



HAL
open science

Résilience des systèmes de transport guidé en milieu urbain : approche quantitative des perturbations et stratégies de gestion

Michaël Gonzva

► **To cite this version:**

Michaël Gonzva. Résilience des systèmes de transport guidé en milieu urbain : approche quantitative des perturbations et stratégies de gestion. Architecture, aménagement de l'espace. Université Paris-Est, 2017. Français. NNT : 2017PESC1088 . tel-01619140

HAL Id: tel-01619140

<https://theses.hal.science/tel-01619140v1>

Submitted on 19 Oct 2017

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

École doctorale n° 528 : Ville, Transports et Territoires

Laboratoire d'Urbanisme (LAB'URBA) - EA 3482

Thèse de doctorat

pour obtenir le grade de docteur délivré par

l'Université Paris-Est

Spécialité "Génie urbain"

présentée et soutenue publiquement par

Michaël GONZVA

le 8 mars 2017

Résilience des systèmes de transport guidé en milieu urbain : approche quantitative des perturbations et stratégies de gestion

Directeur de thèse : **Youssef DIAB**

Co-encadrant de thèse : **Bruno BARROCA**

Encadrant en entreprise : **Pierre-Étienne GAUTIER**

Jury

M. Denys BREYSSE	Professeur	Rapporteur
M. Gabriel DUPUY	Professeur	Rapporteur
M. Pietro BERNARDARA	Docteur	Examineur
M. Andrew MCNAUGHTON	Professeur, FREng	Examineur
M^{me} Christine VOIRON-CANICIO	Professeure	Présidente
M. Youssef DIAB	Professeur	Directeur de thèse
M. Bruno BARROCA	Maître de conférences	Co-encadrant de thèse
M. Pierre-Étienne GAUTIER	Professeur	Encadrant en entreprise

Université Paris-Est Marne-la-Vallée

5 boulevard Descartes, Champs-sur-Marne, 77454 Marne-la-Vallée Cedex 2, France



Résumé

Lorsque surviennent des risques naturels, les dommages aux systèmes urbains représentent habituellement des conséquences économiques et sociales importantes. Parmi ces éléments, les systèmes de transport guidé restent aujourd'hui particulièrement vulnérables notamment face au risque inondation. Par ailleurs, le concept de résilience connaît d'importants développements dans le domaine de la gestion des risques naturels. La résilience peut se définir comme la capacité d'un système à absorber une perturbation et à récupérer ses fonctions à la suite de celle-ci.

L'objectif de la thèse est d'étudier la vulnérabilité et la résilience des systèmes de transport guidé face au risque inondation à partir d'une analyse des mécanismes de défaillance. Ces systèmes sont assimilables à des systèmes hautement compliqués avec de multiples interdépendances entre les éléments. Etudier ces interdépendances, dans le cas d'une inondation, permet une approche comparative des trois configurations traditionnelles d'implantation d'un système de transport guidé : en souterrain, en surface et en aérien.

Cette démarche qualitative est combinée à une modélisation probabiliste, basée sur l'utilisation des réseaux bayésiens, du système soumis à un risque inondation. La thèse présente la démarche construite qui rend possible : l'élaboration d'une approche globale c'est-à-dire de l'occurrence de l'aléa avec ses caractéristiques données d'intensité ; l'identification des dommages matériels directs ; l'identification des dommages matériels indirects c'est-à-dire ceux occasionnés par des effets domino ; la déduction des conséquences fonctionnelles c'est-à-dire les modes de fonctionnement dégradé du système relatif à son exploitation.

Mots-clés : Gestion des risques, Résilience, Système, Transport urbain

Abstract

The vulnerability of guided transport systems facing natural hazards is a burning issue for the urban risks management. Experience feedbacks on guided transport systems show they are particularly vulnerable to natural risks, especially flood risks. Besides, the resilience concept is used as a systemic approach for making an accurate analysis of the effect of these natural risks on rail guided transport systems.

The purpose of this thesis is to provide an analysis of guided transport systems' resilience in the face of flood risks through a study of the failure mechanisms to which the components of these systems are subjected. Indeed, the urban critical infrastructures such as transport systems are highly complicated systems in which the components are strongly interdependent. This interdependency may imply many failures caused by cascade effect within the system.

Moreover, the qualitative methodology is linked to a probabilistic framework. Indeed, from the probability of a natural hazard occurring with a given intensity through components failures due to cascade effect, the objective is to assess the probability of degraded modes of operation. This probabilistic framework allows to shift from a qualitative approach based on dependability methods to a quantitative approach based on Bayesian networks.

Key-words : Risks management, Resilience, System, Public transport



Table des matières

Remerciements	9
Introduction générale	13
I ENJEUX ET SPÉCIFICITÉS DE LA RÉSILIENCE DES SYSTÈMES DE TRANSPORT GUIDÉ	21
Chapitre 1 : Appréhender la résilience des systèmes de transport guidé aériens, de surface et souterrains comme modèle de système technico-fonctionnel urbain	23
1.1 Une réponse scientifique à la gestion des risques : de la notion au concept-outil de résilience	25
1.2 Spécificités et confrontation des modèles dominants de résilience	38
1.3 Conclusion du chapitre 1	65
Chapitre 2 : Spécificités de l'objet d'étude et de la démarche méthodologique entreprise	67
2.1 Les systèmes urbains : un constat d'interdépendances à plusieurs échelles spatiales ...	69
2.2 Des mécanismes de vulnérabilité complexes et difficiles à appréhender : les effets domino comme source des processus d'endommagement	77
2.3 Élaboration d'une démarche méthodologique multi-aléas comme réponse à un besoin scientifique et opérationnel	86
2.4 Construction d'un cas d'application pour la recherche entreprise	95
2.5 Conclusion du chapitre 2	100
II ANALYSER LA RÉSILIENCE DES SYSTÈMES DE TRANSPORT GUIDÉ PAR UNE DÉMARCHE MÉTHODOLOGIQUE SYSTÉMIQUE	101
Chapitre 3 : Modélisation des interdépendances entre les éléments d'un système de transport guidé	103
3.1 Formulation des besoins scientifiques et opérationnels du modèle et critères de choix .	105
3.2 Elaboration d'un modèle d'interdépendances entre les éléments d'un système de transport guidé souterrain, de surface et aérien	118
3.3 Principes d'implémentation d'un modèle informatique pour la production des interdépendances	129
3.4 Conclusion du chapitre 3	140
Chapitre 4 : Analyse et exploitation des résultats du modèle d'interdépendances	143
4.1 Approfondissement et visualisation des résultats obtenus	145
4.2 Profil comportemental des éléments du système en situation de crise	148

4.3	Validation et discussion sur les résultats obtenus	157
4.4	Conclusion du chapitre 4	166
Chapitre 5 : D'une approche qualitative vers une approche semi-quantitative		169
5.1	Evaluation des résultats par une approche « coûts-délais » de remise en état	171
5.2	Construction d'un modèle d'évaluation coûts-délais	175
5.3	Conclusion du chapitre 5	206
III METTRE EN ŒUVRE LA RÉILIENCE DES SYSTÈMES DE TRANSPORT GUIDÉ PAR UNE DÉMARCHE OPÉRATIONNELLE		209
Chapitre 6 : Construction d'un modèle quantitatif à l'aide d'une méthode probabiliste		211
6.1	Formulation des besoins scientifiques et pratiques du modèle quantitatif	213
6.2	Choix méthodologique et construction du modèle quantitatif	223
6.3	Utilisation du modèle quantitatif	233
6.4	Limites et perspectives d'amélioration du modèle quantitatif	238
6.5	Conclusion du chapitre 6	241
Chapitre 7 : Des stratégies de fonctionnement en mode dégradé pour une amélioration de la résilience des systèmes de transport guidé		243
7.1	Caractérisation de la notion de fonctionnement en mode dégradé	246
7.2	Le fonctionnement en mode dégradé, un éventail pluriel de mesures pour la continuité d'activité	259
7.3	L'inscription territoriale et temporelle des stratégies de fonctionnement en mode dégradé	271
7.4	Conclusion du chapitre 7	279
Chapitre 8 : Perspectives de recherche		281
8.1	Vers une caractéristique spatiale au sein de la démarche méthodologique	283
8.2	Vers une caractéristique temporelle au sein de la démarche méthodologique	300
8.3	Portée de la recherche entreprise dans une optique multirisque et multi-système	306
8.4	Conclusion du chapitre 8	316
Conclusion générale		319
Liste des figures		325
Liste des tableaux		333
Bibliographie		337
IV Annexes		369
Annexe A : Genèse de la thèse : l'exemple du risque de vents traversiers		371
A.1	Contexte de la sensibilité des LGV au risque de vents traversiers	371
A.2	Analyse de la vulnérabilité des LGV face au risque de vents traversiers	372

