :

- en réunions. Elles pourront réunir des experts d'un type d'infrastructures ou encore, des experts d'un segment étudié (WSDOT, 2011). Décider de l'échelle de vulnérabilité en réunion permet d'avoir une échelle harmonisée pour tous les experts, qui devront alors se mettre d'accord sur les définitions des niveaux de vulnérabilité ;
- en interrogeant les experts individuellement, par le biais de questionnaires ou d'entretiens (STAC, 2013).

Ces derniers pourront indiquer quelles sont les infrastructures les plus vulnérables en s'appuyant sur leurs propres connaissances et leur expérience.

Bases de données et documentation

Il est également possible d'évaluer la vulnérabilité d'une infrastructure à l'aide :

- de bases de données : les Images de Qualité des Ouvrages d'Art (IQOA) et du Réseau Routier National (IQRN) fournissent des indicateurs de l'état d'ouvrages d'art et de routes ;
- d'études : le CEREMA par exemple, dans son guide de maîtrise des risques appliquée à un ouvrage d'art, a défini de nombreux facteurs de vulnérabilité physique (Sétra, 2013) ;
- d'investigations de terrain ;
- de données statistiques ou historiques, issues par exemple des suivis et inspections des infrastructures effectués par les gestionnaires ;

- des modélisations : il existe par exemple des modélisations du comportement d'infrastructures selon diverses sollicitations (vent, etc.) ;
- etc.

Il peut néanmoins être difficile d'avoir accès à ce type de renseignements, qui proviennent généralement de sources variées : bases de données spécifiques, des retours d'expérience des gestionnaires des réseaux, experts, etc.

Chapitre V

5 - Comment évaluer la vulnérabilité fonctionnelle d'un réseau de transport ?

L'objectif d'un réseau de transport est de permettre à ses usagers de se déplacer dans de bonnes conditions, ou bien de transporter des marchandises. De façon très générale, la performance d'un réseau de transport englobe :

- la connectivité : le réseau offre-t-il la possibilité de se déplacer d'un point à un autre ?
- la qualité de service : dans quelles conditions de vitesse, de confort, de sécurité, de fiabilité, etc., le réseau permet-il aux usagers de se déplacer ?
- la capacité : combien d'usagers le réseau peut-il supporter simultanément ? Les notions de qualité de service et de capacité sont très liées. En effet, si l'on veut déplacer plus de personnes ou de marchandises en même temps au même endroit, une qualité moindre se traduira par une perte de temps, de fiabilité, des embouteillages, des files d'attente, etc. ;
- le coût : le réseau de transport engendre des coûts de construction, de maintenance, d'exploitation, qui se traduisent soit dans les prix payés par les usagers, soit dans les financements apportés par les contribuables.

Chacun des systèmes (route, pont, tunnel, voie ferrée, gare, etc.) constituant un réseau de transport participe à sa performance. Si un ou plusieurs de ces systèmes est indisponible, alors le réseau sera moins efficace : cela se traduira par un impact sur une ou plusieurs des variables citées ci-dessus.

L'analyse de criticité fonctionnelle a pour objectif d'identifier l'impact de défaillances sur la performance du réseau. C'est un des éléments à partir desquels il sera possible d'établir des priorités sur les protections et solutions à mettre en place.

Ces défaillances, qui peuvent être causées par des événements climatiques extrêmes, peuvent arriver soit isolément (une rue est emportée par un glissement de terrain, mais le reste du réseau n'est pas touché), soit simultanément (une inondation bloque plusieurs routes et voies ferrées dans un même secteur). Dans un cas comme dans l'autre, cela peut n'avoir qu'un impact faible du point de vue de la fonctionnalité du réseau (les axes touchés n'étaient pas très utilisés et des itinéraires de report sont disponibles ; les usagers peuvent donc toujours se déplacer, dans des conditions proches de la normale) ou bien un impact très élevé (les déplacements deviennent substantiellement plus difficiles, voire impossibles).

Ces impacts se mesurent à l'échelle des variables citées ci-dessus. Pour savoir si un système ou un ensemble de système est essentiel au fonctionnement du réseau, il faut identifier à qui ils sont utiles, pourquoi et comment les usagers peuvent s'adapter s'ils deviennent indisponibles. C'est l'objectif de l'analyse de criticité fonctionnelle.

Cette partie s'articule en trois sections. La première détaille les fonctions d'un réseau de transport, et définit la notion de performance pour chacune de ces fonctions. La seconde présente les principes de l'analyse de criticité fonctionnelle. La dernière présente des exemples de méthodes qui peuvent être mises en œuvre de façon concrète.

5.1 - Fonctions d'un réseau de transport

Dans la perspective de l'analyse de criticité fonctionnelle, on peut distinguer trois grandes catégories de fonctions :

- **les fonctions indispensables de transport** : il faut considérer, dans cette catégorie, les déplacements qui doivent à tout prix être toujours possibles, particulièrement en cas d'événement climatique extrême : l'accès des équipes de secours, de soin, des pompiers, de la police, l'évacuation de personnes (par leurs propres moyens ou non), le transport de biens de première nécessité, les transports militaires, etc. Il s'agit essentiellement d'une question de connectivité : il faut pouvoir aller de partout à partout, sachant que les solutions

permettant d'assurer cette connectivité peuvent inclure l'interdiction d'utilisation des réseaux de transport à d'autres usagers, la conception et l'utilisation de véhicules spécifiques, le recours à d'autres modes, etc. ;

- **les fonctionnalités de desserte ou d'accessibilité** : il s'agit des déplacements qui concernent les services essentiels tels que l'accès à l'alimentation, à des services de santé, etc. Il s'agit de déplacements substituables : si, pour les personnes habitant dans un lieu donné, tel magasin d'alimentation devient inaccessible, mais qu'un autre reste disponible, cela ne génère pas de problème particulier. Par contre, si tous les magasins deviennent inaccessibles, les conséquences peuvent rapidement devenir très graves ;
- **les fonctionnalités courantes de transport** : il s'agit de tous les déplacements de personnes et de marchandises participant au fonctionnement de la société, et de l'économie en particulier. La fonction du réseau de transport est de permettre ces déplacements dans de bonnes conditions, y compris de sécurité. Une perte de performance du réseau de transport se traduit, du point de vue des usagers (passagers et transporteurs de marchandises) par des pertes de temps, des retards, la nécessité de reporter ou réorganiser des déplacements, voire de reporter des activités, de les mener ailleurs qu'au lieu initialement prévu ou privilégié, ou encore de les annuler. Pour les chaînes logistiques, cela peut causer une rupture d'approvisionnement aux conséquences économiques qui peuvent aller jusqu'à la faillite (et donc à des destructions d'emploi).

L'analyse de criticité fonctionnelle discutée dans cette partie concerne essentiellement ces catégories. Ceci dit, les réseaux de transport ont un certain nombre d'autres fonctions, qu'il est utile de rappeler ci-dessous :

- les fonctions support : les usagers doivent pouvoir effectuer leurs déplacements dans de bonnes conditions de sécurité. Cela inclut l'information et la sécurité pendant les événements extrêmes ;
- les fonctions connexes : les réseaux de transport peuvent avoir des fonctions associées, écologiques, sociales, etc. Par exemple, le réseau de voies navigables assure la fourniture en eau potable de certaines agglomérations, l'irrigation des zones agricoles, la protection et le développement de la biodiversité (par les berges en techniques végétales).

De plus, d'autres réseaux peuvent être liés physiquement aux réseaux de transport, comme les réseaux de télécoms dans les ouvrages d'art. Dans une configuration de ce genre, les réseaux de transport et les autres sont probablement exposés aux mêmes aléas, il peut être utile d'en étudier la criticité fonctionnelle par la même occasion.

5.2 - Principes de l'analyse de criticité fonctionnelle

L'objectif de base de l'analyse de criticité fonctionnelle est de déterminer les conséquences pour la fonctionnalité du réseau d'une défaillance dans un système de transport. L'analyse de criticité fonctionnelle identifie les systèmes dont l'indisponibilité a des conséquences graves : si ces systèmes sont vulnérables à des aléas, alors ils devront faire l'objet d'un traitement en priorité.

En pratique, quelle que soit l'origine et la nature de la défaillance, elle se traduit, pour l'utilisateur, soit par une perte de performance (une route, une gare, un aéroport, sont partiellement indisponibles, ce qui engendrera des retards, des attentes, etc.), soit par une perte de connectivité, c'est-à-dire de possibilité de se déplacer (une destination, voire une région, deviennent inaccessibles par route, par chemin de fer, etc.) L'analyse de criticité fonctionnelle peut donc être menée selon une de ces deux perspectives, voire les deux.

5.2.1 - Pertes de connectivité des réseaux de transport

L'analyse de criticité fonctionnelle appliquée aux pertes de connectivité est particulièrement pertinente pour vérifier qu'un réseau assure l'accès aux services de base, ou d'urgence. Elle l'est également d'un point de vue économique et social si la perte de connectivité est amenée à durer.

Si l'accès de personnes à leurs emplois ou lieux d'étude est rendu impossible, ou si des chaînes logistiques sont coupées longtemps, les conséquences économiques et sociales peuvent être lourdes.

En pratique, l'objectif est de déterminer si une défaillance ou un ensemble de défaillances coupe l'accès d'un certain nombre de zones ou de personnes à un certain nombre de destinations considérées comme essentielles. Prenons un exemple simple, illustré par la figure 5, où on regarde si l'accès à un hôpital est possible à partir d'un lieu d'habitation donné. On considère deux cas, distincts par le nombre d'itinéraires disponibles.

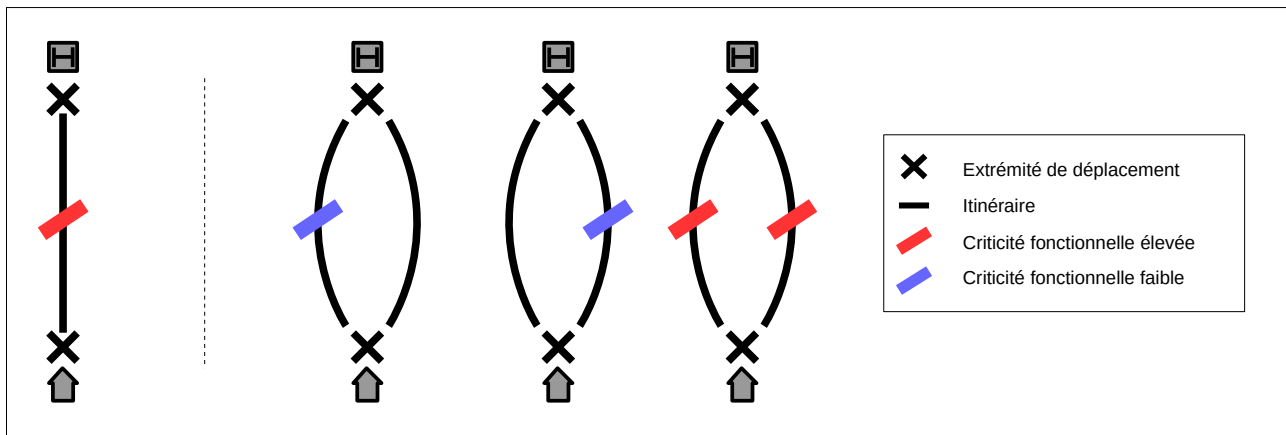


Figure 5 : Criticité fonctionnelle du point de vue de la connectivité

S'il y a un seul itinéraire entre les deux, la criticité fonctionnelle de cet itinéraire est très élevée. En effet, s'il vient à être rompu (parce qu'un tronçon routier, ou un carrefour, sont bloqués en conséquence d'un événement climatique), alors les habitants de la zone considérée perdent l'accès aux soins. S'il y a deux itinéraires, chacun des deux, pris isolément, n'a pas de criticité fonctionnelle très élevée, mais il faut absolument éviter que les deux soient rompus simultanément.

5.2.2 - Dégradation des performances des réseaux de transport

On considère ici le cas où les événements climatiques ont laissé les réseaux de transport globalement fonctionnels (il est toujours possible de se rendre d'un point à un autre), mais voient leurs performances dégradées, sur une période de temps relativement longue, laissant le temps aux usagers de se réorganiser (on ne s'intéresse pas aux perturbations dans les premiers moments suivant l'événement climatique).

Concrètement, les défaillances peuvent se traduire par des routes, carrefours, gares, aéroports, etc., devenus indisponibles, obligeant les usagers à faire des détours ou à reporter leurs déplacements, ou les opérateurs à mettre en place des solutions de remplacement. Elles peuvent également se traduire par des pertes de capacité engendrant des retards, des embouteillages, des temps d'attente supérieurs à ce que les usagers rencontreraient si le réseau de transport était laissé intact.

L'analyse de criticité fonctionnelle consiste alors à déterminer si les usagers sont fortement impactés. Cette analyse peut être relativement simple si on se concentre sur un seul élément du réseau de transport. Prenons l'exemple d'un aéroport, disposant de plusieurs accès routiers. Si l'un de ces accès est indisponible, certains usagers devront faire un détour, qu'il doit être possible de calculer. Si tous les accès sont indisponibles, l'aéroport devient inutilisable. L'impact pour les usagers est plus complexe à mesurer dans ce cas : y a-t-il un autre aéroport à proximité ? Des possibilités de transport par d'autres modes ? Il faut raisonner sur un périmètre plus large si l'on souhaite répondre précisément à ces questions.

L'analyse de criticité fonctionnelle est plus complexe si on s'intéresse à un réseau dans son ensemble, car il devient alors pertinent de déterminer comment les usagers vont s'adapter.

Ceux-ci peuvent faire un détour, perdant donc du temps, et faisant éventuellement perdre du temps aux usagers du nouvel itinéraire qu'ils empruntent. En particulier, la criticité fonctionnelle d'un système donné du réseau de transport dépend de sa place et de son rôle dans ce réseau.

On peut illustrer cette notion sur le cas simple ci-dessous (figure 6). Considérons un réseau de deux routes reliant deux points entre lesquels il y a beaucoup de trafic. Ces routes peuvent être à plus ou moins grande capacité, et de plus ou moins grande longueur.

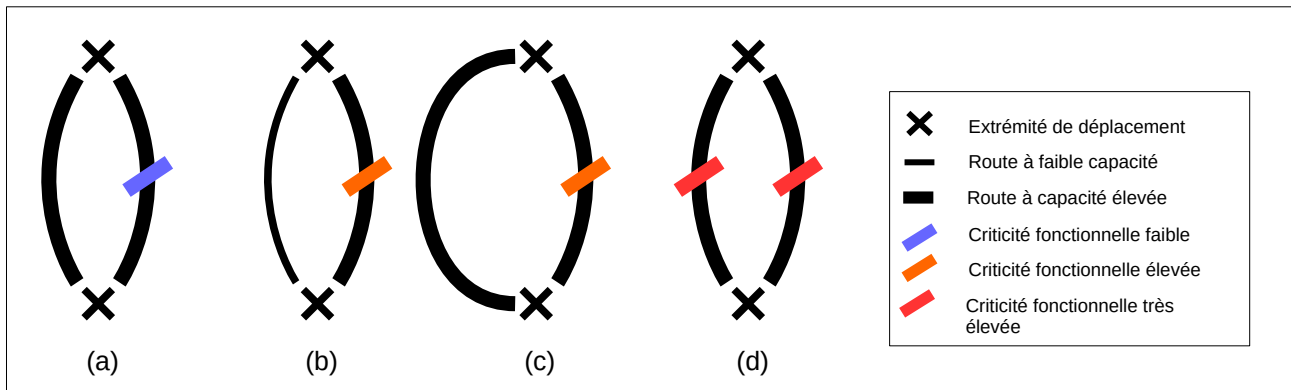


Figure 6 : Criticité fonctionnelle du point de vue de la performance

Dans chaque cas, la conséquence de l'indisponibilité d'une des routes est plus ou moins grave :

- (a) il y a deux routes à forte capacité : la coupure d'une des deux routes n'est pas très pénalisante pour les usagers qui peuvent se reporter sur la deuxième ;
- (b) une des deux routes est à faible capacité : la coupure de la route à forte capacité est un problème car beaucoup d'usagers vont se reporter dessus, engendrant de la congestion, gênant les usagers déjà présents ;
- (c) la deuxième route est beaucoup plus longue que la première : si la première est coupée, les usagers devront faire un long détour ;
- (d) les deux routes sont coupées : on retrouve ici un problème de connectivité, potentiellement grave, car il n'est plus possible de faire le déplacement.