A.3	Stratégies d'amélioration de la résilience de la LGV Méditerranée face au risque de vents traversiers	374
Annexe B : Application des méthodes de Sûreté de Fonctionnement dans la recherche		377
B.1	Blocs-Diagrammes Fonctionnels	377
B.2	Tableaux d'AMDE	380
Annexe C : Analyses statistiques réalisées sur les scénarios de défaillances		415
C.1	Analyses statistiques portant sur la longueur moyenne des scénarios de défaillances ...	415
C.2	Analyses statistiques portant sur l'ordre d'apparition des composants au sein des scénarios de défaillances	417
C.3	Analyses statistiques portant sur le positionnement « intermédiaire » des composants au sein des scénarios de défaillances	424
Annexe D : Coûts et délais de remise en état d'un système de transport guidé touché par une inondation		429
D.1	Coûts individuels de remise en état	429
D.2	Délais individuels de remise en état	433
D.3	Distribution du coût total en fonction de la longueur des scénarios de défaillances	437
D.4	Distribution du délai total en fonction de la longueur des scénarios de défaillances	441
Annexe E : Modèle quantitatif basé sur les réseaux bayésiens pour caractériser les modes dégradés d'exploitation d'un système de transport guidé touché par une inondation		449
E.1	Réseau bayésien d'un système de transport guidé aérien	449
E.2	Réseau bayésien d'un système de transport guidé en surface	453
E.3	Réseau bayésien d'un système de transport guidé souterrain	457



Remerciements

Après trois années de travail sur un même sujet, toujours le même sujet et encore ce même sujet, on ne peut ressortir tout à fait indemne d'une telle aventure. Car une thèse est avant tout une drôle d'aventure durant laquelle j'ai côtoyé beaucoup de personnes qui m'ont apporté sous des formes variées et à des degrés divers tout le nécessaire pour arriver au bout.

Parmi ces personnes, certaines ont eu un apport scientifique important. Tout d'abord, je tiens à exprimer ma profonde gratitude à **Bruno Barroca**, mon encadrant de thèse. Merci infiniment Bruno d'avoir été présent dès les premiers moments où je t'ai contacté, de façon incessante il faut le souligner, pour te demander ton aide dans le montage d'une thèse. Merci d'avoir été à l'origine de cette thèse car c'est grâce à toi que tout a pu commencer. Ensuite, je remercie très sincèrement **Youssef Diab**, mon directeur de thèse qui n'a pas hésité à rejoindre ce projet lorsque je l'ai contacté afin de diriger ma thèse. Merci Youssef pour ta confiance immédiate, pour nos riches discussions dans ton bureau (ou dans des cafés) durant les jours ouvrés (ou les jours fériés). Egalement, de grands remerciements à **Pierre-Etienne Gautier**, mon encadrant de thèse chez SYSTRA, pour sa grande confiance dès nos premières rencontres puis tout au long de ces trois années. Puis, merci beaucoup à **Fabien Létourneaux** pour avoir rejoint l'encadrement de cette thèse en cours de route. Merci pour ta forte implication, tes conseils et ton intérêt pour mon travail.

A ce premier cercle s'ajoutent d'autres personnes qui m'ont apporté beaucoup sur le plan scientifique : **Pierre-André Zitt** pour ton aide mathématique et ton regard intéressant sur mon sujet de thèse, **Sandrine Chrun** pour tes conseils en matière de sûreté de fonctionnement, **Pierre Mansoz** pour ton expertise concernant la maintenance ferroviaire, **Serge Lhomme** pour nos discussions sur mon travail et tes nombreuses idées sur leurs perspectives, **Marc Vuillet** pour nos échanges d'ordre technique et probabiliste, **Damien Serre** pour nos discussions et pour nos collaborations futures je l'espère.

Merci également aux membres de mon jury qui ont accepté de rapporter et d'examiner cette thèse : Madame **Christine Voiron-Canicio**, Monsieur **Gabriel Dupuy**, Monsieur **Denys Breysse**, Monsieur **Pietro Bernardara**, Monsieur **Andrew McNaughton**, Monsieur **Youssef Diab**, Monsieur **Bruno Barroca**, Monsieur **Pierre-Etienne Gautier**.

D'autres personnes ont eu un apport plus... personnel à mes travaux de thèse. Ils m'ont permis de prendre du recul sur ce projet et d'égayer le quotidien de ces trois années.

Pour cela, je remercie toute la Direction Innovation de SYSTRA depuis mes débuts : **Emilie** (pour m'avoir accueilli dans l'équipe lors de mes premiers jours), **Eric, Cédric** (c'est pour quand le prochain *laser game* à Vernon ?), **Marjorie** (merci pour ton aide dans la conception de schémas dont tu devrais en reconnaître certains), **David** (merci tout particulièrement pour notre collaboration solidement ancrée dans l'amitié et l'humour, globalement ; tant que j'y pense, je compte bien te mettre une sacrée

dérouillée au baby-foot la prochaine fois), **Emmanuelle** (merci sincèrement d'avoir sans cesse pensé à notre bien-être à tous !), **Eva, Pierre, Thibaut, Maylis, Anaïs, Jérôme, Alexandra, Nicolas, Antonin, Marie**. Un merci plus particulier aux autres doctorants de SYSTRA, mes frères et sœurs d'armes, dont la situation actuelle ne m'est pas tout à fait inconnue : **Gabrielle** (merci pour nos discussions autour de nos travaux de thèse, merci pour ton excellente compagnie durant tous ces trajets pour l'université, merci d'avoir été pendant un temps cette collègue de bureau studieuse dont tout le monde rêve, merci d'avoir toujours accepté d'être ma goûteuse personnelle de ces drôles de plats que l'on s'obstine à nous servir durant les déjeuners de conférences ; toi seule sais désormais combien je déteste ne pas savoir ce que je mange !), **Raphaël** (merci pour ta bonne humeur et ta gentillesse que toutes tes équations n'ont jamais su ébranler, ce que je trouve prodigieux), **Livia** (merci pour nos discussions, à chaque fois inédites, sur le bouddhisme, la méthode Suzuki et les substituts du gluten à travers le monde). C'est long trois ans, surtout vers la fin. Accrochez-vous, vous ne pouvez qu'y gagner.

Pour cela également, je remercie tout le département « génie urbain » de l'université Paris-Est Marne-la-Vallée. Merci **Aminata, Raymonde** pour votre gentillesse et votre précieuse aide dans toutes les situations, merci **Estelle, Serge, Katia, Joël, Denis, Gilles, Abboud**. Là aussi, un merci particulier aux doctorants (et jeunes docteurs) du laboratoire : merci **Maxime** pour nos échanges et nos travaux communs qui ont été un véritable plaisir pour moi, merci **Mireia** pour nos collaborations également, merci **Charlie** pour ces trois années à partager pendant un temps le même bureau (où as-tu encore rangé la clef d'ailleurs ?) dans une atmosphère (presque tout le temps) studieuse et merci pour ce cynisme si drôle qui te caractérise tant, merci **Marina** pour tes précieux conseils et ton écoute sans trêve ni repos pendant ces années, merci **Maryline** pour ta grande gentillesse et tes bons conseils. Merci à vous pour ces agréables moments à l'université, et surtout, en dehors de l'université.

En dehors de SYSTRA et de l'université, j'ai une pensée profonde pour mes proches qui n'ont jamais tout à fait compris pourquoi j'ai tant voulu m'engager dans une thèse, qui n'ont jamais vraiment compris non plus ce que j'ai bien pu faire pendant autant d'années et qui surtout ce sont si souvent demandés pourquoi toute cette histoire a pris autant de temps avant de se terminer. Ceci étant dit, quelques remerciements particuliers s'imposent : un grand merci à mes **parents** et à ma **sœur**. Merci **Clémence** pour ton aide et ton inestimable soutien durant les débuts de ma thèse. Merci **Anne-Sophie, Lorena, Stéphanie, Elodie, Romeyla, Marine, Sarah, Nathalie, Marion, Justin, Cédric, Vincent** et **Romain** pour votre écoute pendant les hauts et les bas qui ont rythmé ces trois années ; plus généralement, merci pour votre amitié sans faille depuis ce sacré paquet d'années qui sont pour moi une belle promesse d'autres années radieuses à vos côtés. Merci **Louise** pour ta bienveillance, pour cette grande force qui te caractérise et pour ta capacité à me faire comprendre qu'il y a une vie après la thèse.