La difficulté est de généraliser ce type de raisonnement à l'échelle de réseaux de transport complexes ; comme on le verra ci-après il est possible de s'appuyer sur les modèles de prévision de la demande de transport pour mener des analyses de ce genre.

5.3 - Mener une analyse de criticité fonctionnelle

Les méthodes pour mener des analyses de criticité fonctionnelle sont très diverses. L'objectif de cette partie est de présenter quelques approches possibles.

5.3.1 - Évaluation des ruptures d'accessibilité

L'analyse de criticité fonctionnelle peut être focalisée sur les ruptures d'accessibilité, soit des services d'urgence à des zones impactées, soit de personnes à des services de base. De ce point de vue, il existe au moins deux grandes catégories d'approche : les analyses fondées sur les indicateurs d'accessibilité et les analyses identifiant directement les réseaux qui doivent absolument être protégés.

Le premier type d'analyse est particulièrement pertinent pour vérifier si des personnes pourraient, à cause de l'indisponibilité d'un ou plusieurs composants d'infrastructure, se trouver dans l'impossibilité d'accéder à un centre de soin, par exemple. Une approche de ce genre a été menée en Australie (Taylor et al., 2006).

Elle consiste à :

- définir et calculer un indicateur d'accessibilité pour chaque zone : si l'on reprend l'exemple des centres de soin, on peut prendre la distance de chaque zone aux centres de soin les plus proches selon leurs catégories. Dans l'exemple australien, il s'agit de l'indicateur ARIA développé par l'administration de la santé pour l'accès aux soins ;
- identifier les composants d'infrastructures dont l'indisponibilité a l'effet le plus fort sur ces indicateurs. Ils ont la criticité fonctionnelle la plus élevée.

Il est possible de construire des indicateurs de criticité fonctionnelle au niveau des zones elles-mêmes. Il ne s'agit alors plus de savoir si l'indisponibilité d'un composant d'infrastructure a un impact fort, mais si les habitants d'une zone donnée ont une probabilité élevée de perdre l'accès à d'autres zones. Un indicateur de ce genre a été mis en œuvre en Norvège (Jelenius et Mattson, 2006) ; pour chaque zone, le lien dont la rupture cause la plus haute perte d'accessibilité est identifié et la part de déplacements rendus impossibles est indiquée sur une carte (figure 7).

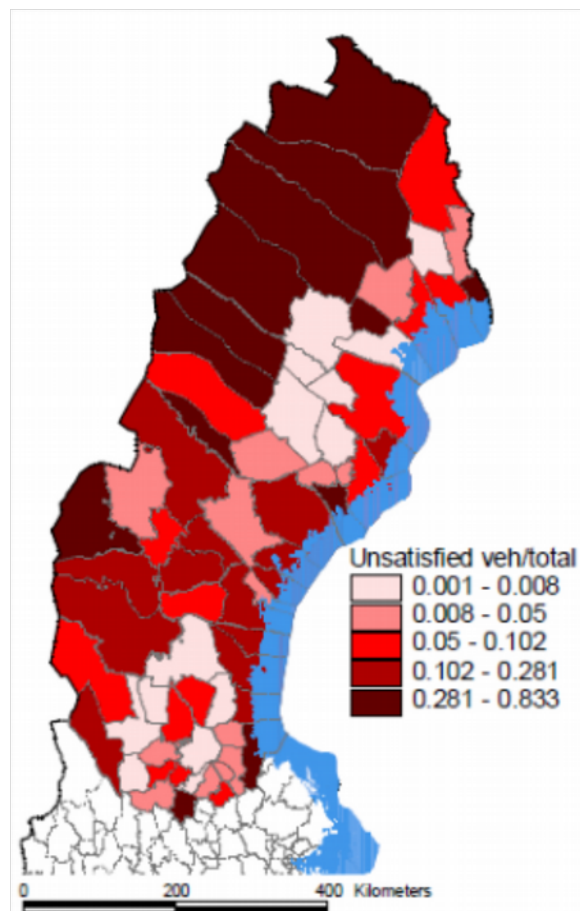


Figure 4

Figure 7 : Perte d'accessibilité (part du trafic) en fonction de la zone, correspondant à la rupture du lien occasionnant la plus forte perte d'accessibilité (Jelenius et al., 2006)

Le second type d'analyse consiste à considérer directement le cas d'un événement pouvant potentiellement rendre indisponible une grande partie des réseaux d'infrastructure (par exemple, une inondation ou une tempête). Un tel événement aurait d'ailleurs très probablement également des impacts sur d'autres réseaux (énergie, télécommunications, etc.), démultipliant les conséquences humaines et matérielles. Il est cependant difficile de prévoir les événements qui peuvent avoir ce type d'impact.

Pour contourner la difficulté liée à leur identification et leur probabilisation, il est possible de partir directement de la définition des fonctions qui doivent être absolument préservées et d'en déduire les réseaux de transport qui doivent rester disponibles en toute circonstance afin de permettre à ces fonctions de rester accessibles et opérationnelles.

C'est l'esprit de la démarche RESAU² (CETE Méditerranée, 2011). Cette approche est dans la continuité des approches « réseaux durcis » élaborées au début de la décennie 2000. Elle consiste, par l'interrogation des acteurs concernés par les situations de crise :

- à identifier les sites névralgiques, c'est-à-dire dont le fonctionnement est essentiel à la limitation des conséquences d'une crise et à leur résorption rapide ;
- à en déduire quels réseaux (notamment de transport) sont absolument essentiels au fonctionnement de ces sites ;
- et enfin, à identifier les mesures qui permettront que ces réseaux restent disponibles en toute circonstance.

5.3.2 - Évaluation des pertes de performance par méthode multicritère

L'analyse de criticité fonctionnelle peut aussi être focalisée sur les déplacements courants des personnes et des marchandises. L'indisponibilité d'une route, d'un carrefour, ou de tout autre composant d'un réseau de transport va forcer une partie des usagers à changer leur façon d'utiliser le réseau de transport. De ce point de vue, un système de transport est critique s'il combine deux conditions :

- s'il est beaucoup utilisé (une route par laquelle personne ne passe ne pose pas de problème de criticité fonctionnelle) ;
- s'il n'y a pas de « bon » second choix pour les usagers (la route coupée oblige les usagers à faire un long détour ou à se reporter à un endroit où ils vont générer de la saturation, ou l'aggraver).

Sur la base de cette logique, il est possible de catégoriser la criticité fonctionnelle à partir de méthodes multicritères. Cette méthode a été appliquée, par exemple, à une agglomération française (Cerema, 2014). Pour chaque section analysée ont été identifiés : le trafic, sa structure (interne, échange, transit, ou une combinaison des trois), les itinéraires de substitution, ainsi que leur capacité à absorber un report de trafic. On catégorise alors les sections dans quatre groupes :

- « enjeu faible » : au moins un des itinéraires de report a une forte capacité disponible ;
- « enjeu moyen » : les itinéraires de report n'ont qu'une capacité disponible moyenne ;
- « enjeu fort » : un itinéraire de report de capacité disponible faible et un ou deux itinéraires de report de capacité disponible moyenne ;
- « enjeu très fort » : les itinéraires de report n'ont qu'une capacité disponible faible.

Cette méthode donne le résultat suivant, sur une sélection de six sections :

Section	Trafic	Structure	Itinéraires de substitution	Capacité de ces itinéraires de substitution à absorber le report de trafic estimé (par type de trafic)	Bilan : enjeu de la section
Section autoroutière 1	Très fort	Interne, échange, et transit	Interne : ponts 5 et 6	Faible	Enjeu très fort
			Échange : pont 6 – RD2	Faible	
			Transit : aucun		
RD 1 – rond point 1 – pont 1	Moyen	Interne, échange, et transit	Interne : RD2 ou RN1	Moyenne	Enjeu moyen
			Échange : RD2 ou RN1	Moyenne	
			Transit : section autoroutière 2 – section autoroutière 3 – RN 1	Moyenne	
Section autoroutière 2 – pont 2	Fort	Interne et échange	Interne : vallée 1	Faible	Enjeu très fort
			Échange : vallée 1 – section autoroutière 4	Faible	
Pont 3	Moyen	Interne et échange	Interne : 5 autres ponts de l'agglomération	Moyenne	Enjeu moyen
			Échange : ponts 1 et 2	Moyenne	
Pont 1	Très fort	Interne, échange, et transit	Interne : autres ponts de l'agglomération	Moyenne	Enjeu fort
			Échange : autres ponts	Faible	
			Transit : pont 2	Moyenne	
Pont 4	Faible	Interne	Interne : autres ponts de l'agglomération	élevée	Enjeu faible

Tableau 9 : Exemple d'analyse multicritère sur quelques arcs d'une agglomération française (Cerema, 2014)

Une telle approche permet d'identifier la criticité fonctionnelle des différentes sections. Elle est en particulier relativement facile à mettre en œuvre sur la base de la connaissance pratique qu'ont de leurs réseaux les acteurs concernés par la planification, l'exploitation et l'utilisation des réseaux de transport : gestionnaires, autorités organisatrices, etc. Elle est ici focalisée sur la fonctionnalité courante ; la question des transports d'urgence n'est pas spécifiquement abordée.

Par ailleurs, bien qu'elle soit construite pour analyser les conséquences de ruptures isolées, elle donne de premières informations sur les interactions entre ces conséquences. Par exemple, le pont 3 est identifié comme ayant une criticité fonctionnelle intermédiaire, mais l'indisponibilité simultanée de ce pont et du pont 1 serait particulièrement problématique. D'autre part, la section autoroutière 2 n'a que deux itinéraires de report. Une rupture simultanée des trois itinéraires engendrerait des conséquences d'autant plus graves : certains déplacements deviendraient impossibles.

Ce type d'approche a été employé dans de nombreuses situations. Un exemple intéressant est l'étude menée par l'autorité organisatrice des transports du New Jersey aux États-Unis (NJTPA, 2013) : l'analyse de criticité fonctionnelle repose sur un critère un peu différent de celui présenté ci-dessus. Il combine, pour chaque système de transport, le trafic et le fait que le tronçon d'infrastructure soit sur un itinéraire desservant des zones critiques (la criticité des zones est calculée à partir d'un indice combinant la densité de population et la densité d'emplois).

5.3.3 - Évaluation des pertes de performance à l'aide d'un modèle de trafic

L'indisponibilité d'une partie d'un réseau de transport a un impact complexe sur l'organisation des usagers (pour leurs déplacements). La méthode multicritère qui vient d'être décrite a l'avantage d'être assez facile à mettre en œuvre, mais elle est, par construction, d'une précision limitée. Il est possible d'affiner l'analyse, en ayant recours aux modèles de trafic.

Un modèle de trafic est généralement utilisé pour prévoir les impacts sur le trafic d'un changement du réseau de transport, typiquement l'ouverture d'une nouvelle route, ligne ferroviaire, etc. Il peut tout à fait être utilisé dans le cadre d'une analyse de criticité fonctionnelle : dans ce cas, on ne l'utilise pas pour prévoir le trafic sur une nouvelle infrastructure, mais pour prévoir l'impact sur les usagers de la fermeture d'infrastructures existantes.

Concrètement, pour l'analyse de criticité fonctionnelle liée à un composant du réseau d'infrastructure, il faut :

- faire fonctionner le modèle en situation « de référence », c'est-à-dire avec un réseau d'infrastructure fonctionnant normalement. Le modèle va alors calculer les itinéraires et les temps de trajet des usagers ;
- faire fonctionner le modèle en rendant « indisponible » un ou des systèmes de transport (on l'enlève du réseau de transport dans le modèle). Le modèle va alors calculer les itinéraires et les temps de trajet des usagers dans ce nouveau cas ;
- comparer les deux prévisions. On verra alors que les itinéraires ont changé, et surtout que les temps de trajet ont augmenté. Le modèle peut également être utilisé pour identifier les pertes de connectivité (les déplacements devenus impossibles).

L'impact de l'indisponibilité d'un ou plusieurs composants du réseau de transport se traduit concrètement essentiellement par des hausses de temps de parcours, dues aux détours et à l'augmentation de la congestion. On pourra par exemple identifier que l'indisponibilité de telle route dans telle ville engendrerait une augmentation totale des temps de parcours de 1000 h sur une journée type. Il sera également possible de déterminer quels sont les usagers les plus impactés par cette augmentation et enfin, de monétariser ces indicateurs (de la même façon que l'on monétarise les indicateurs issus d'études de trafic pour mener l'analyse socio-économique d'un projet d'infrastructure). Si l'on considère une valeur du temps de 10 €/heure de temps de trajet, la perte pour la collectivité s'élève dans notre exemple à 10 000 € par jour. Ce genre de résultat peut être utile lorsqu'il faut prioriser des renforcements d'infrastructures, en prenant en compte les coûts de ces mesures et leurs efficacités.

Une telle étude a été menée sur une agglomération française (Cerema, 2014), avec la particularité qu'un traitement automatisé a été mis en œuvre pour traiter une grande partie des arcs de réseau. La carte ci-dessous illustre les résultats :

Figure 8 : Analyse systématique de criticité fonctionnelle des tronçons routiers d'une agglomération française (Cerema, 2014)

La carte visualise clairement la criticité fonctionnelle des différentes routes. On voit que celle-ci est d'autant plus élevée que le trafic est fort, mais pas seulement : dans certains cas, où des itinéraires de report sont disponibles, la criticité fonctionnelle est moins forte que dans d'autres, où il n'y a pas d'alternative efficace au tronçon routier considéré.

Ce type de traitement systématique est très intéressant, mais les temps de calcul nécessaires pour sa mise en œuvre peuvent être particulièrement longs. Il peut être pertinent de ne le mener que sur des composants d'infrastructure particuliers, préalablement sélectionnés par une analyse de criticité physique.

Des études de ce type ont été menées entre autres en Allemagne (Schulk, 2012), en Suède (Jelenius et al., 2006), et en Suisse (Erath et al., 2006).

5.3.4 - Précisions sur l'analyse des conséquences de ruptures multiples

De façon générale, les aléas auront des conséquences d'autant plus lourdes que leur extension spatiale est élevée, notamment par le jeu des ruptures multiples, voire en chaînes, qui peuvent paralyser les réseaux de transport presque totalement.

Malheureusement, il est important de noter que le traitement automatique présenté ci-dessus n'est pas adapté à l'analyse de défaillances multiples. De façon générale, trop de combinaisons sont possibles : il n'est pas faisable de toutes les étudier dans un temps raisonnable. Il serait par ailleurs très difficile de présenter le résultat d'une analyse aussi gigantesque de façon concise et efficace.

On peut définir trois approches pour traiter les ruptures multiples :

- la première consiste à améliorer la connaissance des aléas, pour construire des scénarios, soit probabilisés, soit représentatifs des aléas susceptibles de se produire concrètement (chapitre 3.2). On peut alors confronter ces scénarios à un modèle de trafic pour en estimer les conséquences fonctionnelles ;
- une seconde approche possible consiste à étudier les interactions entre composants du réseau. Il y a différentes méthodes, reposant sur différents types d'indicateurs. L'une d'elle est mise en œuvre par le Cerema (Cerema, 2014). Elle consiste à enregistrer, pour chaque composant du réseau, les reports de trafic générés par les indisponibilités d'infrastructure. Si un système reçoit plus souvent que d'autres des reports de trafic, on peut en conclure qu'il participe à la robustesse du réseau. On peut alors définir deux catégories de systèmes : ceux à forte criticité fonctionnelle (qui ne doivent pas être indisponibles) et ceux qui rendent le réseau robuste (sans eux, les conséquences de la rupture de systèmes à forte criticité fonctionnelle seraient encore plus fortes) ;
- la troisième approche consiste à définir directement les réseaux à protéger absolument. On retombe alors sur des démarches du type de RESAU présentée ci-dessus, beaucoup plus adaptées aux problématiques et à la temporalité de la gestion de crise qu'à l'analyse des conséquences fonctionnelles de moyen ou long terme.