Enfin, un merci autrement particulier aux personnes qui ne sont plus là pour l'entendre et qui ont joué un rôle important dans ma vie et en particulier dans ma capacité à être arrivé jusqu'au bout de cette thèse. A mon **grand-père**, à ma **tante** et à **Nathalie Bintner**, je vous dédie ce travail.



L'auteur ainsi que ses encadrants s'associent pour remercier le projet national « Ville 10D — Ville d'idées »¹ pour sa participation au financement de ce travail doctoral.

1. <http://www.ville10d.fr/>



Introduction générale

Contexte de la recherche

Chaque année, les catastrophes naturelles faisant l'actualité provoquent des dommages économiques toujours plus importants auxquels s'ajoutent des impacts sociaux et environnementaux conséquents. En France, un habitant sur quatre et un emploi sur trois sont potentiellement exposés au risque d'inondation (MEDDE, 2012) révélant l'ampleur potentielle d'impacts sociaux liés à ce risque naturel. Parmi les impacts majeurs, les dommages aux réseaux urbains regroupent habituellement les conséquences économiques les plus importantes. Au sein de ces réseaux, les systèmes de transport public guidé constituent une composante des villes particulièrement exposée et vulnérable. Ces systèmes sont, qui plus est, d'autant plus importants au fonctionnement des territoires qu'ils sont considérés comme essentiels pour un retour à un fonctionnement acceptable après une catastrophe (LHOMME, 2012). En France, un système de transport guidé se définit comme **un système de transport public dont les véhicules suivent une trajectoire déterminée pour tout ou partie de leur trajet**². Cette définition française est valable à l'international où les systèmes de transport guidé sont définis de la même façon. Sont donc inclus les métros, les tramways sur fer ou sur pneus, les lignes ferroviaires interurbaines et les lignes ferroviaires à grande vitesse fournissant une offre de transport régulière³. Les systèmes de transport guidé urbains regroupent donc (CERTU & CETE, 2007) : les métros, en site propre intégral et généralement souterrains, en conduite manuelle, automatique ou automatique légère ; les tramways, caractérisés par des véhicules ferroviaires (roulement fer sur fer) qui circulent majoritairement sur la voirie urbaine et exploités en conduite à vue ; les systèmes guidés sur pneus, caractérisés par un roulement sur pneus et un guidage par rail central, par caméra ou magnétique.

Des études statistiques démontrent les impacts négatifs de conditions météorologiques sur les systèmes de transport public guidé. En 2003, le taux d'incidents aux Pays-Bas attribués à des conditions météorologiques défavorables a été évalué à environ 5 % sur 8 279 incidents, soit plus de 400 évènements ce qui est une valeur loin d'être négligeable (DUINMEIJER et BOUWKNEGT, 2004). (ROSSETTI, 2002) montre quant à lui qu'aux Etats-Unis entre 1993 et 2002, les conditions météorologiques sont la cause première de 66 incidents et accidents sur 5 700. Si ce taux semble de prime abord moindre que dans le cas des Pays-Bas, (KOETSE et RIETVELD, 2009) révèlent que parmi les 5 700 incidents et accidents, 131 sont survenus lors d'intempéries neigeuses, 81 lors de conditions de brouillard et 411 durant des épisodes pluvieux, soit plus de 10 % d'incidents et accidents ayant potentiellement pour cause les conditions météorologiques. Sur le réseau ferré britannique, les mauvaises conditions météorologiques sont responsables de près de 20 % de l'ensemble des retards (THORNES et DAVIS, 2002). Il est important de mentionner, de plus, que même si toutes les régions du globe ne sont pas soumises

2. <http://www.strmtg.equipement.gouv.fr/en/urban-guided-transport-in-france-r25.html>

3. <http://www.strmtg.equipement.gouv.fr/les-transports-guides-urbains-r28.html>

à des conditions météorologiques extrêmes comme des pluies abondantes de longue durée, des tempêtes de neige ou des phénomènes cycloniques, leurs systèmes de transport guidé ne sont pas pour autant épargnés car leur bon fonctionnement peut aussi être affecté par des événements météorologiques même mineurs⁴ (DOBNEY *et al.*, 2009). Ce rapide tour d'horizon confirme la part importante de perturbations imputables aux aléas naturels, part d'ailleurs certainement sous-estimée car ce type d'incidents ne fait pas toujours l'objet d'informations remontantes⁵ (MÜHLHAUSEN *et al.*, 2010, p. 26).

Les coûts de maintenance, préventive comme corrective, associée aux aléas naturels qui affectent les systèmes de transport sont une preuve supplémentaire de leur fragilité d'une part, et de l'enjeu majeur que représente leur protection d'autre part. En France, les fortes inondations dans le bassin de la Somme en 2001 ont représenté, pour illustration, 2,3 millions d'euros de dommages et pertes opérationnelles pour les infrastructures ferroviaires (COCHRAN, 2009). Ce chiffre, exemple de coûts de reconstruction due à des inondations, est à mettre en perspective avec l'exposition des autres modes de transport. Il est, en effet, estimé en 2009 en France que 1 967 kilomètres de voies ferrées sont à « risque de submersion temporaire ou définitive dans l'hypothèse d'une hausse d'un mètre du niveau marin » contre 355 kilomètres d'autoroutes et 4 338 km de routes départementales (BARROUX, 2014).

Bien que les impacts climatiques sur les systèmes de transport soient un phénomène considéré comme connu pour les exploitants et les gestionnaires⁶ (EDDOWES *et al.*, 2003, p. 18), paradoxalement les études portant sur ce sujet sont assez rares⁷ (KOETSE et RIETVELD, 2009). Dans ce contexte de vulnérabilité avérée et internationalement reconnue des systèmes de transport guidé face à des aléas naturels, des projets internationaux sur ce sujet réunissant industriels et universitaires ont été initiés. Le projet WEATHER⁸ (2009-2012) pour *Weather Extremes : Assessment of Impacts on Transport Systems and Hazards for European Regions* a pour objectif principal l'analyse sous l'angle économique des conséquences des événements météorologiques extrêmes sur les systèmes de transport de tous modes, routiers, maritimes, aériens et ferrés. Cette analyse s'oriente essentiellement sur le phénomène de changement climatique, ses conséquences économiques sur le long terme et les stratégies possibles en matière de gestion de crise et d'adaptation de ces modes de transport. En lien direct, le projet EWENT⁹ (2009-2012) pour *Extreme Weather impacts on European Networks of Transport* dont l'objectif général est identique à WEATHER se base sur un cadre méthodologique unifié à partir de l'identification du phénomène météorologique extrême, suivi d'une analyse de son impact sur les systèmes de transport jusqu'à des mesures de réduction et de contrôle du risque. Le système de transport est étudié selon trois axes : l'infrastructure, et ses dommages matériels possibles ; l'exploitation, et ses impacts sur le trafic et la fiabilité du service ; les impacts indirects, c'est-à-dire les conséquences sur les parties dépendantes. Le système est également considéré par rapport à des événements ayant des effets sur le court terme, tels que des aléas courants et quotidiens, et sur le long terme, tels que des événements extrêmes nécessitant la plupart du temps des réflexions profondes en termes de conception. Succédant à EWENT et WEATHER, le projet européen MOWE-IT¹⁰ (2012-

4. "Although the rail network is a robust infrastructure [...] and weather conditions in the United Kingdom [...] are rarely as extreme as in other countries, smooth operations can still be affected by even minor weather-related influences."

5. "Only a few sources come up with statistical analyses on the amount of weather-induced accidents and incidents, and, as stated in each of these studies, the numbers underestimate the situation, because of the reporting practices."

6. "Weather and climate impacts are a known phenomenon on the railway and knowledge derived from past and current experience provides a basis for identification of impacts in the context of this study."

7. "Studies that investigate the effects of weather or climate change on rail transport and infrastructure are scarce."