5.3.5 - Remarques complémentaires

Quelques remarques finales sont importantes concernant l'utilisation de modèles de trafic pour l'analyse de criticité fonctionnelle :

- il n'existe pas de modèle de trafic générique fonctionnant en toute situation. Chaque modèle a été construit pour une échelle géographique (modèle urbain, régional, national, etc.), un périmètre temporel (heure de pointe du matin, journée type, etc.), un ou des réseaux (routier, transports collectifs, multimodal, etc.), un ou des segments de demande (mobilité courte ou longue distance, passager ou fret, etc.). Les objectifs d'une analyse de criticité fonctionnelle du type décrit ici doivent déterminer le type de modèle à mettre en œuvre, mais aussi s'adapter aux modèles à disposition. En l'absence de modèle, il est probablement plus raisonnable de se reporter à une analyse multicritère ;
- les méthodes actuelles de modélisation du trafic permettent d'affiner l'analyse de criticité fonctionnelle, en prenant en compte le coût d'utilisation des véhicules, les péages, les paramètres de qualité de service en transport collectif (tels que la fréquence), etc. Le degré de finesse attendu de l'analyse de criticité fonctionnelle influencera la décision d'utiliser un modèle de trafic sophistiqué ;
- l'analyse de criticité fonctionnelle présentée ici n'est pertinente que pour les indisponibilités d'infrastructure durant au moins un ou deux jours (hors durée de la crise éventuellement associée à l'aléa qui a causé l'indisponibilité). On a en effet pu observer dans quelques cas que c'est le temps qu'il faut pour que les utilisateurs d'un réseau de transport prennent connaissance du changement du réseau et réorganisent leurs déplacements. Sur des intervalles de temps plus courts, d'autres approches sont recommandées (le rapport de capitalisation sur la dynamique à grande échelle du CETE de Lyon de novembre 2013 est une bonne référence sur ce sujet) ;
- les modèles de trafic présentés ici ne sont pas conçus pour l'étude des transports d'urgence. Il ne faut donc les employer que pour des analyses de criticité fonctionnelle focalisées sur les fonctionnalités courantes des réseaux de transport.

Il y a un équilibre délicat entre périmètre et précision de l'analyse, précision des modèles, temps de calcul, simplification éventuelle des modèles disponibles, etc. Le rapport : *Plan National d'Adaptation au Changement Climatique, évaluation des enjeux trafic via l'utilisation d'un modèle de déplacement* (Cerema, 2014) schématise les alternatives, leurs avantages et inconvénients mutuels.

Chapitre VI

6 - Réalisation de l'analyse de risque

6.1 - Présentation de la méthode d'analyse de risque

De façon synthétique, les étapes précédentes ont permis :

- de caractériser les aléas climatiques attendus dans le cadre du changement climatique et susceptibles d'impacter le réseau étudié ;
- de décrire finement le réseau de transport étudié pour avoir une connaissance exhaustive de ses vulnérabilités physiques : âge de l'infrastructure, entretien, etc. ;
- de caractériser finement les enjeux des réseaux étudiés, c'est-à-dire, de mener une analyse fine du réseau pour avoir une connaissance exhaustive de ses vulnérabilités fonctionnelles : disposition du réseau, matrice de déplacements, vulnérabilités avérées en cas de dysfonctionnements connus de type panne, etc.

La confrontation de l'ensemble de ces éléments doit permettre d'évaluer le risque effectif. Pour cela, il faut avoir recourt à des matrices de risque. Ces matrices permettent de classer et de visualiser des risques en définissant des catégories de criticité physiques et fonctionnelles. Étant donné que l'on a trois items – aléas, vulnérabilité physique et fonctionnelle, il faudrait en toute rigueur faire apparaître une matrice en 3D, peu pratique. Il est possible de contourner la difficulté en réalisant plusieurs matrices successives :

- une matrice de criticité physique, croisant aléas et vulnérabilités physiques ;
- et une matrice de criticité fonctionnelle, croisant parties de réseaux et enjeux. Cette étape a déjà été réalisée précédemment, lors de l'analyse de criticité fonctionnelle (chapitre 4) et le résultat de l'étape peut être présenté soit sous forme de matrice, soit sous forme de carte.

Ces deux matrices peuvent être réalisées en parallèle ou l'une après l'autre, quel que soit l'ordre choisi. Après leur réalisation, il sera possible de construire la matrice de risque, croisant criticités physiques et fonctionnelles.

De manière simplifiée, ces combinaisons peuvent s'illustrer par le logigramme de la figure 9 :

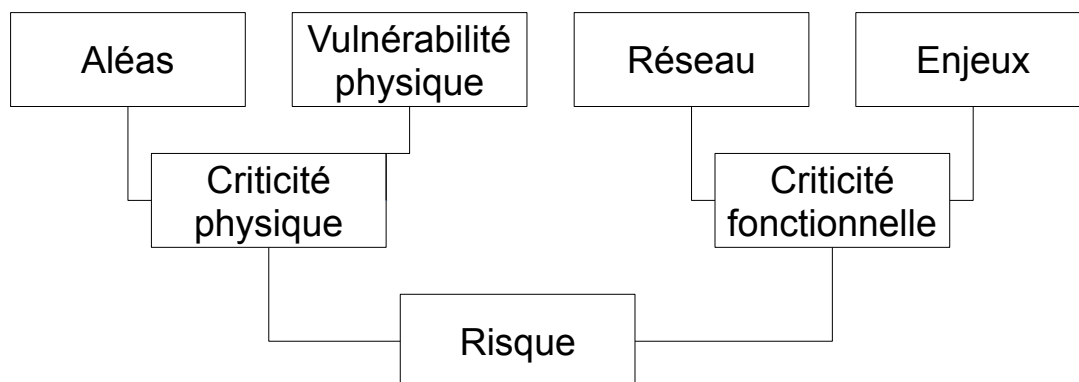


Figure 9 : Logigramme de l'analyse de risque

Il est à noter que le choix de l'échelle de l'analyse de risque a été fait en amont, lors de la définition des objectifs de l'analyse de risque (2.3). Cette échelle commune conditionne le résultat de l'analyse de risque et le mode opératoire. Si l'analyse est menée sur un territoire étendu, la criticité fonctionnelle peut être réalisée par sections de réseaux. Dans ce cas, la criticité physique sera étudiée au niveau de la section de réseau étudiée. Pour ce faire, il est par exemple possible d'étudier la vulnérabilité globale des systèmes de transport, section par section.

Il sera ensuite possible d'affiner l'analyse, en détaillant par exemple la criticité physique des différents systèmes d'une section dont le niveau de risque est très élevé. L'analyse de risque

permettra alors de définir, pour la section donnée, les systèmes les plus à risque. Pour ces systèmes, une analyse fine au niveau des composants peut alors être menée. Il est également possible de mener une analyse de risque très détaillée, directement au niveau des systèmes, voire des composants, lorsque le territoire couvert par l'analyse est très restreint. Cela peut être le cas pour un réseau urbain ou encore si l'on choisit de se focaliser sur un système de transport particulier (STAC, 2013).

6.2 - Réalisation des matrices de criticité physique et de risque

6.2.1 - Principe de calcul des notations de criticité physique et de risque

À ce niveau de l'analyse de risque, les spécialistes du climat et de l'infrastructure ont noté chaque aléa, chaque vulnérabilité physique et réalisé une analyse de criticité fonctionnelle. Maintenant, pour mener :

- l'analyse de criticité physique, il s'agit de mesurer de l'impact potentiel d'un aléa, en fonction de son occurrence et / ou de son intensité sur un réseau étudié. Cet impact dépend également de la vulnérabilité physique des réseaux étudiés. Il faudra donc croiser chaque note d'aléa avec chaque note de vulnérabilité physique. On obtient alors une note de criticité physique ;
- l'analyse de risque, il faut croiser la note de criticité physique avec la note de criticité fonctionnelle. On obtient une note du risque.

De façon simplifiée, on utilise donc les formules suivantes pour le calcul des notations :

- note de criticité physique : note d'aléa x note de vulnérabilité physique ;
- note de risque : note de criticité physique x note de criticité fonctionnelle.

La constitution de ces deux notations nécessite à la fois de très bonnes connaissances sur les enjeux d'un côté et sur l'aléa et la vulnérabilité physique de l'autre, mais aussi une compréhension fine sur la rencontre entre ces deux éléments, comme cela a pu être expliqué dans les chapitres précédents.

6.2.2 - Calcul de notes de criticité physique

Il est possible de construire la matrice de criticité physique (tableau 10) à l'aide des résultats obtenus précédemment (tableaux 5 et 8) :

Matrice de criticité physique				Niveau d'occurrence et / ou d'intensité d'aléa		
				Aléa n°1	Aléa n°2	...
				Note	Note	...
Réseaux étudiés	Système ponctuel n°1	Composant n°1	Note de vulnérabilité			
		Composant n°2	Note de vulnérabilité			
				
	Système ponctuel n°2	Composant n°1	Note de vulnérabilité			
		Composant n°2	Note de vulnérabilité			
				
			

Tableau 10 : Exemple de matrice de criticité physique

La notation de la criticité physique s'effectue à l'aide de la formule donnée précédemment : notation de la criticité physique = note d'aléa x note de vulnérabilité physique. Par exemple (tableau 11), si l'on prend une vulnérabilité de niveau 3 et un aléa de niveau 2, on obtient une note de $3 \times 2 = 6$.

Matrice de criticité physique				Niveau d'occurrence et / ou d'intensité d'aléa	
				Aléa n°1	
				Notation : 2	
Réseaux étudiés	Système ponctuel n°1	Composant n°1	Notation : 3	Criticité physique = $3 \times 2 = 6$	

Tableau 11 : Exemple de calcul du niveau de criticité physique déterminé par le produit d'une notation d'aléa par une notation de vulnérabilité

Il faut réaliser ce calcul des notes pour l'ensemble des composants (et / ou systèmes) et des aléas. Le résultat qui en découle est une matrice de criticité physique, avec pour chaque composant (et / ou système) et aléa, une note de criticité physique.

6.2.3 - Calcul des notes de risque

Après avoir calculé les notes de criticité physique, il est possible d'évaluer le risque. Pour cela, il faut croiser chaque note de criticité physique (d'un composant, d'un système, face à un aléa) avec chaque note de criticité fonctionnelle, de la même façon qu'ont été croisées les notes d'aléas et de vulnérabilité physique (chapitre 6.2.2). Il est possible de s'aider de la matrice de criticité physique réalisée précédemment (tableau 10) pour obtenir une matrice de risque (tableau 12). De façon générale, la criticité fonctionnelle est analysée à l'échelle d'une section de réseau ou des systèmes (un pont, un tunnel, un rond-point, etc.), mais ne va pas jusqu'au composant (pile de pont, etc.).

Matrice de risque		Aléa n°1	Aléa n°2	...
Réseau étudié	Système n°1	Criticité physique x criticité fonctionnelle du système n°1	Criticité physique x criticité fonctionnelle du système n°1	...
	Système n°2	Criticité physique x criticité fonctionnelle du système n°2	Criticité physique x criticité fonctionnelle du système n°2	...

Tableau 12 : Exemple de matrice de risque

6.2.4 - Définition des niveaux de risque

Le groupe doit maintenant définir les niveaux de risque. En pratique, il faut pour cela définir des limites de risque : faible, élevé, très élevé dans le cas d'une échelle à trois niveaux. Selon la précision souhaitée et les réseaux étudiés, les niveaux de risque pourront être plus ou moins nombreux : plus il y aura de niveaux de notation dans les échelles de criticité physique et de criticité fonctionnelle, plus la caractérisation des niveaux de risque sera fine. Avec une notation à cinq niveaux par exemple, l'éventail des possibilités est plus large et l'on peut calibrer différemment les niveaux pour être plus ou moins sévère. Avec une notation à trois niveaux, le croisement de ces trois items ne donne pas une « probabilité de risque » significative mais permet de délimiter les zones de risques « acceptables » et les zones de risques « inacceptables ». C'est sans doute ici que peut intervenir le niveau de sensibilité du maître d'ouvrage ou de l'opérateur par rapport à un aléa, une vulnérabilité... Dans tous les cas, le choix des niveaux de notation est à l'appréciation de celui qui réalise l'analyse de risque et des conséquences qu'il en attend. La calibration nécessaire à la réalisation de ces choix est donc une étape très importante.

Pour définir ces niveaux de risque, il faut connaître les différentes notes de risque qu'il est possible d'obtenir. Si l'on reprend l'exemple précédent :

- les échelles de notation des aléas et des vulnérabilités physiques ont quatre niveaux, les notes de criticité physique peuvent donc aller de $1 \times 1 = 1$ à $4 \times 4 = 16$, comme cela est indiqué dans le tableau 13 (note de criticité physique = note d'aléa x note de vulnérabilité) ;
- si l'échelle de criticité fonctionnelle a également quatre niveaux, alors les notes de risque peuvent aller de $4 \times 1 = 4$ à $4 \times 16 = 64$ (note de risque = note de criticité fonctionnelle x note de criticité physique), comme cela est présenté dans le tableau 14.

Notes potentielles de criticité physique			Note de vulnérabilité physique			
			4	3	2	1
			Extrêmement élevé	Très élevé	Moyennement élevé	Peu élevé
Note de l'aléa ⁹	4	Probable	4 x 4 = 16	4 x 3 = 12	4 x 2 = 8	4 x 1 = 4
	3	Rare	3 x 4 = 12	3 x 3 = 9	3 x 2 = 6	3 x 1 = 3
	2	Improbable	2 x 4 = 8	2 x 3 = 6	2 x 2 = 4	2 x 1 = 2
	1	Extrêmement improbable	1 x 4 = 4	1 x 3 = 3	1 x 2 = 2	1 x 1 = 1

Tableau 13 : Notes de criticité physique qu'il est possible d'obtenir avec des échelles de vulnérabilité physique et d'aléas à quatre niveaux

Notes potentielles de risque		Notes potentielles de criticité fonctionnelle			
		4	3	2	1
Notes potentielles de criticité physique	16	64	48	32	16
	12	48	36	24	12
	9	36	27	18	9
	8	32	24	16	8
	6	24	18	12	6
	4	16	12	8	4
	3	12	9	6	3
	2	8	6	4	2
	1	4	3	2	1

Tableau 14 : Notes de risque qu'il est possible d'obtenir avec des échelles d'aléa, de vulnérabilité physique et de criticité fonctionnelle à quatre niveaux

Après calcul des notes de risque, il faut définir une limite de risque acceptable, c'est-à-dire un niveau pour lequel aucune mesure d'adaptation n'est à réaliser dans l'immédiat. Selon la note obtenue en confrontant la criticité physique et fonctionnelle des réseaux étudiés, le risque évalué sera en-dessous ou au-dessus de cette limite, ce qui permettra de préciser là où il faut agir. Selon le niveau de précision souhaité et selon les réseaux étudiés, les niveaux de risque pourront être plus ou moins nombreux.

⁹Dans cet exemple, la note est basée uniquement sur la probabilité d'occurrence.

Dans l'exemple précédent, trois niveaux de risque ont été définis et accompagnés d'un code couleur :

Niveaux de risque	Valeur	Action requise
Intolérable	27-32-36-48-64	Le risque est inacceptable : des mesures de prévention / protection sont requises
Grave	9-12-16-18-24	Le risque ne peut être accepté que si les mesures de prévention / protection sont trop difficiles à mettre en œuvre
Tolérable	1-2-3-4-6-8	Le risque pourrait être accepté mais doit être périodiquement réévalué

Tableau 15 : Exemple de choix de niveaux de risque avec code couleur

Cette échelle des niveaux de risque permet de classer les risques selon la note obtenue par le produit des notes de criticité physique et fonctionnelle. Il est possible de reporter l'échelle choisie sur la matrice de calcul (tableau 16) :

Notes potentielles de risque		Notes potentielles de criticité fonctionnelle			
		4	3	2	1
Notes potentielles de criticité physique	16	Intolérable	Intolérable	Intolérable	Grave
	12	Intolérable	Intolérable	Grave	Grave
	9	Intolérable	Intolérable	Grave	Grave
	8	Intolérable	Grave	Grave	Tolérable
	6	Grave	Grave	Grave	Tolérable
	4	Grave	Grave	Tolérable	Tolérable
	3	Grave	Grave	Tolérable	Tolérable
	2	Tolérable	Tolérable	Tolérable	Tolérable
	1	Tolérable	Tolérable	Tolérable	Tolérable

Tableau 16 : Exemple de matrice de risque avec code couleur

Cette matrice va permettre d'obtenir la cartographie des risques sur les réseaux étudiés.