8. <http://www.weather-project.eu>

9. <http://ewent.vtt.fi>

10. <http://www.mowe-it.eu>

2014) pour *Management Of Weather Events In Transport Systems* s'est explicitement orienté vers des stratégies d'amélioration de la résilience des différents modes de transport (routiers, aériens, maritimes) face à des événements météorologiques intenses en se basant notamment sur l'intermodalité. A partir de plusieurs cas d'études d'événements naturels ayant eu des dommages importants sur les réseaux de transport, le projet dresse un ensemble de recommandations à court terme, c'est-à-dire avant, pendant et après l'occurrence de l'aléa et des recommandations à long terme en matière de conception et d'exploitation des systèmes. Le projet RAIN¹¹ (2014-2017) pour *Risk Analysis of Infrastructure networks in response to extreme weather* couvre globalement les mêmes problématiques que les autres projets européens cités auparavant. En revanche, RAIN considère les interdépendances entre les systèmes étudiés au travers d'un cadre d'analyse opérationnelle de l'impact d'événements naturels majeurs sur les réseaux de transport, d'énergie et de télécommunication. Les impacts dus à des effets en cascade sont donc pris en compte dans ce projet. Dans cette même veine, d'autres projets européens : STREST¹² (2013-2016) pour *harmonized approach to STress tESTs for critical infrastructures against natural hazards* qui aborde également les impacts d'événements dits « faible probabilité-forte conséquence » à l'échelle de plusieurs infrastructures critiques interdépendantes. STREST traite l'impact des séismes, des inondations, des tsunamis et des événements géotechniques. Egalement, INFRARISK¹³ (2013-2016) pour *Novel Indicators for identifying critical INFRAstructure at RISK from natural hazards* traite la complexité issue des interdépendances entre réseaux critiques lorsqu'ils font face à des aléas naturels à partir d'une spatialisation des zones à risques. Ce travail de spatialisation est permis par une plateforme collaborative de partage de données entre praticiens et par l'usage d'outils SIG mettant en exergue les dysfonctionnements par effet cascade. Aussi, le projet INTACT¹⁴ (2014-2017) pour *Impact of Extreme Weather on Critical Infrastructures* est actuellement mené avec des réflexions et enjeux similaires. Il est intéressant de noter l'évolution des problématiques traitées par les projets européens. De projets centrés jusque très récemment sur l'impact de risques naturels sur des réseaux techniques et l'évaluation de leur vulnérabilité, les projets en cours traitent désormais la résilience de ces réseaux devenus « critiques » et intègrent le nouvel enjeu que représentent leurs interdépendances et les effets en cascade potentiels. Cette recherche s'inscrit donc aussi dans le cadre d'une recherche scientifique opérationnelle.

Quelques conclusions intéressantes ont été formulées et partagées par ces projets européens et donnent de précieux éléments de contexte :

- les systèmes de transport ferroviaire sont particulièrement vulnérables aux événements naturels, comparativement aux autres modes de transport terrestres et aériens. Cette particulière vulnérabilité est notamment due à des coûts de construction et de maintenance élevés et à une moindre flexibilité dans les procédures d'exploitation (DOLL et KLUG, 2012, projet WEATHER) ;
- les inondations représentent l'aléa naturel le plus dommageable pour les systèmes de transport ferroviaire. En termes de coûts liés aux infrastructures et à l'exploitation, elles ont représenté sur la période 1999-2010 à l'échelle européenne plus de 100 millions d'euros par an, comparativement aux tempêtes et aux épisodes neigeux dont les coûts moyens annuels se sont respectivement élevés à 0,07 million et 0,04 million d'euros (ENEI *et al.*, 2011, p. xiv ; projet WEATHER) ;
- des mesures simples telles qu'une préparation adéquate des équipes et une cohérence systémique dans les rôles portés par les gestionnaires et les exploitants peuvent suffire pour gérer des situations de crises importantes (DOLL et KLUG, 2012, projet WEATHER).

11. <http://rain-project.eu>

12. <http://www.strest-eu.org>

13. <http://www.infrarisk-fp7.eu>

14. <http://intact-project.eu>

Ces éléments de contexte mettent aussi et surtout en lumière le fait suivant : comparativement aux autres modes de transport tels que le routier et l'aérien, les systèmes de transport guidé sont largement dépendants d'infrastructures physiques. Une perturbation, même isolée, sur un réseau de transport guidé ferroviaire peut entraîner l'arrêt de l'exploitation sur une portion du réseau sans qu'il soit d'ailleurs possible de déterminer des itinéraires de substitution aux trains. Aussi évidentes puissent-elles paraître, ces affirmations concentrent pourtant l'essentiel des enjeux qui se posent pour les concepteurs, gestionnaires et exploitants de ces systèmes en matière de gestion des aléas naturels et des risques, dits naturels, engendrés.

Un dernier élément de contexte est celui des effets du changement climatique qui amplifient les incertitudes déjà importantes au sein de l'évaluation des risques et des processus de décision pour leur maîtrise et leur gestion dans le domaine des transports. L'incertitude relative à l'amplification attendue des phénomènes naturels rend très compliqué le choix de mesures d'adaptation à mettre en place. Pour autant, ces incertitudes ne doivent pas être un frein pour l'adoption de stratégies d'adaptation (COCHRAN, 2009) car si les incertitudes peuvent inhiber l'identification d'options pragmatiques d'adaptation, l'adaptation est l'une des meilleures options pour contourner ces incertitudes climatiques et anthropiques, en favorisant par exemple des actions « sans regrets » ou « réversibles » (MAGNAN, 2010). Au Royaume-Uni par exemple, 550 milliards de livres devront être dépensées dans les infrastructures d'ici 2050 pour les adapter au changement climatique ; notamment, un milliard de livres devra être consacré à la protection contre les inondations d'ici à 2035, une augmentation de plus de 80 % des dépenses actuelles dans ce domaine (JOURDAN *et al.*, 2013). L'adaptation n'est d'ailleurs plus optionnelle sur le réseau ferroviaire britannique car si les politiques de maintenance n'évoluent pas significativement avec ce contexte d'évolution climatique, il est notamment estimé que les coûts totaux des retards dus à des fortes températures estivales doubleront à l'horizon 2050 à 2080 par rapport aux valeurs actuelles (DOBNEY *et al.*, 2010). Le rôle amplificateur du changement climatique sur les risques naturels obligent donc à les réexaminer en fonction de cette nouvelle donne climatique (QUENAULT, 2013b).

Cette situation est d'autant plus préoccupante que « *le changement climatique n'est pas et ne sera assurément pas le seul vecteur de changements* » (MAGNAN, 2010). Dans le domaine des transports, l'urbanisation croissante de la planète engendre elle aussi une forte perspective d'intensification des enjeux de mobilité. La part de la population mondiale qui vit dans des zones urbaines est en pleine croissance, avec une proportion de 54 % en 2014 et qui devrait atteindre la valeur symbolique de 66 % en 2050 (UNITED NATIONS, 2014). Cette croissance démographique a nécessairement des conséquences importantes sur les besoins en déplacements urbains et interurbains des populations. Si le lien entre densité de population et dépendance à l'automobile est établi, la seconde étant une fonction croissante de la première (NEWMAN et KENWORTHY, 1999; MUÑIZ et GALINDO, 2005), il est également constaté que plus la zone étudiée est dense et plus les modes de transports alternatifs à la voiture deviennent compétitifs, principalement les transports en commun (LE FEON, 2014). Ainsi, freiner la mobilité ne peut être une option (COMMISSION EUROPÉENNE, 2011) quelle que soit la complexité des enjeux techniques, climatiques et de qualité de service fourni à atteindre.

Objectif de la recherche et démarche méthodologique entreprise

La recherche scientifique dans le domaine du génie urbain et plus particulièrement de la gestion des risques s'intéresse depuis une dizaine d'années au concept de résilience. Dans ce concept, le risque

est étudié à différentes échelles spatiales et temporelles (SERRE, 2011) d'une part, et selon une approche systémique d'autre part. La résilience est définie comme la capacité d'un système à absorber le changement et à persister au-delà d'une perturbation (BARROCA, 2006, p. 193 ; BARROCA *et al.*, 2013) ou, de façon très similaire, comme la capacité d'un système à absorber une perturbation et à récupérer ses fonctions à la suite de celle-ci (LHOMME, 2012, p. 77). Un volet essentiel apporté à la résilience urbaine est celui de la capacité d'une ville à fonctionner malgré la perturbation de certains de ses composants, c'est-à-dire à fonctionner en mode dégradé (LHOMME, 2012, p. 91). Cet aspect fondamental de fonctionnement en mode dégradé est également inclus dans la définition de la résilience prise dans cette recherche.

Cette recherche s'applique aux systèmes de transport public guidé urbains et interurbains faisant face à des risques naturels. L'ensemble de la démarche méthodologique entreprise dans cette recherche est appliqué au cas particulier du risque hydrologique (ou risque inondation), c'est-à-dire le risque provoqué par l'occurrence¹⁵ d'un aléa hydrologique d'intensité variable. L'intensité variable, relativement aux hauteurs d'eau ou encore à la durée du phénomène, permet de couvrir un large panel d'aléas, des épisodes pluvieux de temps de retour faible aux épisodes de temps de retour plus grand, des ruissellements pluvieux jusqu'aux inondations soudaines. L'intérêt est d'étudier les conséquences de ces risques sur les systèmes de transport guidé qui peuvent être qualifiés d'« intermédiaires » dans la mesure où ils affectent les circulations sans les interrompre. Ces risques intermédiaires, en particulier les épisodes pluvieux, s'opposent aux risques extrêmes tels que les crues torrentielles ayant pour effet de détruire entièrement des sections de lignes ou de réseaux.

Les conséquences du risque inondation sont étudiées sous deux angles. Le premier se focalise sur les effets qu'engendre ce risque du point de vue matériel : quels composants vont être directement touchés ? Quels composants vont être indirectement impactés ? Cette seconde interrogation s'intéresse à la complexité des conséquences physiques et amène alors à prendre en compte les effets domino au sein du système comme phénomène de propagation du risque. Elle interroge les interactions qui existent entre les éléments du système et leur degré de dépendance mutuelle. Si ces effets domino induits par un risque inondation à l'échelle urbaine entre plusieurs réseaux bénéficient de recherches théoriques et pratiques croissantes (LHOMME, 2012; TOUBIN, 2014; SERRE, 2011; PROVITOLLO, 2005; ROBERT et MORABITO, 2009), ils demeurent beaucoup moins traités à l'échelle d'un de ces réseaux. Or, l'imbrication des échelles urbaines suggère que la compréhension de ce phénomène de propagation du risque à l'échelle d'un système est une condition *sine qua non* à la compréhension de ce phénomène à une échelle supérieure, celle de système de systèmes. Cette idée forte se base sur l'hypothèse de travail raisonnable selon laquelle la ville peut être envisagée comme un système composé lui-même de systèmes indépendants. Cette hypothèse est symbolisée par la flèche numérotée 6 dans la Figure 1 qui extrait transitoirement le système étudié au sein du système ville.

Par voie de conséquence, les résultantes de ces effets domino au sein de la ville, qu'il devient courant de considérer aussi comme un système (ZEVENBERGEN *et al.*, 2010; BERRY, 1964; LHOMME *et al.*, 2010; WEGENER, 1994), sont davantage appréhendées par les acteurs et décideurs. Le caractère spatial et temporel que revêtent ces effets domino, leur dynamique de propagation, leur point d'origine et leurs conséquences finales bénéficient ainsi d'une analyse globale et systémique. Le second angle d'analyse des conséquences du risque inondation sur les systèmes de transport guidé découle du

15. Le terme d'*occurrence* est utilisé dans cette thèse dans sa définition classique d'« événement qui se présente fortuitement » (Dictionnaire Littré, 2016). Il est donc à rapprocher, dans la signification prise ici, du terme de « survenance ». L'*occurrence d'un aléa* ne recouvre donc pas de caractéristiques d'intensité ou encore de localisation de l'aléa ; il indique simplement que l'aléa s'est réalisé.

premier et vise à donner des réponses à l'interrogation suivante : quelles sont les conséquences fonctionnelles, c'est-à-dire sur l'exploitation, de ces défaillances matérielles directes et par effet domino ?

Ainsi, la démarche globale développée dans cette recherche se base sur une analyse matérielle de l'impact du risque inondation pour en déterminer ensuite les effets sur l'exploitation (Figure 1)¹⁶. Ces analyses matérielles et fonctionnelles bénéficient, de plus, dans cette recherche d'une caractérisation en matière de coût et de délai de remise en état des composants du système touchés par une inondation. En outre, l'hypothèse de travail majeure qui est faite dans cette recherche consiste à considérer les systèmes de transport guidé comme un sous-système du système-ville indépendant des autres sous-systèmes. Seules les interactions au sein du système de transport guidé sont étudiées dans un contexte de risque inondation.

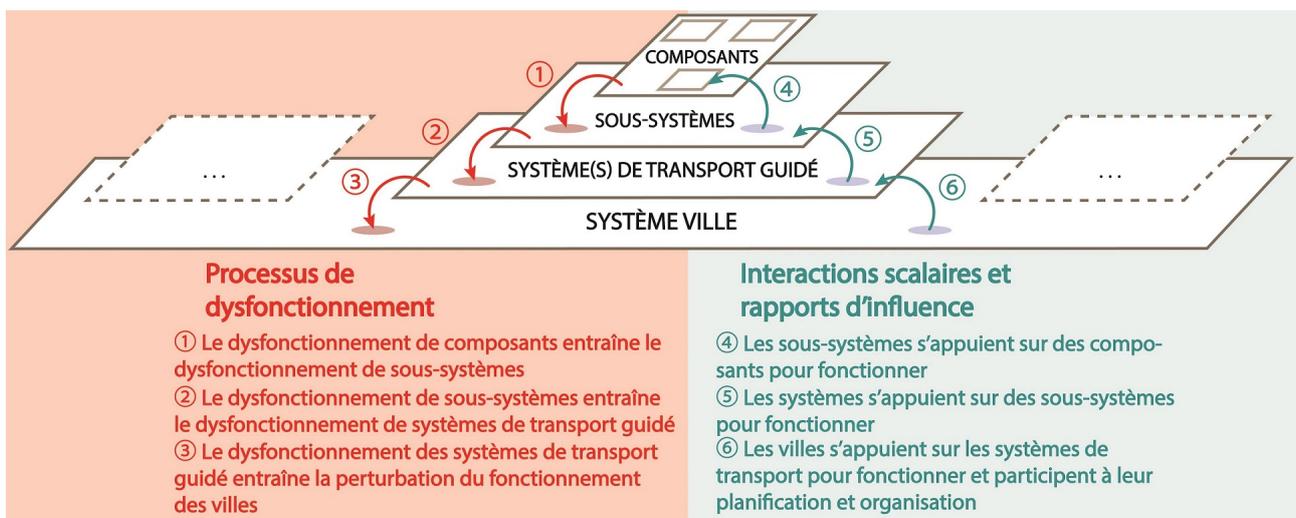


FIGURE 1 – Rapports d'influence et de dysfonctionnement entre systèmes et ville¹⁷ (source : auteur)

Structure du mémoire

La première partie de cette recherche consiste à présenter, d'une part, la démarche conceptuelle initiée dans cette thèse pour construire, d'autre part, l'approche méthodologique qui en découle et l'intérêt de son application en vue d'améliorer la résilience des systèmes de transport guidé aériens, de surface et souterrains face à des aléas naturels. Le [Chapitre 1](#) traite des liens conceptuels qui servent de base théorique et contextuelle à cette recherche : le croisement entre génie urbain et résilience. Ce rapprochement est légitime par la situation similaire qui entoure ces deux concepts : une approche systémique, une terminologie fortement polysémique, des limites assez floues et une logique orientée vers l'action. Si ce rapprochement est pertinent, c'est grâce aux apports mutuels entre les deux concepts, en particulier le développement important de modèles conceptuels de résilience appliquée au génie urbain. Certains de ces modèles dominants de résilience donnent le cadre scientifique dans lequel s'insère cette thèse. Le [Chapitre 2](#) justifie l'approche système portée dans la recherche

16. La vision du fonctionnement d'une ville, vue comme un système, est ici représentée de façon simplifiée sur plusieurs aspects. Les interactions nécessaires au bon fonctionnement urbain ne se font pas uniquement entre échelles mais au sein des échelles également ; les dysfonctionnements n'impliquent pas uniquement des perturbations d'une échelle vers une autre échelle mais également au sein d'une même échelle. Dans cette vision simplifiée du fonctionnement et du dysfonctionnement du système-ville sont en fait seulement mises en avant les interactions étudiées dans cette recherche : les rapports qui existent **entre** les échelles, lorsque le système fonctionne en situation normale et lorsqu'il dysfonctionne durant une crise telle qu'une inondation.

en considérant l'objet d'étude comme un système technico-fonctionnel avec un haut degré de complication et ayant des caractéristiques données. Parmi ces caractéristiques, la dépendance entre les éléments du système en est une majeure. Cette interdépendance, dans le cas d'un risque naturel, est source de mécanismes complexes de défaillance en chaîne du système, communément nommés « effets domino ». L'analyse de ces mécanismes de défaillance en chaîne est progressivement devenue un élément majeur de la maîtrise et de la gestion des risques naturels. Cette analyse doit être permise par une démarche méthodologique systémique, applicable à une multiplicité de risques et dont les résultats sont orientés vers des stratégies opérationnelles.