6.3 - Vers une cartographie des risques : confrontation des données « transport » aux données « climat » en utilisant la matrice des risques choisie

Une fois l'échelle de risque choisie, le groupe commun doit réaliser un tableau dans lequel figureront d'une part les systèmes (et composants) des réseaux étudiés, d'autre part les aléas retenus, ainsi qu'une appréciation du risque résultant de la confrontation de ces données pour chaque événement. Ce tableau peut se présenter sous la forme suivante :

Exemple pour un réseau de type métro	Aléa n°1	Aléa n°2	...
Station U	Niveau de risque	...	
Station V	...		
Section courante en tunnel			
...			

Tableau 17 : Exemple de matrice transport-aléa

Pour chaque rencontre entre un composant ou système des réseaux étudiés et chaque aléa climatique, il faut entrer le niveau de risque déterminé, par exemple : intolérable, grave, tolérable (tableau 15). Appliqué à l'ensemble des éléments des réseaux de transport pour l'ensemble des aléas climatiques retenus, cette méthode permet de remplir en concertation un tableau à double entrées récapitulant le détail des réseaux étudiés, les aléas climatiques et les estimations de risque. Ce tableau peut constituer un rendu final. Il permet de visualiser grâce au code couleur les risques intolérables (figurés en rouge dans l'exemple de ce chapitre, tableau 16).

Annexes

Index des figures

Figure 1 : Visualisation des concepts. Source : DGITM.....	10
Figure 2 : Exemple de méthode d'analyse de risque. Source : DGITM.....	13
Figure 3 : Cadre organisationnel du management du risque. Source : NF-ISO-31000 (2010).....	17
Figure 4 : Processus de management des risques. Source : NF-ISO-31000 (2010).....	17
Figure 5 : Criticité fonctionnelle du point de vue de la connectivité.....	41
Figure 6 : Criticité fonctionnelle du point de vue de la performance.....	42
Figure 7 : Perte d'accessibilité (part du trafic) en fonction de la zone, correspondant à la rupture du lien occasionnant la plus forte perte d'accessibilité (Jelenius et al., 2006).....	43
Figure 8 : Analyse systématique de criticité fonctionnelle des tronçons routiers d'une agglomération française (Cerema, 2014).....	47
Figure 9 : Logigramme de l'analyse de risque.....	50

Index des tableaux

Tableau 1 : Exemples d'extrêmes climatiques et d'aléas liés.....	21
Tableau 2 : Tableau de vérification des impacts potentiels des aléas sur les réseaux étudiés, à un faible niveau de détail.....	22
Tableau 3 : Tableau de vérification des impacts potentiels des aléas sur les réseaux étudiés, à un niveau fin de détail.....	23
Tableau 4 : Exemple d'échelle à 4 niveaux, utilisée pour caractériser la probabilité des événements climatiques retenus dans le cadre d'une analyse de risque donnée.....	24
Tableau 5 : Tableau de synthèse des éléments de caractérisation et des notes attribuées aux aléas retenus.....	25
Tableau 6 : Résultat du découpage d'un réseau de transport : exemple de grille utilisée dans le projet COUNTERACT (COUNTERACT Consortium).....	33
Tableau 7 : Tableau de vérification de la vulnérabilité potentielle des systèmes et composant d'un réseau, à un niveau fin de détail.....	35
Tableau 8 : Tableau de notation des vulnérabilités physiques.....	36
Tableau 9 : Exemple d'analyse multicritère sur quelques arcs d'une agglomération française (Cerema, 2014).....	45
Tableau 10 : Exemple de matrice de criticité physique.....	52
Tableau 11 : Exemple de calcul du niveau de criticité physique déterminé par le produit d'une notation d'aléa par une notation de vulnérabilité.....	52
Tableau 12 : Exemple de matrice de risque.....	53
Tableau 13 : Notes de criticité physique qu'il est possible d'obtenir avec des échelles de vulnérabilité physique et d'aléas à quatre niveaux.....	54
Tableau 14 : Notes de risque qu'il est possible d'obtenir avec des échelles d'aléa, de vulnérabilité physique et de criticité fonctionnelle à quatre niveaux.....	54
Tableau 15 : Exemple de choix de niveaux de risque avec code couleur.....	55
Tableau 16 : Exemple de matrice de risque avec code couleur.....	55
Tableau 17 : Exemple de matrice transport-aléa.....	56

7 - Acronymes

ALADIN : Aire Limitée, Adaptation dynamique, Développement InterNational

ANR-SCAMPEI : Agence nationale pour la recherche (ANR), Scénarios Climatiques Adaptés aux zones de Montagne : Phénomènes extrêmes, Enneigement et Incertitude (SCAMPEI)

AOGCM : Atmosphere-Ocean General Circulation Model

ARPEGE : Action de Recherche Petite Échelle Grande Échelle

CEREMA : Centre d'Études et d'Expertise sur les Risques, l'Environnement, la Mobilité et l'Aménagement

CERFACS : Centre Européen de Recherche et de Formation Avancée en Calcul Scientifique

CETU : Centre d'Études Techniques des Tunnels

COUNTERACT : Cluster of User Networks in Transport and Energy to Anti-terrorist Activities

CNRM : Centre National de Recherches Météorologiques

DGITM : Direction Générale des Infrastructures de Transport et de la Mer

DRIAS : Donner accès aux scénarios climatiques Régionalisés français pour l'Impact et l'Adaptation de nos Sociétés et environnements

DTecEMF : Direction Technique Eau, Mer et Fleuves (CEREMA, ex-CETMEF)

DTecITM : Direction Technique Infrastructures de Transport et Matériaux (CEREMA, ex-SETRA)

DTecTV : Direction Technique Territoires et Villes (CEREMA, ex-CERTU)

DTer : Direction Territoriale (CEREMA, ex-CETE)

GES : Gaz à Effet de Serre

GICC : Gestion et Impacts du Changement Climatique

GIEC : Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat

GT : Groupe de Travail

IPSL : Institut Pierre-Simon Laplace

IQA : Indice de Qualité des Ouvrages d'Art

IQRN : Indice de Qualité du Réseau Routier National

MAR : Modèle Atmosphérique Régional

MEDDE : Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie

MEDTL : Ministère de l'Écologie, du Développement durable, des Transports et du Logement

LMDz : Laboratoire de Météorologie Climatique zoom

PNACC : Plan National d'Adaptation sur le Changement Climatique

RFF : Réseau Ferré de France

SCAMPEI : Scénarios Climatiques Adaptés aux zones de Montagne : Phénomènes extrêmes, Enneigement et Incertitude

SCRAE : Schémas Régionaux du Climat, de l'Air et de l'Énergie

SETRA : Service d'Études sur les Transports, les Routes, et leurs Aménagements

SREX : Special Report on managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation (*Rapport spécial sur la gestion des risques de catastrophes et de phénomènes extrêmes pour les besoins de l'adaptation au changement climatique*)

STAC : Service Technique de l'Aviation Civile

STRMTG : Service Technique des Remontées Mécaniques et des Transports Guidés

VNF : Voies Navigables de France

8 - Glossaire

Les définitions proposées ci-dessous sont spécifiques à ce guide.

Aléas : événements climatiques exogènes aux systèmes de transport, qui sont caractérisés par une intensité, une probabilité d'occurrence spatiale et une probabilité d'occurrence temporelle. Dans le présent rapport, seuls sont pris en compte les aléas climatiques extrêmes, non anticipables facilement et localisés. Il s'agit ici à la fois des événements climatiques extrêmes et de leurs conséquences sur le territoire : canicules, incendies de forêt, épisodes de fortes pluies, inondations, glissements de terrain, vents extrêmes, submersions marines, etc.

Analyse de la criticité fonctionnelle : croisement entre enjeux et vulnérabilités fonctionnelles des réseaux de transport.

Analyse de la criticité physique : croisement entre aléas et vulnérabilités physiques des systèmes ponctuels de transport.

Analyse de risque : croisement entre aléas, vulnérabilités physiques et fonctionnelles et enjeux des infrastructures, ou encore : analyse croisée de la criticité physique et de la criticité fonctionnelle.

Composant de transport : élément d'un système de transport, par exemple pour un réseau ferré : rails, caténaires, etc.

Enjeux : dans le cadre de ce guide, les enjeux d'un système de transport sont le maintien de ses fonctionnalités de support de la mobilité, de desserte ou d'accessibilité de certaines zones et enfin, relatives à l'acheminement et la gestion des secours.

Système de transport : élément d'un réseau de transport, par exemple : pont, tunnel, rond-point, etc.

Vulnérabilité fonctionnelle d'un système de transport : vulnérabilité du système au niveau macroscopique, qui dépend des caractéristiques fonctionnelles du réseau d'infrastructures, de sa capacité, de son caractère maillé ou non, etc.

Vulnérabilité physique d'un système de transport : vulnérabilité de composants du système, qui dépend des caractéristiques physiques des composantes de l'infrastructure, de leurs résistances, de leurs comportements, etc.

9 - Bibliographie

ADEME. Diagnostic de vulnérabilité d'un territoire au changement climatique [en ligne]. 2011, 103p. Disponible à l'adresse :

<<http://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/diagnostic-vulnerabilite-territoire-changement-climatique-7405.pdf>>

CEREMA. *Plan National d'Adaptation au Changement Climatique, évaluation des enjeux trafic via l'utilisation d'un modèle de déplacement*. 2014, rapport d'étude.

CETE Lyon. *Travaux de recherche sur la thématique « Modélisation dynamique à grande échelle »*. 2013, rapport de capitalisation.

CETE Méditerranée. *Démarche RESAU² : Résilience des Acteurs de l'Urgence et Réseaux*. 2011, Guide Méthodologique.

CGEDD. *Vulnérabilité des réseaux d'infrastructures aux risques naturels* [en ligne]. 2013, 92p. Disponible à l'adresse : <http://www.cgedd.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/008414-01_rapport_cle523312.pdf>

DGEC. *Découvrir les nouveaux scénarios RCP et SSP utilisés par le GIEC* [en ligne]. 2013, 12p. Disponible à l'adresse : <http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/ONERC_decouvrir_scenarios_Giec.pdf>

Earth A., Birdsall J., Axhausen K. W. et Hajdin R. Vulnerability assessment methodology for Swiss road network. In : *Transportation Research Record : Journal of the Transportation Research Board*, Volume 2137, 2006, p. 118-126, DOI : 10.3141/2137-13.

EEA. *Climate change, impacts and vulnerability in Europe 2012* [en ligne]. 2012, 300p. Disponible à l'adresse : <<http://www.developpement-durable.gouv.fr/Changement-climatique-impacts-et.html>>

FHWA. *Climate Change and Extreme Weather Vulnerability Assessment Framework* [en ligne]. 2012, 51p. Disponible à l'adresse : <http://www.fhwa.dot.gov/environment/climate_change/adaptation/publications_and_tools/vulnerability_assessment_framework/fhwahep13005.pdf>

GIEC. *Bilan 2007 des changements climatiques. Contribution des Groupes de travail I, II et III au quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat* [en ligne]. Sous la direction de l'équipe de rédaction principale, Pachauri, R.K. et Reisinger, A. GIEC : Genève (Suisse), 2007, 103 pages. Disponible à l'adresse : <http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr_fr.pdf>

GIEC. *Résumé à l'intention des décideurs, Changements climatiques 2013 : Les éléments scientifiques. Contribution du Groupe de travail I au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat* [en ligne]. Sous la direction de Stocker, T.F., et al. Cambridge (Royaume-Uni) et New York (État de New York, États-Unis d'Amérique) : Cambridge University Press, 2013, 27p. Disponible à l'adresse : <http://www.climatechange2013.org/images/report/WG1AR5_SPM_brochure_fr.pdf>

IPCC. *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* [en ligne]. Sous la direction de Field, C.B., et al. Cambridge (Royaume-Uni) et New York (État de New York, États-Unis d'Amérique) : Cambridge University Press, 2012, 582 p. ISBN : 978-1-107-60780-4. Disponible à l'adresse : <http://www.ipcc-wg2.gov/SREX/images/uploads/SREX-All_FINAL.pdf>

IPCC. *Rapport spécial sur la gestion des risques de catastrophes et de phénomènes extrêmes pour les besoins de l'adaptation au changement climatique. Résumé à l'intention des décideurs. Rapport spécial du groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat* [en ligne]. Cambridge (Royaume-Uni) : Cambridge University Press, 2012, 20p. ISBN 978-92-9169-233-0.

[Consulté le 18/06/2014]. Disponible à l'adresse : <http://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/srex/IPCC_SREX_FR_web.pdf>

IPCC, 2014. *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Group I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [en ligne]. Sous la direction de l'équipe de rédaction principale, Pachauri, R.K. et Meyer, L. IPCC : Genève (Suisse), 2014, 151 pages. Disponible à l'adresse : <https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/SYR_AR5_FINAL_full.pdf>

Jelenius E., T. Petersen et L.-G. Mattson. Importance and exposure in road network vulnerability analysis. In *Transportation Research Part A : Policy and Practice*, Volume 40, n°7, 2006, p. 537-560.

Ministère de l'Écologie, du Développement durable, des Transports et du Logement. *Plan National d'Adaptation de la France aux effets du Changement Climatique 2011-2015* [en ligne]. 2011, 187p. Disponible en ligne à l'adresse : <<http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/ONERC-PNACC-complet.pdf>>

Moss R.H. et al. *The next generation of scenarios for climate change research and assessment* [en ligne]. In : *Nature* 463, p.747-756. Disponible à l'adresse : <<http://www.nature.com/nature/journal/v463/n7282/full/nature08823.html>>

NJTPA (2013). *Climate change vulnerability and risk assessment of New Jersey's transportation infrastructure*. Rapport d'étude.

Peings Y., et al. *Le climat de la France au XXIe siècle. Scénarios régionalisés* [en ligne]. Sous la direction de Jouzel J., Volume 1. Paris (France) : Ministère de l'Ecologie, du Développement durable, des Transports et du Logement, 2011, 140p. Disponible à l'adresse : <http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/onerc_rapport_mission_jouzel_25janv2011_complet_V2_Web_VF.pdf>

Peings Y., et al. *Le climat de la France au XXIe siècle. Scénarios régionalisés. Indices de référence pour la métropole* [en ligne]. Sous la direction de Jouzel J., Volume 2. Paris (France) : Ministère de l'Ecologie, du Développement durable, des Transports et du Logement, 2012, 303p. Disponible à l'adresse : <http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/ONERC_Rapport_scenarios_reference_fevrier_2012_Web_VF.pdf>

Piazza M., et al. *Évaluation du changement climatique sur les zones de montagne en France à partir des méthodes de régionalisation*. *La Houille Blanche*. 2012. Sous presse.

Planton S., et al. *Évolution du niveau de la mer* [en ligne]. Sous la direction de Jouzel J., Volume 3. Paris (France) : Ministère de l'Écologie, du Développement durable, des Transports et du Logement, 2012, 49p. Disponible à l'adresse : <http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/ONERC_Rapport_niveau_de_la_mer_Web_VF.pdf>

Schultz, C. *The identification of critical road infrastructures – The case of Baden-Wuerttemberg*, Thèse de doctorat : Économie : Institut de sciences économiques de Karlsruhe, 2012, p.145.

Sétra. *Maîtrise des risques. Application aux ouvrages d'art*. Mayenne (France) : Sétra, 2013, 92p.