La deuxième partie de ce mémoire expose les fondements théoriques et méthodologiques d'une telle démarche et en présente les résultats d'application sur des systèmes de transport guidé aérien, de surface et souterrain soumis à un risque hydrologique. Le [Chapitre 3](#) formule tout d'abord les besoins scientifiques et opérationnels auxquels doit répondre cette démarche : une caractérisation de la vulnérabilité, issue des interdépendances, des systèmes de transport soumis à des risques naturels. Il expose également les méthodes mises en pratique dans cette recherche pour ensuite, dans le [Chapitre 4](#), fournir une analyse et des exploitations possibles des résultats qualitatifs obtenus. Ces résultats qualitatifs ont, en effet, un potentiel d'usage en matière de spécification du comportement d'éléments du système lorsqu'ils sont soumis au risque d'inondation. Le [Chapitre 5](#) formalise ces usages opérationnels qui résultent de la démarche méthodologique construite : l'élaboration de stratégies de conception, d'exploitation et de maintenance à partir notamment d'une approche coûts-délais de remise en état d'un système suite à une inondation.

La troisième partie de ce mémoire développe la construction d'une démarche quantitative de résilience des systèmes de transport guidé face à un risque hydrologique en mettant en évidence son apport majeur : la mise en place possible d'un fonctionnement du système en mode dégradé d'exploitation à tous les temps du risque. Le [Chapitre 6](#) développe l'élaboration de cette méthodologie quantitative basée sur l'utilisation de réseaux bayésiens, construits à partir des résultats de la méthodologie qualitative précédente. Le [Chapitre 7](#) fournit ensuite la portée opérationnelle de ce travail quantitatif : le fonctionnement en mode dégradé d'exploitation, vue comme un éventail pluriel de mesures permettant l'opérationnalisation du concept de résilience. Le fonctionnement en mode dégradé y est défini à la fois dans ses dimensions qualitatives et quantitatives, et dans ses apports pour une gestion territorialisée et temporalisée des risques naturels. Ce mode particulier d'exploitation du système de transport guidé est également mis en perspective dans sa transposition possible à d'autres systèmes urbains et dans la nécessaire mise en cohérence globale d'une telle approche à l'échelle de la ville. Le [Chapitre 8](#) clôt cette partie et ce mémoire en identifiant des perspectives à l'ensemble de la recherche entreprise dans cette thèse. Parmi ces perspectives, celle de l'utilisation des Systèmes d'Information Géographique (SIG) pour une implémentation de la démarche méthodologique globale développée. Ce travail conduit à une spatialisation du travail réalisé en matière d'analyse, de maîtrise et de gestion du risque hydrologique. Dans une optique similaire, l'intégration de la dimension temporelle dans cette démarche méthodologique est étudiée. Cette perspective de recherche s'intéresse aux liens entre la temporalité du risque et celle des effets domino produits par ce risque. Elle vise alors à s'interroger sur l'aspect temporel du processus de propagation des défaillances par effet domino : comment le quantifier, comment le visualiser... Enfin, la prise en compte tangible mais encore confuse du changement climatique dans le cas de la conception, de l'exploitation et de la maintenance des systèmes de transport aériens, de surface et souterrains est également abordée à la fin de ce mémoire.

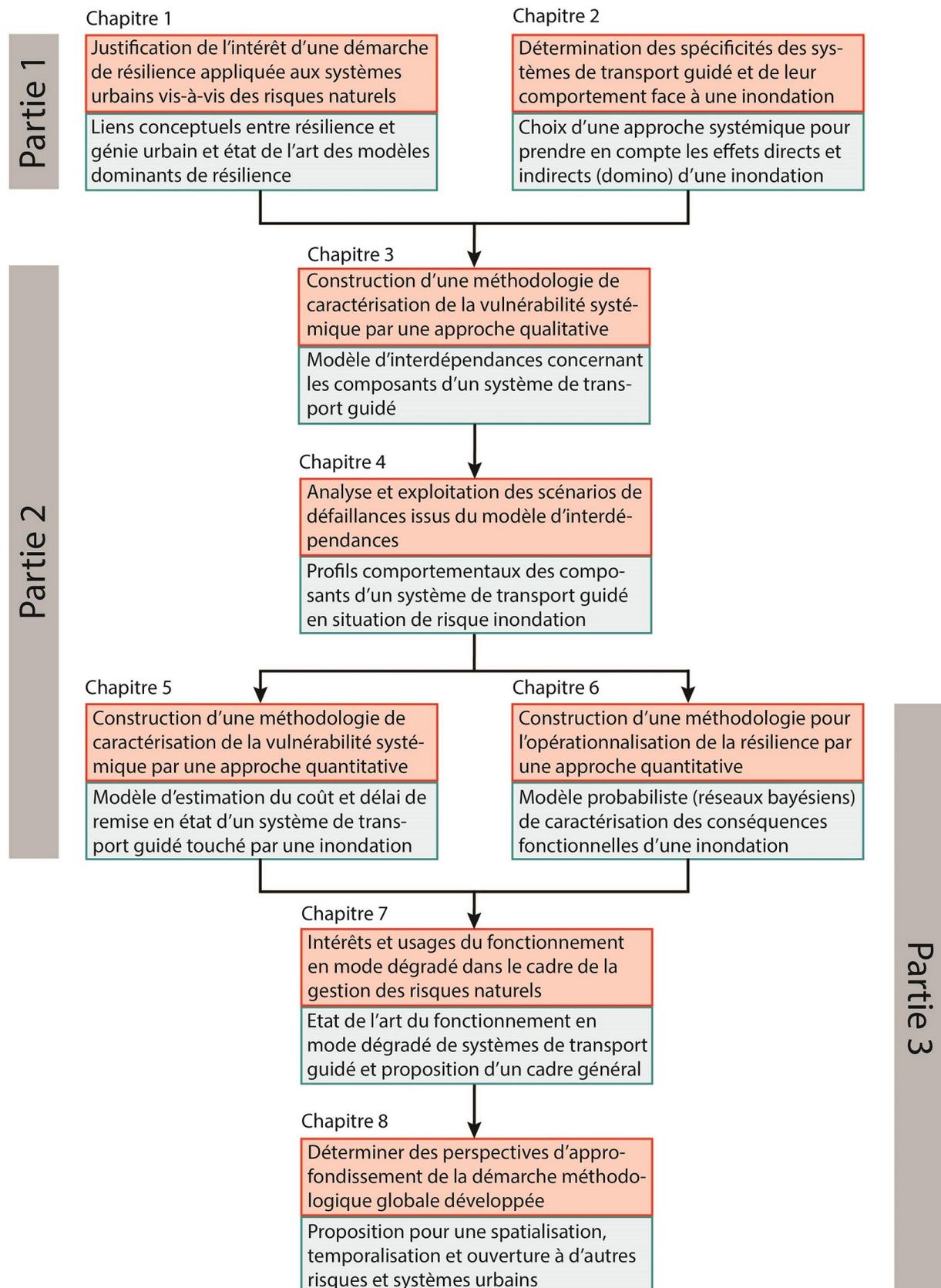


FIGURE 2 – Plan du mémoire

Première partie

ENJEUX ET SPÉCIFICITÉS DE LA RÉSILIENCE DES SYSTÈMES DE TRANSPORT GUIDÉ

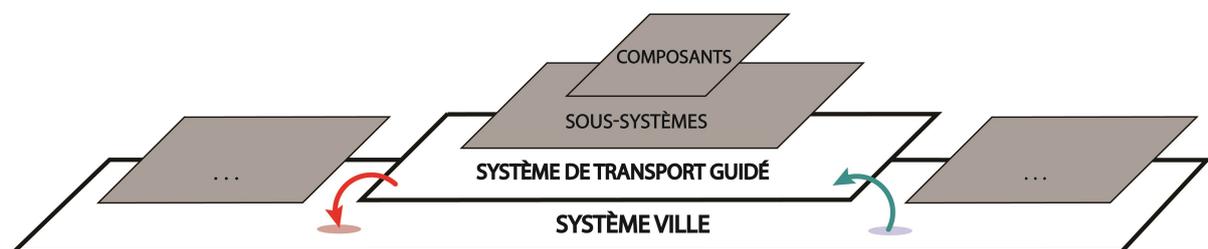


Chapitre 1

Appréhender la résilience des systèmes de transport guidé aériens, de surface et souterrains comme modèle de système technico-fonctionnel urbain

« C'est pourquoi, si l'on veut tenter de penser la résilience autrement que comme un mot à tout faire, le mieux est sans doute de la considérer comme une sorte de grande boîte à outils dans laquelle chacun apporterait les siens. Ce qui importe alors, ce n'est pas que le modèle soit rigoureux, mais qu'il soit opératoire. On peut même renoncer à lui chercher une cohérence d'un auteur à un autre... à condition de toujours comprendre précisément de quoi parle chacun. »

Serge Tisseron, *La résilience*, Que-sais-je, 5ème éd., PUF, 2014.



Avec au moins vingt-cinq définitions identifiées dans la littérature scientifique actuelle, la résilience urbaine apparaît comme clairement marquée par de nombreuses « tensions conceptuelles » qu'il est possible de regrouper en six catégories (MEEROW *et al.*, 2016) : (i) la définition de ce qui est entendu par « urbain » car la ville ne présente guère non plus de consensus définitionnel ou d'approche commune pour son analyse ; (ii) la notion d'équilibre qui sous-tend que la résilience peut être statique ou dynamique, unique ou multiple selon les auteurs ; (iii) le fait que la résilience urbaine soit considérée comme un concept positif c'est-à-dire orientée vers une certaine forme de progrès car la ville dépasse un état antérieur présentant des fragilités, ou au contraire, comme un concept qui n'est pas sans danger car il peut conduire à ce qu'une ville retourne à un état antérieur non désirable ; (iv) le processus en tant que tel qui conduit à une amélioration de la résilience urbaine est également débattu par ceux qui l'envisagent comme un processus de persistance dans un état ou au contraire d'évolution ou de transformation vers un autre état ; (v) l'échelle temporelle de mise en œuvre de la résilience qui oscille entre une nécessaire rapidité de rétablissement et comme un travail de fond qui se construit sur le long terme ; (vi) enfin, la résilience urbaine est considérée dans la recherche scientifique à la fois comme spécifique et générale (MILLER *et al.*, 2010), c'est-à-dire relevant respectivement d'une démarche d'adaptation face à des risques connus et d'une démarche d'adaptabilité (au sens d'être adaptable) face à des risques inconnus ou inattendus. Ce panel de tensions conceptuelles nécessitent donc de préciser quels postulats sont pris en compte pour tout travail portant sur l'étude de la résilience et recommandent également une réflexion sur le concept de résilience appliqué à l'urbain.

L'objet de ce chapitre est double. Tout d'abord, il s'agit de passer en revue les usages historiques de la résilience, non pour en détailler précisément les tenants et les aboutissants dans chacune des disciplines mais pour en déterminer les mobilisations majeures. La problématique liée à l'inévitable flou définitionnel qui accompagne cette multiplication d'utilisation du concept dans des champs variés est également abordée dans une optique de dépassement plutôt que de résolution. Ce dépassement est étudié sous l'angle opérationnel dans un contexte urbain : dans quelle mesure et à quelles conditions la résilience peut-elle permettre une amélioration de la gestion des risques touchant les villes, à partir d'actions concrètes ? Et, comment la résilience peut-elle offrir dans les pratiques de gestion des risques des réponses opérationnelles dans un contexte d'incertitudes, de complexité et de changement ?

Pour aborder ces interrogations, un préalable nécessaire est celui de justifier le rapprochement conceptuel qui est de fait opéré entre la résilience d'une part et le génie urbain d'autre part dès lors que l'on traite de la résilience urbaine. Ce rapprochement conceptuel qui consiste en fait à appliquer la résilience au génie urbain est contextuel car la situation peut être vue comme similaire concernant ces deux concepts : ils sont dotés d'une approche systémique, possèdent une terminologie fortement polysémique, des limites assez floues et une logique orientée vers l'action. Ce rapprochement est pertinent car il permet le développement de modèles conceptuels de résilience appliquée au génie urbain. Ces modèles donnent le cadre scientifique indispensable à toute mise en action de la résilience.

Ce dernier point est le second objet de ce chapitre : mettre en exergue les modèles de résilience dont les spécificités rejoignent celles d'une recherche sur la résilience des systèmes de transport guidé face au risque inondation. De cette façon, le positionnement scientifique pourra être fixé et les manquements actuels qu'il s'agit de dépasser pourront être étudiés.

1.1 Une réponse scientifique à la gestion des risques : de la notion au concept-outil de résilience

1.1.1 Historique et multiplicité des définitions de la résilience en génie urbain

Poly, multi, pluri sont autant de préfixes qu'il est inévitable de solliciter pour décrire précisément le terme de résilience. Polysémique, multidisciplinaire, plurivalent qualifient avec une juste acuité la kyrielle de significations que possèdent ce terme. Son appropriation par différentes disciplines qui perdure aujourd'hui a engendré l'apparition de nombreuses significations. Cet ensemble d'acceptions ont ainsi doté la résilience de plusieurs visages (SINAI *et al.*, 2015) que parfois seules des variantes orthographiques, dans certains domaines tels que la psychologie, permettent de distinguer pour éviter toute confusion : « résilience », « résilience » ou encore « Résilience » (TISSERON, 2014). Historiquement, des utilisations du terme ont été retrouvées dans le domaine de l'art, de la littérature ou encore de la législation durant le premier siècle après J.-C. et bien après, durant le XVI^{ème} siècle (ALEXANDER, 2013). Sans chercher à détailler l'ensemble des définitions que l'on peut trouver du terme de résilience dans la littérature scientifique internationale car ce travail de synthèse, de mise en cohérence et de confrontation des significations existe déjà de façon très complète pour plusieurs disciplines dans plusieurs ouvrages de référence (ASCHAN-LEYGONIE, 2000; DJAMENT-TRAN et REGHEZZA-ZITT, 2012; REGHEZZA-ZITT et RUFAT, 2015; SERRE *et al.*, 2013), les **courants dominants** sont ici précisés afin de mettre en exergue les visions existantes de ce terme et leurs points communs.

La discipline de la **psychologie** s'intéresse à ce terme depuis les années 1950 environ, en particulier aux Etats-Unis où la résilience y est théorisée. Plusieurs vagues se sont succédé dans cette discipline pour caractériser la résilience (RICHARDSON, 2002) : initialement décrite par Norman Garmezy, Michael Rutter ou Emmy Werner dans une première vague de théorisation comme une qualité personnelle (« *resilient quality* ») que possède ou ne possède pas les individus afin de se remettre à la suite d'évènements, une seconde vague décrit la résilience comme un processus (« *resiliency* ») durant lequel un individu subit des évènements perturbateurs, positifs ou négatifs d'ailleurs, lui permettant d'atteindre cette qualité de résilience. La troisième vague, plus en rupture avec les deux précédentes, décrit la résilience non pas comme une qualité et/ou un processus mais comme une force, une aspiration, une aptitude (« *resilient force and yearning* ») que chaque individu possède à un certain degré et qui permet de faire face à des évènements exceptionnels.

Les **sciences physiques** forment le deuxième courant dominant à s'intéresser à la résilience. Elles décrivent la résilience d'un matériau comme sa qualité à emmagasiner, sous une charge, de l'énergie et de la dissiper par une déformation élastique sans se briser ou être déformé¹ (GORDON, 1978). Cette définition met alors en exergue l'idée de plasticité ou de souplesse, ici du matériau (REGHEZZA-ZITT *et al.*, 2012).

Le troisième courant qui mobilise de façon majeure le terme de résilience est celui des **sciences écologiques**. La résilience d'un écosystème s'est traduite par sa qualité à être capable d'absorber des perturbations et à se réorganiser tout en subissant ces perturbations de sorte à toujours conserver intrinsèquement la même fonction, structure, identité et rétroaction² (WALKER *et al.*, 2004). Dès lors,

1. "The resilience of a material is the quality of being able to store strain energy and deflect elastically under a load without breaking or being deformed."

2. "Resilience is the capacity of a system to absorb disturbance and reorganize while undergoing change so as to still retain essentially the same function, structure, identity, and feedbacks."

la dynamique du système est mise en avant et la résilience est vue soit comme une mesure de la vitesse du système à évoluer en intégrant les transformations dues aux perturbations subies ou soit comme une mesure de sa vitesse à retourner à son état originel (PIMM, 1984), aussi abstrait que soit l'état « originel » d'un système en évolution continue. Dans les sciences écologiques, la résilience d'un système est donc liée à sa dimension dynamique, à sa propension à se présenter sous plusieurs états d'équilibre au cours de sa vie. Mais la résilience se distingue bien de la stabilité et s'apparente finalement à la persistance du système (HOLLING, 1973).

Le quatrième courant qui s'est approprié le terme de résilience est celui des **sciences sociales** en s'interrogeant sur la qualité des sociétés, des communautés d'individus à être capables de supporter l'occurrence d'événements externes tels que le changement climatique par exemple (TIMMERMAN, 1981). Elle existe selon un continuum de trois types (DOVERS et HANDMER, 1992) : (i) la résistance au changement et le maintien face à celui-ci, c'est-à-dire qu'il est primordial que la société évite le moindre changement et pour cela d'importantes ressources doivent être mobilisées pour la maintenir dans ce *statu quo*³ ; (ii) le changement à la marge, c'est-à-dire que la société est caractérisée par des changements incrémentaux ne remettant pas en cause les principes de base relatifs à son fonctionnement⁴ ; (iii) l'ouverture et l'adaptabilité, c'est-à-dire que la société parvient à réduire sa vulnérabilité face à un changement grâce à un haut degré de flexibilité, en modifiant les fondements de son fonctionnement et en adoptant ainsi de nouveaux cadres institutionnels⁵.