STAC. *Étude de vulnérabilité des aéroports vis-à-vis du changement climatique. Phase 2 : méthodologie d'évaluation de la vulnérabilité des infrastructures aéroportuaires aux impacts du changement climatique*. 2013, 72p.

Taylor M. A., S. V. Sekhar et G. M. D'Este. Application of accessibility based methods for vulnerability analysis of strategic road networks. In : *Networks and Spatial Economics*, 2006, volume 6, n°3-4, p. 267-291, DOI : 10.1007/s11067-006-9284-9.

UICN. *Changement climatique et biodiversité dans l'outre-mer européen* [en ligne]. Sous la direction de Petit J. et Prudent G. Gland (Suisse) et Bruxelles (Belgique) : UICN : réimpression, 2010, 196p. ISBN : 978-2-8317-1322-9. Disponible à l'adresse : <<http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/ONERC-uicn-juillet2008.pdf>>

VDOT- Virginia Department of Transportation. *Assessing Vulnerability and Risk of Climate Change Effects on Transportation Infrastructure. Hampton Roads Virginia Pilot* [en ligne]. Sans date, 36p. Disponible à l'adresse : <http://www.virginia.edu/crmes/fhwa_climate/files/finalReport.pdf>

URS. *Adapting Energy, Transport and Water Infrastructure to the Long-term Impacts of Climate Changes* [en ligne]. 2010, 194p. Disponible à l'adresse : <https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/183472/infrastructure-full-report.pdf>

WSDOT - Washington State Department of Transportation. *Climate Impacts Vulnerability Assessment – Report* [en ligne]. 2011, 70p. Disponible à l'adresse : <<http://www.wsdot.wa.gov/NR/rdonlyres/B290651B-24FD-40EC-BEC3-EE5097ED0618/0/WSDOTClimateImpactsVulnerabilityAssessmentforFHWAFinal.pdf>>

10 - Études de cas

10.1 - Plan National Adaptation au Changement climatique – Évaluation des enjeux trafic via l'utilisation d'un modèle de déplacement

L'impact du changement climatique sur les réseaux de transports va probablement s'aggraver au fil des années. Les systèmes de transport jouent un rôle prépondérant dans l'économie et sont, de plus, sensibles à de nombreux aléas. Afin de préparer les améliorations à apporter aux infrastructures de transports pour les rendre résilientes et résistantes au changement climatique, il est nécessaire d'analyser leurs vulnérabilités. C'est dans ce cadre que le PCI MOD² a réalisé ce rapport.

Sur un réseau d'infrastructure, certains liens sont plus sensibles aux perturbations que d'autres. En effet les perturbations peuvent entraîner une augmentation globale, de la durée des déplacements et de la congestion. Il existe aussi des liens qui ne sont pas vulnérables eux-mêmes, mais qui contribuent à la robustesse globale du réseau : en leur absence, une perturbation pourrait avoir des répercussions beaucoup plus importantes, car les itinéraires de substitution seraient peu nombreux et peu robustes.

L'objectif de cette étude est de concevoir une méthodologie pour évaluer la vulnérabilité et l'importance des routes dans un réseau de transport. Elle est axée uniquement sur le réseau routier et étudie l'impact de perturbations localisées sur une échelle à moyen terme, c'est-à-dire lorsque les conducteurs ont adapté leurs itinéraires, mais sans changer de mode de transport ou de destination. Les impacts générant dommages et blessés sont hors périmètres de l'étude.

10.1.1 - Évaluation des enjeux

L'étude se décompose en deux étapes. La première présente des éléments afin de comprendre et d'appréhender le problème sur un exemple simple : la rupture d'un tronçon spécifique de l'autoroute A13 reliant Paris à Rouen. Pour réaliser cette simulation un modèle de trafic statique est utilisé sur le corridor Baie-de-Seine Île-de-France. Les conséquences sont présentées et discutées en détail au regard de nombreux indicateurs, comme le temps de trajet, le coût généralisé, et l'accessibilité. Cet exemple permet de mettre en lumière une importante variation de l'ensemble des indicateurs, notamment le temps total passé sur le réseau, qui augmente de 83 000 heures par jour environ, et la distance passée sur le réseau qui augmente quant à elle de 1 million de kilomètre.

Durant cette première étape, l'exemple a ensuite été étendu à plusieurs tronçons de l'A13 ainsi qu'à différentes routes départementales structurantes du corridor Baie-de-Seine Île-de-France. Les indicateurs utilisés pour l'analyse sont identiques au premier exemple. Ces exemples ont permis de montrer que la seule analyse du trafic initial n'est pas un indicateur satisfaisant pour étudier la vulnérabilité d'un tronçon routier. L'indicateur le plus pertinent pour observer l'enjeu global d'un réseau de transports, obtenu à l'aide du modèle de trafic, est le coût généralisé. Cependant l'utilisation du modèle a été faite sans varier le choix de destination, ni la répartition modale. Ainsi cette hypothèse simplificatrice a probablement pour conséquence une surestimation des impacts.

La deuxième étape du rapport présente une méthodologie d'analyse globale d'enjeux d'un réseau de transport. Le procédé consiste à tester individuellement tous les tronçons d'un réseau et à quantifier les impacts, donc, le coût généralisé. Cette méthodologie est appliquée à deux modèles existant, d'une part le modèle du corridor Baie-de-Seine Île-de-France et d'autre part le modèle de l'agglomération rouennaise. Pour les deux modèles, les axes entraînant la plus forte augmentation du coût généralisé ne sont pas forcément les axes ayant le plus haut niveau de trafic. La méthodologie testée est simple, mais nécessite d'avoir un modèle de trafic, qui est par ailleurs suffisamment simplifié pour limiter le temps de calcul nécessaire, lorsque celui-ci est trop

complexe, l'étude recommande de sélectionner un certain nombre d'arcs considérés comme critiques.

Dans les cas où il n'existe pas de modèle de trafic, l'étude propose une méthode simplifiée. Cette méthode propose d'identifier, pour chaque tronçon, sa participation à la résilience globale du réseau, en identifiant la nature et le volume du trafic ainsi que les itinéraires de substitutions. Pour cela, les itinéraires sont notés qualitativement sur leur capacité à absorber le report de trafic. Puis en fonction des résultats pour chaque itinéraire, l'enjeu du tronçon est déterminé. Cependant, les personnes souhaitant mettre en œuvre ce type de méthode doivent avoir une excellente connaissance de la structure des trafics sur le réseau.

Le schéma suivant permet de résumer la méthodologie proposée pour l'analyse des enjeux liés à la vulnérabilité d'un réseau de transport :

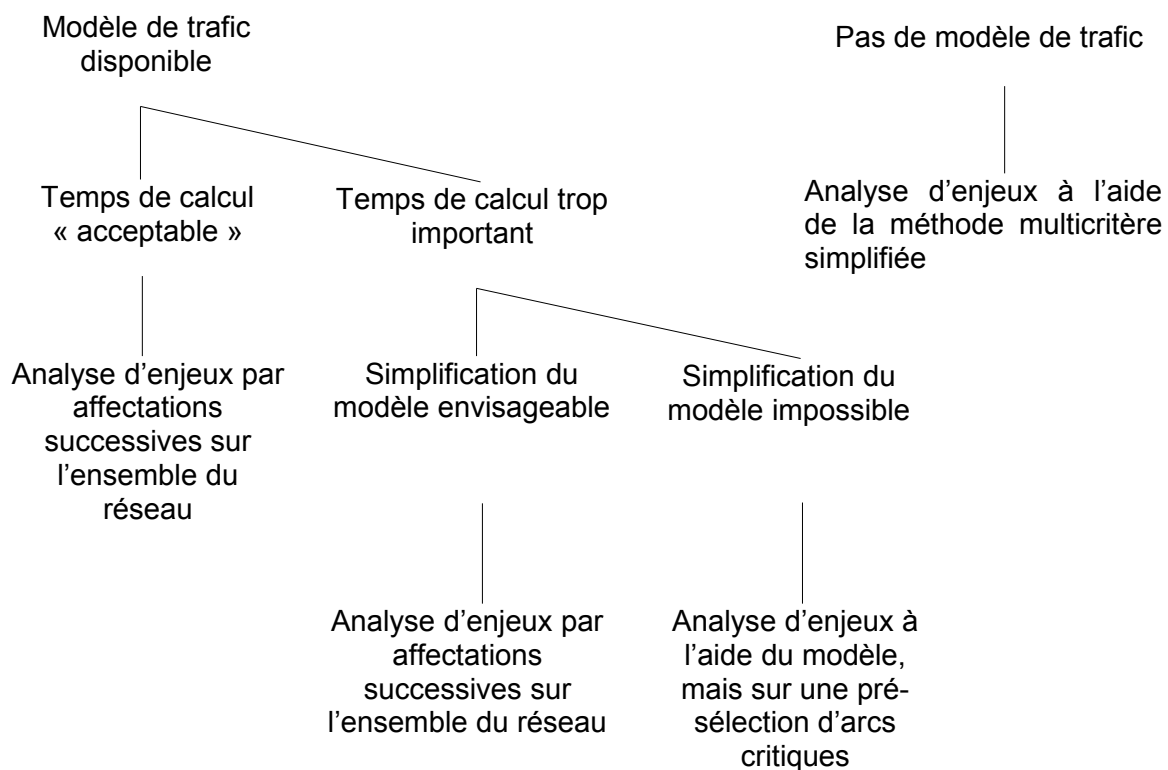


Figure 10 : Méthodologies d'analyse d'enjeux liés à la vulnérabilité d'un réseau de transport

Cependant, il convient de rappeler que cette méthode ne considère que la rupture d'arcs isolés, or lors d'un aléa climatique, il existe une possibilité qu'il y ait une rupture simultanée de plusieurs arcs. Dans ce cas la méthode automatique ne convient pas, et il serait nécessaire de recourir à une analyse simplifiée sur une sélection de tronçons.

10.1.2 - Référence bibliographique

CEREMA. *Plan National Adaptation au Changement climatique – Évaluation des enjeux trafic via l'utilisation d'un modèle de déplacement*. Rapport d'étude. 2014, 32p. ISRN : CEREMA-DteclTM-2014-008-1. Disponible à l'adresse : <http://www.infra-transport-materiaux.cerema.fr/IMG/pdf/1405w-rapport_PNACC.pdf>

10.2 - Évaluation du coût des impacts du changement climatique et de l'adaptation en France

Cette étude vise à évaluer les surcoûts dus à l'impact d'une canicule ou d'une submersion temporaire ou permanente liée à la hausse du niveau marin sur une route du réseau routier national métropolitain non concédé (routes nationales).

10.2.1 - Contexte économique

Les infrastructures de transport terrestre jouent un rôle important dans l'économie française. La valeur ajoutée de la branche transport représentait 4,2 % du PIB en 2007 : « les seules dépenses de production en infrastructures de transport, tous modes cumulés représentent environ 0,6 % du PIB. »

Parmi les différents types de réseaux de transport terrestre : réseau routier, réseau ferroviaire et voies fluviales navigables, seul le réseau routier a été étudié dans le cadre de cette étude. Il représente en effet le plus grand linéaire d'infrastructures : 1 027 002 km en 2007, pour 31 154 km de voies ferrées et 8 501 km de voies fluviales navigables. Il a également un poids prépondérant dans le trafic de marchandises (presque 87 % des tonnes.kilomètres effectués en France) et le transport de voyageurs (83,8 % des voyageurs.kilomètres réalisés sur l'ensemble des réseaux d'infrastructures terrestres).

Au sein des différents types de réseaux routiers, seul le réseau routier national non concédé, géré directement par l'État a été étudié. Ce dernier ne représente que 1,2 % du linéaire routier, mais il supporte une part importante du trafic français : 25,5 % de la circulation routière globale en France en 2007. Les autres types de réseaux n'ont pas pu être étudiés en raison d'un manque de données.

Le coût de reconstruction à neuf du réseau routier national non concédé (RRN NC) en service au 31 décembre 2007 – soit 12 359 km – serait de 121,309 Md€ (milliards d'euros) selon les conditions économiques d'août 2008. La valeur patrimoniale du RRN NC serait alors de 9,815 millions d'euros par km. Son coût de remise en état (chaussées et ouvrages d'art) est estimé à 3,014 Md€, soit 244 k€ par km.

10.2.2 - Surcoût dû à l'impact d'une canicule sur le RRN NC

Principaux impacts d'une canicule sur les infrastructures routières

Le climat fait partie des paramètres à prendre en compte dans un projet routier. En ce qui concerne les évolutions de température, elles sont prises en compte de différentes façon dans un projet routier. Une évolution des températures peut impacter notamment le dimensionnement des structures de chaussées ou encore, le choix des matériaux et la formulation des enrobés. Il semblerait que l'orniérage par fluage ou ressuage soit le principal impact dû à une augmentation des températures moyennes ou à des périodes de fortes chaleurs. Il est possible d'y répondre grâce à un sur-classement sans changement de type de produit. L'évaluation de l'impact économique de cette modification est difficile, car les prix sont donnés par type de produits. Finalement, un changement de formulation d'enrobé ne semble pas entraîner des surcoûts significatifs.

Méthode d'évaluation économique du coût d'une canicule

Le coût de l'impact d'une canicule sur le RRN NC a été évalué à l'aide de trois approches complémentaires :

- une enquête de terrain, menée auprès des services déconcentrés, relative aux éventuels désordres causés par la canicule de 2003 sur les chaussées et ouvrages d'art ;
- une analyse de données budgétaires, pour déterminer si la canicule de 2003 a engendré des surcoûts d'entretien. En parallèle, l'examen des Indices de Qualité des Routes Nationales (IQRN) et des Ouvrages d'Art (IQOA) pour le RRN NC a permis de vérifier si, cette même année, des dégradations de qualité ont eu lieu en cas de remise en état non effectuée ;
- et enfin, une évaluation par benchmark basé sur une bibliographie internationale. Une tentative de chiffrage des coûts des impacts a été réalisée à l'aide d'une transposition brute de cas étrangers à la France. Cette méthode d'évaluation comporte cependant de

nombreuses incertitudes. En effet, elle se base principalement sur une extrapolation des données liées à une seule canicule française : la canicule de 2003 et sur des données issues de travaux britanniques et australiens, dont les conditions climatiques, de conception et d'entretien et enfin, d'utilisation des routes diffèrent des conditions françaises. Elle ne tient pas compte des éventuelles spécificités géographiques. Enfin, les évaluations économiques réalisées tiennent uniquement compte de la valeur patrimoniale globale du réseau et des éventuels coûts de réparation.

Résultats de l'enquête de terrain portant sur la canicule de 2003

D'après l'enquête de terrain réalisée auprès de 22 services déconcentrés et portant sur la canicule de 2003, celle-ci a engendré de nombreux désordres ponctuels, mais pas de désordre généralisé. Pour les ouvrages d'art, la sécheresse a provoqué un retrait des sols et des remblais, notamment pour les sols argileux. Ce retrait a été à l'origine de fissures au droit des ponts et d'affaissements de remblais. Pour le réseau routier, la canicule a causé d'une part, un ressuage plus important des enduits et enrobés coulés à froid et, d'autre part, une multiplication importante des fissures transversales avec apparition de bourrelets dus au flambement des dalles, pour les chaussées à base de liants hydrauliques.

Selon les experts ayant participé à la rédaction du présent rapport, au vu de l'absence de désordres de grande ampleur et de l'incertitude relative des causes de désordres constatés, il semblerait que les spécifications actuelles de dimensionnement et d'entretien de chaussées soient satisfaisantes malgré le contexte d'augmentation de températures. Toutefois, les impacts potentiels de canicules répétées sont mal connus. Ils pourraient engendrer des impacts économiques plus importants pour les chaussées confrontées à un trafic lourd et si la dessiccation des sols crée des désordres qui se propagent depuis les fondations des ouvrages d'art.

Résultats de l'examen de données budgétaires et des IQRN et IQOA

L'analyse des données budgétaires n'a pas permis d'évaluer l'impact économique de la canicule de 2003. Les raisons en sont multiples : les données sont agrégées au niveau national, les dépenses sont présentées par type d'entretien sans que les causes à l'origine de la nécessité d'entretien soit expliquée, etc.

L'analyse de l'IQRN montre une dégradation générale de l'état des réseaux depuis 1995 / 1997. D'après le rapport, « celle-ci est très liée aux moyens qui ont été accordés à l'entretien routier pendant cette période ». La canicule de 2003 ne semble pas avoir eu un effet significatif sur cet état, mais il est possible qu'un réseau en bon état soit moins impacté à l'avenir qu'un réseau partiellement dégradé. Le résultat est similaire pour l'examen de l'IQOA : « On observe une dégradation lente des ouvrages qui nécessite une surveillance et des interventions d'entretien et de réhabilitation afin de maintenir une bonne qualité de service sur le réseau. »

Comme pour l'enquête de terrain, **aucun impact significatif de la canicule de 2003 sur la qualité des réseaux n'a pu être déterminé. L'examen budgétaire n'a pas permis de conclure quant à l'impact économique de la canicule vis-à-vis du RRN NC.**

Résultats de l'évaluation par benchmark

En France comme à l'international, peu de travaux portent sur l'évaluation des coûts dus aux impacts du changement climatique sur les infrastructures de transport. La liste des études bibliographiques permettant un benchmark en est d'autant plus restreinte pour ce rapport qu'il se concentre uniquement sur l'évaluation des coûts dus aux impacts d'une augmentation de température sur les réseaux routiers.

Seules quelques études donnent des valeurs chiffrées des impacts d'une canicule. Des études britanniques ont étudié des données budgétaires des surcoûts de dépenses d'entretien dus à la canicule de 2003 (Defra, 2006 ; Hudson, 2006). D'après ces études, une année d'une canicule entraînerait un surcoût de 15 % du budget annuel d'entretien consacré à la réparation des dégâts.

Selon une étude australienne (Austroads, 2004), une diminution des précipitations liée à une augmentation des températures aboutirait à une meilleure durabilité de la chaussée. Cette situation semblerait globalement vérifiée en France, avec quelques réserves selon les saisons. Ainsi, l'étude prévoit des variations annuelles du coût d'entretien global de l'ordre de -2 à +4 %.

En France, le coût annuel d'entretien du réseau en 2007 était de 426 M€. En 2008, il était de 456 M€. Sur la base de l'estimation britannique, **le surcoût annuel d'entretien consacré à la réparation des dégâts varierait entre 64 M€ et 70 M€ lors d'une année touchée par une canicule**. D'après l'application de l'étude australienne à la France, **à l'horizon 2100, le surcoût annuel d'entretien global serait de -9 M€ à +18 M€**. Ce dernier chiffre concorde avec les valeurs britanniques.

10.2.3 - Surcoût dû à l'impact d'une submersion marine temporaire ou permanente sur le réseau routier

Approche par surcoût relatif

Dans le cadre de cette étude, l'hypothèse d'une augmentation du niveau de la mer de 1 m à l'horizon 2100 a été retenue. Toute infrastructure située en-dessous du trait de côte actuel +1 m serait alors concernée par une submersion définitive. Le surcoût dû à la submersion serait alors égal à la valeur patrimoniale moyenne du réseau.

Le risque de submersion temporaire est généralement évalué à partir du niveau centennal. D'après un travail conjoint du Service Hydrographique et Océanographique de la Marine (SHOM) et de la Direction Technique Maritime et Fluviale (DTecEMF) du CEREMA, les submersions centennales sont estimées en 2008 à 1,5 m NGF en Méditerranée et 3 à 8 m NGF sur la façade Manche et Atlantique. Le zéro NGF correspond au niveau moyen de la mer à Marseille. Une augmentation du niveau du trait de côte engendrerait une augmentation de la cote centennale et de la fréquence de ses périodes de retour. À l'horizon 2100, le présent rapport considère que toute infrastructure située au-dessus de la cote centennale actuelle +1 m est concernée par un risque de submersion temporaire. Les rédacteurs de ce rapport se basent sur une hypothèse de coût de réparation des dégâts causés par une submersion temporaire d'ampleur significative, de 1 à 2 fois égale au coût moyen annuel kilométrique de remise en état du réseau routier national.

Approche par l'étude topographique des zones basses

Les zones basses sont des zones situées sous des niveaux extrêmes centennaux. La méthode employée ici consiste à croiser différentes bases de données topographiques pour déterminer les réseaux d'infrastructures routières situés dans les zones :

- sous le niveau marin centennal actuel, moins un mètre ;
- sous le niveau marin centennal actuel ;
- sous le niveau marin centennal, plus un mètre (zones qui peuvent être submergées par un événement centennal, sous l'hypothèse d'une élévation du niveau marin de 1 m).

Les résultats montrent que les réseaux les plus touchés, en linéaire d'infrastructure, seraient les autoroutes et voiries communales. Il existe par ailleurs des disparités départementales. Pour prendre en compte les incertitudes liées à la méthodologie, **le rapport propose de retenir, pour les routes nationales métropolitaines (hors autoroutes), un surcoût de 2 000 M€ en cas d'élévation d'ensemble de 1 m du niveau de la mer**.

10.2.4 - Référence bibliographique

ONERC. *Évaluation du coût des impacts du changement climatique et de l'adaptation en France – Rapport de la seconde phase – Partie III – Rapports des groupes sectoriels* [en ligne]. 2009, 231p. Disponible à l'adresse : http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/partie_3_rapports_des_groupes_sectoriels.pdf

10.2.5 - Bibliographie

Austrroads. *Impact of climate change on road infrastructure*. Sous la direction de Norwell G. : Austroad Sydney publication n° AP-R243/04. 2004, 148p.

Defra. Quantify the cost of the hot summer of 2003. In : *Climate change impacts and adaptation: cross-regional research programme/project E*. Sous la direction de Metroeconomica Ltd. 2006, 95p.

Hudson L. Highway asset management case study. In : *UK Climate Impact Programme method case study*. 2006, 14p.

10.3 - Climate Impacts Vulnerability Assessment – Washington State Department Of Transportation Pilot Study

Depuis 2007, l'état de Washington a mis en place de nombreuses actions pour étudier le changement climatique et ses impacts. Ces actions ont notamment abouti en 2009 à la création, au sein du Département Transport de l'État de Washington – Washington State Department Of Transportation (WSDOT), d'une équipe chargée d'évaluer la vulnérabilité des infrastructures de transport face aux événements climatiques extrêmes et aux changements climatiques. Cette même année, l'Administration Fédérale des Routes a développé une méthodologie d'analyse de risque des infrastructures de transport face au changement climatique. Elle a également fait appel à différents partenaires administratifs pour tester cette méthodologie. Parmi ces partenaires figurent le WSDOT, dont les résultats de l'expérimentation menée sont présentés ici.

Pour mener à bien cette expérimentation, le WSDOT a rassemblé certains de ses experts et gestionnaires locaux lors de différents ateliers.

10.3.1 - Inventaire des éléments du réseau de transport

Un inventaire des infrastructures de transport dont le WSDOT est propriétaire ou gestionnaire a été réalisé sur la base d'une enquête auprès d'experts. Les données obtenues ont été complétées à l'aide d'une base de données spécifique aux ouvrages d'art. Les infrastructures étudiées comprennent les aéroports, les terminaux de ferry, quatre voies ferrées, les routes d'état et les autoroutes interétatiques (y compris les ponts, tunnels, voies piétonnes, etc.), les dépendances routières ainsi que divers bâtiments liés aux réseaux de transport, dont les tours radio et les hangars de maintenance. L'enquête a permis de recueillir de nombreuses données avec des niveaux de détail hétérogènes. Ensuite, un important travail de conversion des données en un format harmonisé et utilisable pour des analyses cartographiques a ensuite été mené.

10.3.2 - Analyse des projections climatiques

Le WSDOT a ensuite réalisé un listing et une analyse des projections climatiques attendues à Washington. Il s'est pour cela appuyé sur de nombreux travaux, dont un rapport d'évaluation des impacts du changement climatique pour l'état de Washington (Washington, 2009) ainsi que des données climatiques spatialisées, fournies par l'Université de Washington. Les principales tendances climatiques projetées pour l'État de Washington sont les suivantes :

- trois hypothèses d'élévation du niveau marin : +2 pieds, +4 pieds et +6 pieds (soit environ 0,6 m, 1,2 m, et 1,8 m respectivement) ont été retenues et modélisées ;
- aucun changement significatif du volume moyen annuel de précipitation n'est projeté pour Washington. Cependant, le régime de précipitations est susceptible d'évoluer. Pour en montrer les conséquences potentielles pour les infrastructures, deux cartes ont été réalisées. La première montre les évolutions du type de précipitations reçues par les bassins versants : majoritairement sous forme de pluie, de neige ou intermédiaire. La seconde présente les pourcentages d'évolution de l'humidité des sols pour la période 2030-2059 ;
- des augmentations de la température moyenne annuelle et de la fréquence des événements extrêmes sont attendues. Des cartes présentant les moyennes maximales, actuelles et projetées de températures pour les mois de juin, juillet et août ont été réalisées. Il en va de même pour les moyennes hivernales minimales ;
- des cartes d'incendies passés ont également été utilisées.

Ces tendances ont été représentées sous forme de cartes utilisées lors des ateliers.

10.3.3 - Analyse de vulnérabilité

L'analyse de vulnérabilité a été menée de façon qualitative, car :

- cela permet d'obtenir une première évaluation globale et rapide de la vulnérabilité des infrastructures au changement climatique ;
- ce type d'analyse est préférable lorsque les données ne sont pas disponibles uniformément et rapidement sous une forme chiffrée homogène.

Les réseaux d'infrastructures ont été tout d'abord décomposés en segments, un segment pouvant comprendre plusieurs éléments d'infrastructures : chaussées, tunnels, etc. Ces segments ont ensuite été évalués par des experts sur la base de deux variables :

- un niveau de criticité, allant de 1 à 10. Ce niveau se base sur des paramètres tels que le type de route, le volume de trafic, l'existence d'itinéraires alternatifs disponibles, etc. ;
- les impacts potentiels du changement climatique sur les infrastructures, selon une échelle à 10 niveaux. Pour évaluer ces impacts potentiels, les experts et gestionnaires ont tout d'abord listé les événements climatiques actuels affectant leurs réseaux, puis les ont confrontés aux projections climatiques à l'aide des cartes réalisées précédemment.

Ces deux variables ont ensuite été croisées sur une matrice de vulnérabilité (figure 11).

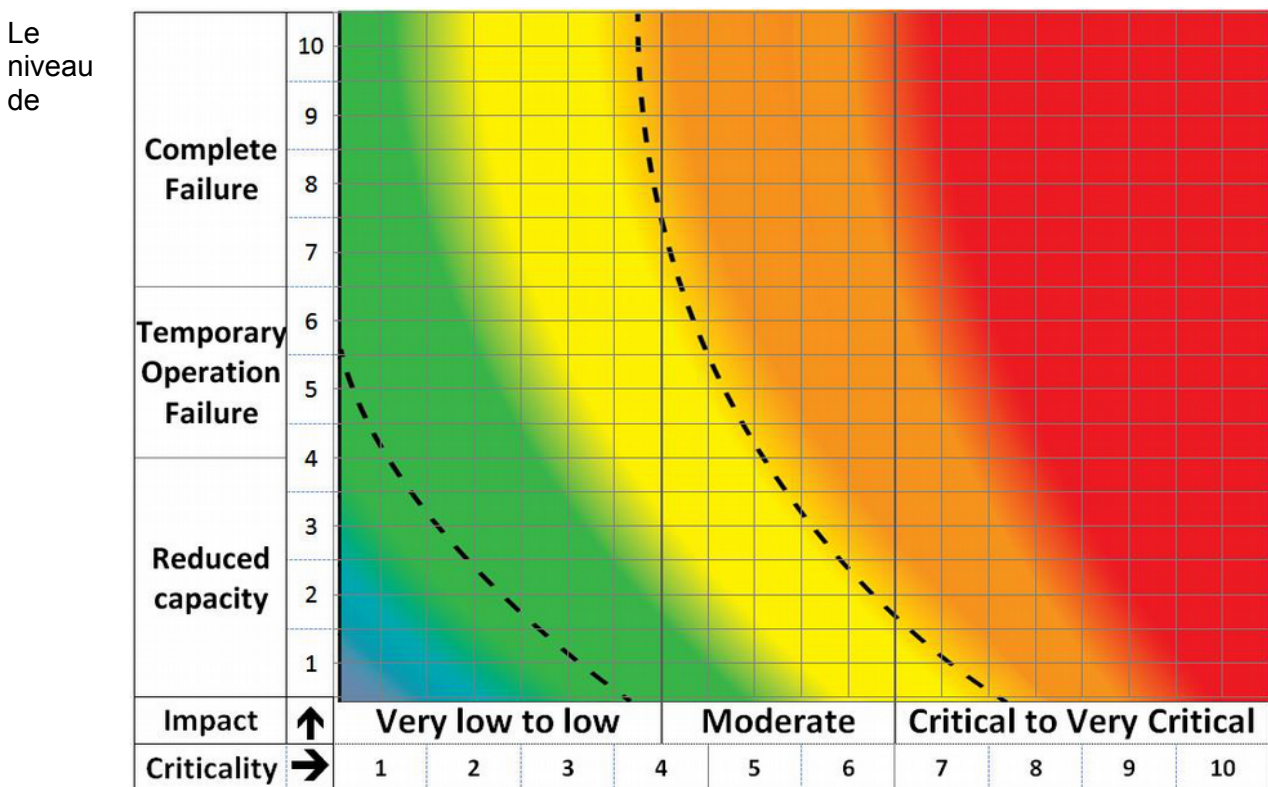


Figure 11 : Matrice de vulnérabilité. Source : WSDOT, 2011

vulnérabilité obtenu a ensuite été reporté sur une carte (figure 12). Ce niveau de vulnérabilité, les notes attribuées à chacune de ces variables, le segment de route étudié ainsi que diverses autres informations ont ensuite été consignées dans un tableur.

10.3.4 - Conclusion

La carte ci-dessous représente le niveau de vulnérabilité évalué des différentes infrastructures étudiées. Un segment de réseau qui apparaît en rouge n'est pas forcément très vulnérable dans son ensemble : en général, seul un point du réseau peut être extrêmement vulnérable. De façon générale, les segments les plus vulnérables sont situés :

- dans des zones de montagne ;
- sur des pentes raides ;
- en zones inondables ;
- le long de rivières alimentées par la fonte des glaciers ;

- dans des zones susceptibles d'être inondées à cause l'élévation du niveau des mers.

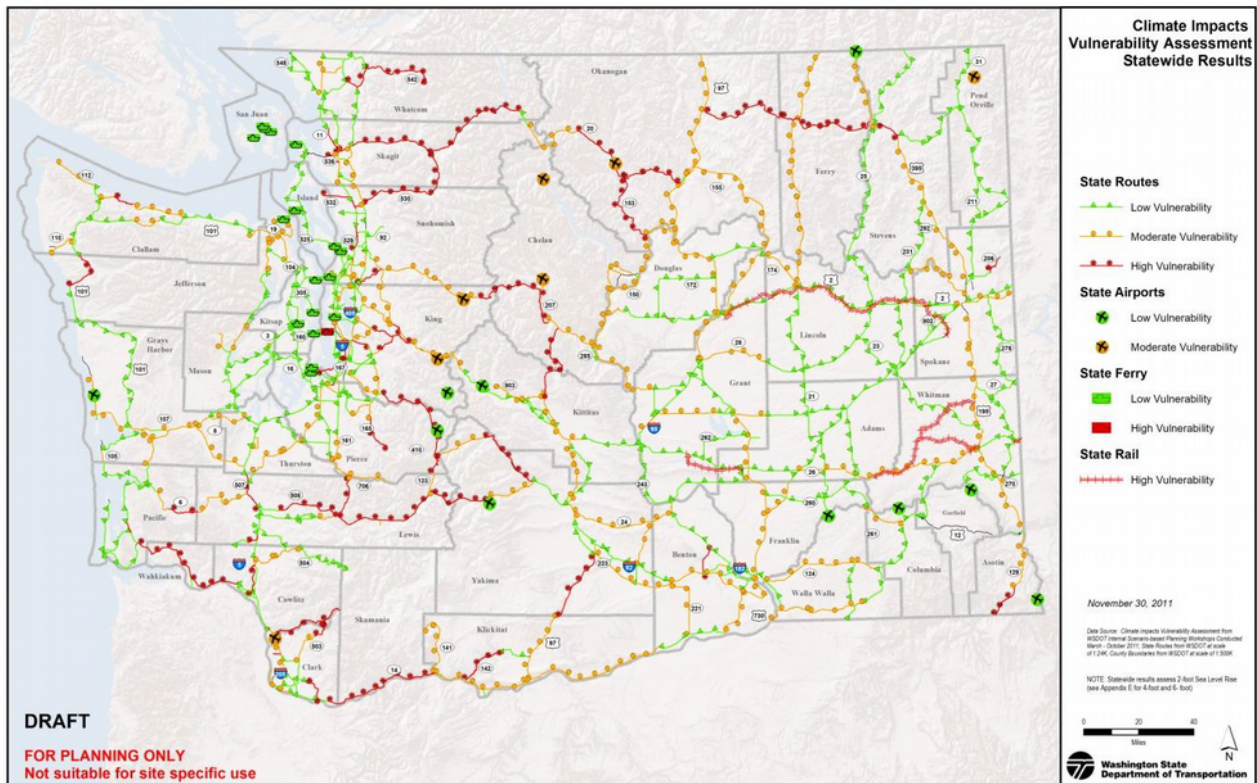


Figure 12 : Niveaux de vulnérabilité des différentes infrastructures étudiées. WSDOT, 2011

10.3.5 - Référence bibliographique

WSDOT – Washington State Department of Transportation. *Climate Impacts Vulnerability Assessment – Report* [en ligne]. 2011, 70p. Disponible à l'adresse : <http://www.wsdot.wa.gov/NR/ronlyres/B290651B-24FD-40EC-BEC3-EE5097ED0618/0/WSDOTClimateImpactsVulnerabilityAssessmentforFHWAFinal.pdf>

10.3.6 - Bibliographie

The Climate Impacts Group, University of Washington. *The Washington Climate Change Impacts Assessment. Evaluating Washington's Future in a Changing Climate. Sous la direction de:* M. McGuire Elsner, J.Littell et L Whitely Binder. Center for Science in the Earth System, Joint Institute for the Study of the Atmosphere and Oceans, University of Washington, Seattle, Washington. 2009, 405p. Disponible à l'adresse : www.cses.washington.edu/db/pdf/wacciareport681.pdf

10.4 - Assessing vulnerability and risk of climate change effects on transportation infrastructure – Hampton Roads Virginia Pilot

Aux États-Unis, l'Administration Fédérale des Routes – Federal Highway Administration (FHWA) – a développé en 2009 une méthodologie d'analyse de vulnérabilité des infrastructures de transport face au changement climatique. Celle-ci est destinée aux aménageurs et aux décideurs du domaine des transports, qui peuvent s'en servir comme outil pour identifier leurs infrastructures les plus exposées et vulnérables face au changement climatique.

Pour fournir aux aménageurs et décideurs une méthodologie suffisamment robuste, la FHWA a participé au financement d'études de test, appelées « études pilote ». Les responsables des études sélectionnées ont ainsi pu proposer des pistes d'amélioration méthodologique à la FHWA. L'étude-pilote présentée ci-dessous a été réalisée par le Département de Transport de Virginie (Virginia Department of Transportation – VDOT) (pilote de l'étude), l'Université de Virginie (University of Virginia), la Commission du District d'Aménagement des Routes de Hampton (Hampton Roads Planning District Commission – HRPDC) et l'Organisme d'Aménagement des Transports de Hampton Roads (Hampton Roads Transportation Planning Organization – HRTPO).

10.4.1 - Aire d'étude

L'aire d'étude correspond à l'aire métropolitaine de Hampton Roads, située au sud-est de la Virginie. Elle est particulièrement exposée aux inondations, notamment par élévation du niveau marin : elle englobe la baie de Chesapeake, où trois grandes rivières se jettent ; elle est par ailleurs majoritairement à basse altitude.

Les enjeux humains et économiques y sont importants : 1,7 millions d'habitants y vivaient en 2010. Par ailleurs, cette zone est un centre économique majeur pour l'état de Virginie et un centre militaire important pour le pays. Un des ports de pêche parmi les plus grands de la côte Est et une des plus grandes bases navales du monde y sont implantés, ainsi que de nombreux centres militaires et des industries liées au tourisme.

10.4.2 - Données du changement climatique

Parmi les évolutions climatiques généralement attendues figurent : les évolutions des régimes de précipitations, la hausse en fréquence et en intensité des événements extrêmes et notamment, l'augmentation du nombre de jours de vagues de chaleur et enfin, l'augmentation du niveau marin.

Dans la région de Hampton Roads, l'élévation du niveau marin touche d'ores et déjà les zones de plus basses altitudes. Hampton Roads subit également un phénomène de subsidence, aggravé entre autres par la fonte des glaciers et des phénomènes d'érosion. Les processus de subsidence et d'élévation du niveau marin se combinent et augmentent l'élévation relative du niveau marin par rapport aux terres, pouvant ainsi aggraver les impacts du changement climatique. Enfin, du fait de la proximité des côtes, cette région est particulièrement susceptible d'être touchée par des tempêtes tropicales, des ouragans et des tornades. Les précédents événements de ce type qui l'ont impactée ont causé d'immenses dégâts matériels, humains et financiers.

De nombreuses études sur les évolutions climatiques à venir et leurs impacts sur les populations, la biodiversité, etc., notamment pour la région de Hampton Roads, ont été menées. Le présent rapport a pris en compte ces études. Il a également permis d'explorer la question de l'impact potentiel du changement climatique dans le domaine des transports, jusqu'alors relativement peu étudiée et par conséquent, peu intégrée dans la stratégie de transport à long terme de la région de Hampton. Toutefois, en raison de contraintes fiscales, il est probable que les données climatiques restent encore peu utilisées comme outil majeur d'aide à la décision dans les prochaines stratégies.

10.4.3 - Adaptation de la trame méthodologique développée par l'Administration Fédérale des Routes (FHWA)

La trame méthodologique proposée par la FHWA est constituée de trois grandes étapes :

- réaliser un inventaire du patrimoine des infrastructures de transport ;
- définir des scénarios d'évolutions climatiques susceptibles d'impacter le patrimoine d'infrastructures de transport. Ces scénarios peuvent être associés à des scénarios socio-économiques ;
- redéfinir de nouveaux critères de priorisation incluant le changement climatique l'aide d'un outil d'aide à la décision multicritère.

Cette trame méthodologique souple a été adaptée à l'aire d'étude de Hampton Roads.

Réaliser un inventaire du patrimoine d'infrastructures de transport

Un inventaire du patrimoine d'infrastructures de transport a été réalisé sur la base de propositions des différents partenaires ayant participé à la réalisation de l'étude. Ce patrimoine a été divisé en quatre catégories. Dans chacune de ces catégories, le patrimoine de transport a été priorisé selon des critères déjà utilisés par les aménageurs ou définis dans le cadre de cette étude. Les catégories sont présentées ci-dessous.

Catégorie « éléments du patrimoine existant ».

- Description de la catégorie. Il s'agit par exemple des routes, ponts, tunnels, etc., existant. Les données relatives à ce patrimoine sont issues de sources variées, et notamment d'un système de management du patrimoine du VDOT. Ce système référence une liste d'environ un millier d'infrastructures. Il a été choisi de réduire la liste d'infrastructures en sélectionnant des infrastructures prioritaires, à savoir celles situées sur les routes d'évacuation en cas d'ouragan, à volume de trafic important, à basse altitude ou encore, celles dont la maintenance est prioritaire. Deux centres de gestion de trafic ont été ajoutés à cette liste restreinte.
- Critères de priorisation existant. La stratégie de planification des transports à long terme de la région de Hampton Roads propose des critères de priorisation de ce patrimoine de transport. Ces critères sont entre autres : mieux impliquer le public dans le développement du système régional de transport (critère n°1), améliorer la sécurité des transports pour les usagers motorisés et non motorisés (critère n°4), améliorer l'accessibilité (critère n°7), etc.

Catégorie « projets d'infrastructures ».

- Description de la catégorie. La stratégie régionale de planification des transports à long terme propose 155 projets d'infrastructures à l'horizon de trente ans. Ces projets ont été divisés en sous-catégories dans le cadre de cette étude, par exemple : tunnels et ponts, autoroutes, etc.
- Critères de priorisation existant. La stratégie de planification des transports à long terme propose une priorisation des projets selon trois grandes catégories de critères : utilité du projet, viabilité économique, viabilité du projet. Chacune de ces catégories est elle-même divisée en sous-catégories. Par exemple, les sous-catégories définies pour « l'utilité du projet » sont entre autres : la continuité et la connectivité de l'infrastructure projetée, sa sécurité et sûreté, etc.

De la même façon, des critères de priorisation existant ont été listés pour les deux catégories suivantes :

- catégorie « zones d'étude de trafic ». Des zones d'étude de trafic (Traffic Analysis Zone) ont été choisies de façon aléatoire, de façon à avoir une bonne représentativité des localisations géographiques et des tailles de zones.
- Catégorie « politiques de transport ». Des politiques de transport multimodal à différents échelons administratifs (état, région), ont été choisis d'après leur pertinence et leurs impacts potentiels sur les infrastructures de transport et l'allocation des fonds dédiés au domaine des transports.

Étudier les données du changement climatique

L'impact des évolutions climatiques sur le patrimoine d'infrastructures dont il est question dans ce rapport a été étudié sur la base de scénarios climatiques. Il a été choisi de ne pas utiliser directement les projections climatiques. En effet, tout d'abord, les projections climatiques sont généralement accompagnées d'un grand nombre d'incertitudes, en particulier lorsqu'elles sont réalisées à une échelle très locale. Par ailleurs, les impacts potentiels des évolutions climatiques sur le patrimoine d'infrastructures sont également projetés et comportent également de grandes imprécisions, que les impacts soient définis sur la base de scénarios ou d'après des projections climatiques. De plus, utiliser des scénarios permet de combiner diverses évolutions du changement climatique. En ce qui concerne Hampton Roads, des évolutions du niveau marin, des ondes de tempêtes dues aux ouragans, des jours de vagues de chaleur et enfin, des précipitations accrues ont été prises en compte dans les scénarios. Dans le cadre de cette étude, les

participants ont été amenés à définir eux-mêmes les horizons et intensités des événements les plus impactant pour leurs infrastructures. Enfin, les scénarios peuvent également combiner les évolutions climatiques avec d'autres facteurs potentiellement impactant, notamment des facteurs socio-économiques. Dans la présente étude ont été combinés avec les évolutions climatiques :

- les effets d'une récession économique ;
- une intervention étatique plus forte ;
- la maintenance et la réparation d'infrastructures existantes selon les conditions économiques actuelles ou dans le cadre d'un meilleur contexte financier ;
- l'apparition d'innovations technologiques ;
- l'augmentation des dégradations écologiques.

Redéfinir de nouveaux critères de priorisation

L'évaluation du patrimoine d'infrastructures les plus vulnérables s'est basé sur un outil d'aide à la décision multicritère. Ce type d'outil est particulièrement adapté à une évaluation :

- sur la base de critères parfois antagonistes ;
- sur la base de connaissances empiriques ou incomplètes ;
- sans modélisation complexe ;
- sur de grandes échelles ;
- qui doit répondre à plusieurs objectifs.

Pour construire un outil multicritère dans le cadre de cette étude, il a été nécessaire de lister les critères de priorisation existants des éléments des différentes catégories de patrimoine étudiées (chapitre) dans un tableur. Chaque élément des différentes catégories a été évalué par rapport à ces critères de priorisation, une note leur a ainsi été attribuée. Les éléments des quatre catégories, ainsi que leur note ont été enregistrés dans le tableur.

Afin de pouvoir obtenir une priorisation des éléments d'infrastructures comparable entre les quatre catégories, une base de priorisation de référence a dû être définie pour toutes les catégories de patrimoine étudiées. Les priorisations ont été recalculées d'après cette nouvelle base. Les nouvelles notes de priorisation obtenues sont comparables, quelle que soit la catégorie étudiée. Ces nouvelles notes ont été enregistrées dans le tableur.

L'impact des scénarios (prenant en compte des évolutions climatiques et éventuellement, d'autres facteurs non-climatiques potentiellement impactant) sur chaque critère de priorisation a été estimé par les experts impliqués dans l'étude : cet impact est-il potentiellement mineur, moyen, majeur ? Lorsque le scénario est susceptible d'avoir un impact majeur sur un critère de priorisation, le niveau de priorisation du dit critère évolue. De nouvelles notes de priorisation sont alors calculées pour toutes les infrastructures. Ces nouvelles notes prennent ainsi en compte l'impact du scénario étudié et donc, d'une évolution climatique potentielle.

Il est ainsi possible par exemple :

- de connaître le niveau de priorisation « de base » de chaque élément de patrimoine étudié, qui ne prend pas en compte de potentielles évolutions climatiques ;
- de connaître le niveau de priorisation de chaque élément de patrimoine étudié selon un scénario donné ;
- de comparer l'impact de différents scénarios sur un ou plusieurs éléments ;
- de savoir quels sont les scénarios les plus impactant pour chaque catégorie de patrimoine ;
- etc.

10.4.4 - Référence bibliographique

VDOT- Virginia Department of Transportation. *Assessing Vulnerability and Risk of Climate Change Effects on Transportation Infrastructure. Hampton Roads Virginia Pilot* [en ligne]. Sans date, 36p. Disponible à l'adresse : <http://www.virginia.edu/crmes/fhwa_climate/files/finalReport.pdf>

10.5 - Étude de vulnérabilité des aéroports vis-à-vis du changement climatique. Méthodologie d'évaluation de la vulnérabilité des infrastructures aéroportuaires aux impacts du changement climatique

Dans le cadre du volet « infrastructures et systèmes de transport » du PNACC, le STAC a réalisé une série de rapports relatifs aux impacts du changement climatique sur les infrastructures aéroportuaires :

- un premier livrable s'est attaché à lister et analyser les impacts potentiels du changement climatique sur les infrastructures aéroportuaires et leur exploitation ;
- un second livrable a permis d'élaborer une méthodologie d'analyse et des indicateurs de vulnérabilité des aéroports ;
- et enfin, le troisième livrable a utilisé cette méthodologie pour estimer la vulnérabilité effective d'aéroports ouverts à la circulation aérienne publique en France métropolitaine et d'outre-mer.

Parmi les étapes de la méthodologie a été réalisée une décomposition de l'infrastructure « aéroport » de façon générique. Cet exemple de décomposition est présenté ci-dessous.

10.5.1 - Décomposition du réseau

La décomposition a été réalisée en deux itérations. Dans la première étape, les impacts potentiels du changement climatique sur les infrastructures aéroportuaires ont été évalués par la décomposition d'un aéroport en trois grandes familles de systèmes ponctuels, à savoir : infrastructure, bâtiments et exploitation :

- l'infrastructure de l'aéroport correspond à l'aire de mouvement – aire de trafic et aire de manœuvre – ainsi qu'aux équipements radioélectriques, techniques et la signalisation permettant les décollages, atterrissages et mouvements des avions sur cette aire ;
- les bâtiments liés aux infrastructures aéroportuaires correspondent aux tours de contrôle ;
- la partie exploitation correspond aux éléments liés au fonctionnement d'un aéroport en mode non dégradé.

Chacune de ces trois grandes familles peut à nouveau être décomposée plus finement en systèmes. À titre d'exemple, l'infrastructure aéroportuaire peut être décomposée de la manière suivante : les accès, les parkings, la piste et les systèmes de piste, le taxiway, l'aire de trafic, les aéroports, les bureaux et autres bâtiments, les passerelles, tours de contrôle, zones liées à l'exploitation, tracteurs engins, capacité de l'aéroport, équipements liés à la navigation aérienne. Les éléments issus de la décomposition de l'aéroport ont été repris dans le tableau suivant (tableau 18) :

Aéroports	Infrastructures	Accès	Type d'accès (routier, ferré, maritime) Nombre d'accès (unique ou plusieurs accès indépendants)
		Parking	Parking unique ou plusieurs parkings, accès aux parkings. Type de parking (souterrain)

			ou aérien)
		Piste, système de pistes	Nombre de pistes Orientations Extension possible Longueur de la plus grande piste
		Taxiway	Unique ou plusieurs routes indépendantes
		Aire de trafic	Unique ou plusieurs autonomes Possibilité d'extension Nombre de postes de stationnement
	Bâtiments	Aérogares (passager, fret)	Terminal (unique ? Plusieurs terminaux autonomes ?) Infrastructure de liaison entre les terminaux (système automatisé type métro ? piéton ? Plusieurs moyens de liaisons entre les terminaux ?)
		Bureaux et autres bâtiments	Localisation du PC crise Équipement alimentant l'aéroport en énergie
		Passerelles	Résistance Nombre Moyens de substitution en nombre suffisant ?
		Tour de contrôle	Alimentation électrique de la tour Accès à la tour Confort thermique de la tour
	Exploitation	Zones liées à l'exploitation	Zone dépôt carburant
Zone ou opération de dégivrage			
Zone SSLIA ¹⁰			
		Tracteur et engins d'assistance	Zone de stockage des engins, des bus de transport de passagers

¹⁰Service de Sauvetage et de Lutte contre l'Incendie des Aéronefs (SSLIA)

			Nombre d'engins en rapport au fonctionnement de l'aérodrome
		Capacité de l'aérodrome	Écoulement du trafic prévu dans la journée Report du trafic sur un autre mode de transport possible ?

Tableau 18 : Découpage de l'infrastructure "aéroport" en systèmes ponctuels et composants. Source : STAC, 2013

10.5.2 - Référence bibliographique

STAC. *Étude de vulnérabilité des aérodromes vis-à-vis du changement climatique. Phase 2 : méthodologie d'évaluation de la vulnérabilité des infrastructures aéroportuaires aux impacts du changement climatique.* 2013, 72p. Rapport d'étude.

10.5.3 - Bibliographie

STAC. *Étude de vulnérabilité des aérodromes vis-à-vis du changement climatique. Phase 1 : les impacts potentiels du changement climatique sur les infrastructures aéroportuaires.* 2012, 80p. Rapport d'étude.

10.6 - Méthodologie d'estimation des impacts économiques d'une perturbation dans les réseaux de transport de marchandises

10.6.1 - Conséquences d'une perturbation du réseau de transport de marchandises

Les chaînes logistiques globales forment un système multi-niveau constitué d'une multitude d'entités et d'acteurs répartis sur une zone géographique très large et soumis à des perturbations naturelles ou causées par l'homme. Lorsqu'une telle perturbation apparaît, les pertes économiques peuvent être importantes et ce, non seulement pour les transporteurs et les chargeurs, mais aussi pour les organismes publics, les syndicats et commerçants locaux, les fournisseurs de stockage et de distribution, voire un nombre important de consommateurs et les organisations économiques à travers le pays. Au final, les impacts économiques peuvent se répercuter sur l'ensemble de la société.

Assurément, les perturbations ne se répercutent pas toutes de la même manière dans l'économie. Les impacts varient suivant les caractéristiques d'une perturbation donnée et des chaînes perturbées :

- une perturbation longue dans le temps ou étendue géographiquement est susceptible d'avoir plus impacts ;
- une perturbation dans une chaîne en flux tendu, sur des produits de haute valeur, dans une logistique en juste-à-temps aura des impacts économiques plus importants ;
- une perturbation étendue sur une zone et à tous les réseaux pourra avoir une multitude d'impacts économiques interconnectés et imbriqués les uns dans les autres ;
- à l'inverse, une perturbation sur un seul mode pourra engendrer un report modal, sans pour autant avoir des conséquences notables sur les flux macroscopiques.

Les impacts dépendent d'ailleurs aussi du système perturbé et de sa réponse. La résilience du système, ou sa capacité à s'adapter afin de limiter les conséquences de la perturbation, constitue un paramètre majeur dans la détermination de cette réponse. La résilience peut se traduire par la capacité du réseau à remettre en marche les installations et services nécessaires au transport des marchandises ou par l'existence d'une certaine redondance et / ou flexibilité dans une entreprise lui permettant de répondre à la perturbation sans trop de dommages.

Dans le cas d'une perturbation interrompant un mode spécifique, la résilience du système correspondra à la possibilité de rediriger les trafics vers les autres modes sans surcoût. Cette résilience tiendra alors compte de la disponibilité des capacités de l'infrastructure et du service ainsi que du contexte institutionnel permettant ou non de transporter une telle demande de manière inattendue. Toutefois, la capacité intrinsèque des autres modes ne suffit pas à déterminer s'il est possible d'orienter économiquement les produits vers ces modes : la valeur et la nature de la marchandise elle-même intervient. En effet, dans des chaînes logistiques contraintes, où le mode de transport est choisi pour répondre aux besoins spécifiquement liés à une marchandise, le transfert vers un mode moins adapté se fera avec un surcoût. Il est donc important de connaître et distinguer, non seulement les types de perturbation, mais aussi les « systèmes » perturbés, et notamment les marchandises affectées.

10.6.2 - Estimation des impacts économiques

Parmi les impacts économiques provoqués par une perturbation des chaînes logistiques, les plus immédiats sont les changements dans les coûts de transport et les coûts de stocks, qui se retrouvent même pour une petite perturbation. Une perturbation plus importante pourra affecter les activités productives, avec des impacts négatifs possibles sur la productivité et la production économique, affectant par là les résultats macro-économiques (PIB par exemple). Trois critères permettent de caractériser rapidement une perturbation et déterminer si elle est plus ou moins importante :

- sa temporalité : dure-t-elle plus ou moins longtemps ?
- Sa géographie : couvre-t-elle une zone géographique étendue, un ou plusieurs axes ?
- Le nombre de maillons touchés dans la chaîne logistique.

Ces caractéristiques de la perturbation, ajoutées aux caractéristiques des marchandises ou chaînes logistiques impactées, permettent d'obtenir une estimation des impacts économiques. Cependant, l'évaluation n'est pas intrinsèque et se doit de prendre en compte d'autres critères :

- la nature des méthodes et modèles utilisés : les modèles économiques utilisés pour évaluer les impacts d'une perturbation vont d'un simple cadre logique à des simulations économiques dynamiques compliquées ; les hypothèses utilisées peuvent modifier l'ordre de grandeur des résultats, il faut donc veiller à bien les connaître et les prendre en compte ;
- les questions posées : quel est le point de vue adopté ? Les impacts sont à déterminer pour quel acteur ou échelle ? Une perturbation peut très bien avoir un impact nul au niveau national (les flux circulent toujours) mais négatif ou positif au niveau local (l'itinéraire ou le mode a changé). De même, un transfert sur un autre mode peut constituer une opération blanche pour les chargeurs, avoir des conséquences positives pour l'emploi dans le mode choisi et des conséquences négatives sur le niveau de service de l'infrastructure – et donc du service rendu aux usagers.

10.6.3 - Méthodologies d'évaluation des impacts économiques d'une perturbation

Deux méthodes sont proposées afin d'estimer les impacts d'une perturbation des réseaux de transport de marchandises. La première est une méthode de haut-niveau se voulant une ébauche utile d'outil d'analyse. Elle est basée sur le concept décrit plus haut que l'impact économique d'une perturbation dépend avant tout des caractéristiques des marchandises, l'étendue et la nature de la perturbation, et des coûts associés aux différents éléments de la structure de coût (coûts de transport / logistique, coûts de stock, pertes de productivité...). Cette méthode permet de fournir une estimation des coûts économiques probables associés à n'importe quel type de perturbation. La figure 13 schématise le concept boîte à outil de cette méthode.

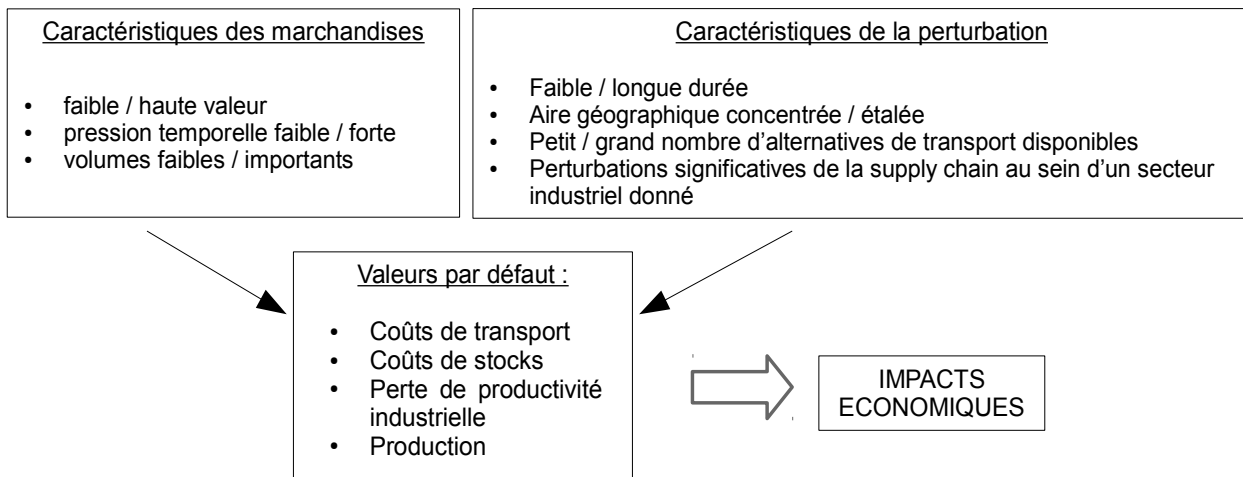


Figure 13 : Concept de base de la méthodologie « haut-niveau »

La deuxième méthodologie repose sur un niveau de détail et d'analyse des dynamiques de la chaîne logistique bien plus élaboré. Il s'agit d'un processus séquentiel en 5 étapes (figure 14), développé comme un cadre global et pratique pour évaluer un large éventail de perturbations du réseau de fret et leurs possibles impacts économiques. La mise en œuvre de cette méthodologie n'est cependant pas totalement finalisée : des recherches ultérieures devraient être menées sur différents éléments de l'approche analytique, notamment la réponse de la chaîne logistique face aux forces extérieures.

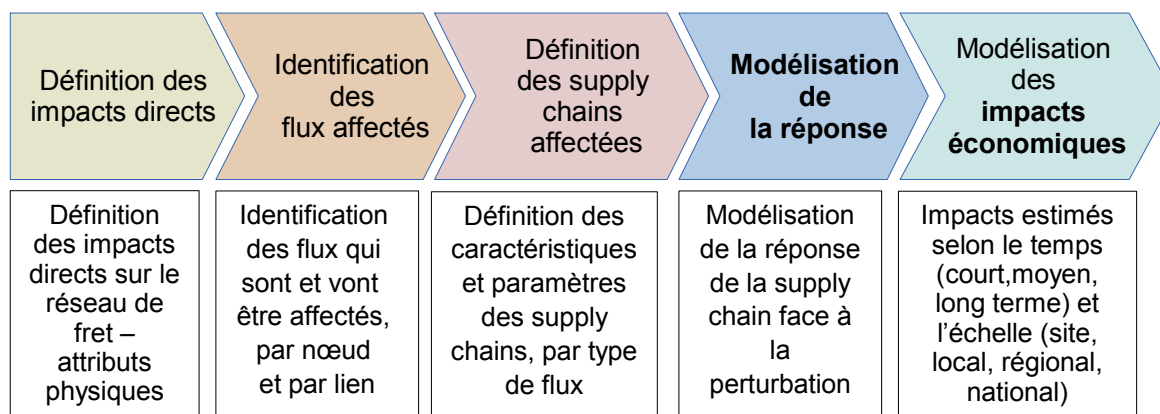


Figure 14 : Schématisation de l'outil d'analyse / décision en 5 étapes

L'une comme l'autre de ces méthodes souligne des enjeux majeurs concernant l'acquisition des données. Des efforts sont nécessaires afin de permettre l'estimation d'un jeu de paramètres significatifs qui conviendraient au mieux à un type particulier de perturbation. Dans la mesure du possible, les données locales devraient être utilisées afin de développer des estimations de coûts de perturbation.

10.6.4 - Référence bibliographique

Transport Research Board. *Methodologies to Estimate the Economic Impacts of Disruptions to the Goods Movement System*. Sous la direction de : Jenks C. W. et al. Washington DC (États-Unis d'Amérique) : 2012, 96p. ISSN : 0077-5614. ISBN : 978-0-309-25856-2.

10.7 - Liste bibliographique des études de cas

CEREMA. *Plan National Adaptation au Changement climatique – Évaluation des enjeux trafic via l'utilisation d'un modèle de déplacement*. Rapport d'étude. 2014, 32p. ISRN : CEREMA-DtecITM-2014-008-1. Disponible à l'adresse : <http://www.infra-transport-materiaux.cerema.fr/IMG/pdf/1405w-rapport_PNACC.pdf>

ONERC. *Évaluation du coût des impacts du changement climatique et de l'adaptation en France - Rapport de la seconde phase – Partie III – Rapports des groupes sectoriels* [en ligne]. 2009, 231p. Disponible à l'adresse : <http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/partie_3_rapports_des_groupes_sectoriels.pdf>

STAC. *Étude de vulnérabilité des aéroports vis-à-vis du changement climatique. Phase 2 : méthodologie d'évaluation de la vulnérabilité des infrastructures aéroportuaires aux impacts du changement climatique*. 2013, 72p. Rapport d'étude.

Transport Research Board. *Methodologies to Estimate the Economic Impacts of Disruptions to the Goods Movement System*. Sous la direction de : Jenks C. W. et al. Washington DC (États-Unis d'Amérique) : 2012, 96p. ISSN : 0077-5614. ISBN : 978-0-309-25856-2.

VDOT- Virginia Department of Transportation. *Assessing Vulnerability and Risk of Climate Change Effects on Transportation Infrastructure. Hampton Roads Virginia Pilot* [en ligne]. Sans date, 36p. Disponible à l'adresse : <http://www.virginia.edu/crmes/fhwa_climate/files/finalReport.pdf>

WSDOT - Washington State Department of Transportation. *Climate Impacts Vulnerability Assessment – Report* [en ligne]. 2011, 70p. Disponible à l'adresse : <<http://www.wsdot.wa.gov/NR/rdonlyres/B290651B-24FD-40EC-BEC3-EE5097ED0618/0/WSDOTClimateImpactsVulnerabilityAssessmentforFHWAFinal.pdf>>

Plan National d'Adaptation au Changement Climatique, volet infrastructures et systèmes de transport | Action 3

Analyse des risques liés aux événements climatiques extrêmes sur les infrastructures, systèmes et services de transport | Recueil de concepts

Ce recueil méthodologique propose, sur la base d'études bibliographiques, une méthodologie d'analyse de risque des infrastructures de transport face aux aléas du changement climatique. Celle-ci nécessite :

- de définir et d'analyser les aléas pouvant impacter les infrastructures. Les aléas retenus comme potentiellement impactant sont ensuite notés sur la base de leurs caractéristiques ;
- de décomposer les réseaux de transport étudiés en plus petites entités : systèmes (tunnel, pont, etc.) et composants (câble, etc.). L'étude des facteurs de vulnérabilité physique des réseaux, systèmes et composants permet alors de leur affecter une note de vulnérabilité ;
- de définir puis noter la criticité fonctionnelle du réseau étudié, qui est obtenue en croisant les enjeux du réseau avec ses caractéristiques.

Le croisement des notes d'aléas, de vulnérabilité physique et de criticité fonctionnelle permet de définir pour chaque système ou composant, un niveau de risque. Une telle analyse découle d'un processus itératif : le nombre d'itération dépend de la finesse attendue des résultats et donc, des objectifs de l'analyse.

À l'issue de l'analyse, diverses stratégies et mesures de traitement du risque peuvent être mises en œuvre.