Dès lors, la résilience, ici de sociétés, peut présenter une posture **réactive** en se maintenant dans un *statu quo* afin qu'un changement subi n'entraîne pas de transformation ou seulement à la marge. Mais, la résilience peut également présenter une posture **proactive** en acceptant l'inévitabilité du changement et en créant les conditions pour parer la société à un certain niveau de transformation inéluctable (KLEIN *et al.*, 2004). Dans ce second cas, le changement, et la régénération qu'il implique, devient opportunité urbaine (SERRE, 2011) voire fenêtre d'opportunités (VAN HERK *et al.*, 2011) revêtant un caractère positif plutôt qu'une dimension négative voire destructrice (HERNANDEZ, 2010).

Enfin, cinquième et dernier courant dominant à avoir mobilisé le terme de résilience : la **cindynique** et plus précisément la *riscologie* (JOUSSE, 2009) c'est-à-dire la science des risques, de leur analyse et de leur gestion. Cet intérêt pour la résilience est devenu majeur dans la recherche sur les risques depuis le début du XXI^{ème} siècle (PIGEON, 2012). D'une certaine façon, la science des risques s'oppose fortement, dans son acception et son utilisation du terme de résilience, aux sciences physiques précédemment décrites. Les sciences des risques révèlent une mobilisation de la résilience au travers d'une approche ingénieriste de la relation qui lie le risque et un objet technique. En effet, si les sciences physiques voient dans la résilience d'un objet une plasticité et une élasticité qui lui est propre, les sciences des risques (JOUSSE, 2009) y voient plutôt une résistance, une fiabilité, une robustesse, une stabilité face à l'imprévisible. Cette vision est parlante dans le cas d'infrastructures techniques ou de réseaux techniques dont les taux de défaillances sont à minimiser au maximum afin que leur fonctionnement se fasse toujours dans des conditions normales. La vocation est alors celle de maîtriser les risques, ou mieux, de les réduire ce qui a permis le développement de la Sûreté de Fonctionnement qui peut être considérée comme une riche palette de méthodes et concepts pour la maîtrise des risques (LHOMME, 2012, p. 179).

3. "Resistance and maintenance [...] is characterized by resistance to change. A management system of this type will do its utmost to avoid change and uncertainty, and enormous resources will be expended in maintaining the status quo."

4. "Change at the margins [...] is characterized by incremental change — change which does not challenge the basis of our societies, but which may lead to changes in emphasis at the margins."

5. "Openness and adaptability [allow to] reduce vulnerability through a high degree of flexibility. Its key characteristic is an ability to change basic operating assumptions, and thus institutional structures, and adopt new ones."

Ainsi, au vu de ces courants aussi divers et variés, le terme de résilience peut bien être vu comme un *concept* (DAUPHINÉ et PROVITOLO, 2007; BARROCA *et al.*, 2012; BACH *et al.*, 2013) car c'est un objet construit dans une communauté de savoirs très divers (sciences du risque, sciences écologiques, psychologie...) et non une *notion* faisant usuellement référence à un objet à la signification plus vague ou plus vaste.

Bien que ce concept ne soit pas unanimement défini, il est essentiel de constater qu'au sein de ces différents courants d'utilisation, il recouvre des idées communément acceptées : le concept de résilience est **systémique** et **holistique** (LHOMME *et al.*, 2013; SERRE, 2011) car il aborde toujours l'évènement perturbateur dans son effet global sur le système étudié ; le concept de résilience est toujours inscrit dans une **temporalité** , qu'elle soit courte ou longue (TOUBIN *et al.*, 2013; SERRE, 2011), qu'elle soit celle spécifique liée à la durée de l'évènement perturbateur ou celle générale liée au processus permanent d'apprentissage et d'adaptation du système (WALKER *et al.*, 2009; SERRE, 2011) ; le concept de résilience présente également une nécessaire dimension **spatiale** afin d'intégrer les propriétés spatiales des objets étudiés, le contexte spatial dans lequel ceux-ci s'insèrent et les dynamiques propres d'évolution dans le temps de ce contexte spatial (CUMMING, 2011a,b; TOUBIN *et al.*, 2013).

Avec pourtant près d'une cinquantaine de définitions largement reconnues (CARRI, 2013), la résilience n'est pas qu'un de ces mots bons pour la controverse, la dialectique et l'éloquence⁶. Si les différents courants scientifiques et techniques démontrent l'utilisation prolifique et simultanée du concept, ils apparaissent également comme la source majeure, s'il en est, de sa polysémie. Or, s'il ne faut pas associer la plurivalence et la polysémie du concept uniquement à sa multidisciplinarité car celui-ci tend à évoluer en même temps qu'évolue la conception des objets étudiés (LHOMME, 2012, p. 72), elles génèrent une forte ambiguïté (REID et BOTTERILL, 2013; ROSE, 2007) sur ce que contient le concept de résilience.

Cette ambiguïté du terme semble, de surcroît, exister à un degré supérieur à celui des différentes définitions disciplinaires qu'on lui attribue. En effet, au-delà de leur propre définition, les nombreux sens que prend la résilience s'enrichissent et s'affaiblissent mutuellement : l'usage fait de ce concept dans les sciences écologiques dans les années 1970 a profondément nourri son usage dans les sciences humaines, tout comme son utilisation dans les sciences physiques a fourni en quelque sorte son cadre d'utilisation dans les sciences du risque, par exemple. Ces processus dialogiques dans lesquels ces sens se répondent et s'opposent sont particuliers à ce concept du fait de sa malléabilité (REID et BOTTERILL, 2013), de sa plasticité ou de son élasticité terminologique (REGHEZZA-ZITT, 2015). Cette élasticité trouve même son paroxysme dans le caractère énantiosémique de la résilience, c'est-à-dire que dans certaines acceptions, la résilience peut signifier à la fois une chose et son contraire. Cette situation conduit ainsi à des définitions parfaitement incompatibles (REGHEZZA-ZITT *et al.*, 2012) et diamétralement opposées (REID et BOTTERILL, 2013). Par exemple, l'incompatibilité entre d'une part la résilience vue comme résistance et d'autre part la résilience vue comme flexibilité (DJAMENT-TRAN *et al.*, 2012), comme stabilité et dynamisme ou bien comme équilibre dynamique et évolution⁷ (ALEXANDER, 2013). Mais, certains sens se font aussi tout à fait écho : le concept de résilience dans les sciences sociales et dans les sciences écologiques gravite autour de l'adaptabilité des objets étudiés face à des évènements perturbateurs. Par conséquent, la résilience et les notions qui lui sont associées dans différentes disciplines semblent former un arc-en-ciel, un nuage de sens (LHOMME *et al.*,

6. Pour paraphraser Paul Valéry à propos du mot « liberté » dans *Regards sur le monde actuel et autres essais*, « Fluctuations sur la liberté » (1938).

7. "As other authors have noted, as a concept, resilience involves some potentially serious conflicts or contradictions, for example between stability and dynamism, or between dynamic equilibrium (homeostasis) and evolution."

2010), une nébuleuse de concepts connexes (QUENAULT, 2013b) faisant de ce mot un concept « parapluie » regroupant lui-même un ensemble de concepts voisins (KLEIN *et al.*, 2004) voire un paradigme (LHOMME, 2012; McENTIRE *et al.*, 2002), un univers de sens à lui tout seul.

Cette polysémie perdure encore actuellement dans la littérature scientifique car le recours au concept de résilience dans de nouvelles disciplines semble loin de s'essouffler. Par exemple, selon (PIGEON, 2012), son utilisation récente dans le cadre de la géographie des risques apparaît utile pour la compréhension, notamment géographique, des catastrophes qui touchent les sociétés urbanisées. Toujours selon cet auteur, cette appropriation de la résilience par le champ de la géographie des risques a été permise par l'accointance qui existe entre les sciences écologiques, initiées depuis plusieurs décennies à ce concept, et la géographie. La problématique posée par l'inéluctabilité du changement climatique est également une appropriation assez récente du concept de résilience (QUENAULT, 2014) dans laquelle la résilience correspond à la notion d'adaptation à ce changement climatique (MITCHELL *et al.*, 2010), signification largement reprise par les institutions internationales (UNISDR, 2012, 2015). Le concept de résilience atteint nouvellement les sphères de l'aménagement du territoire, de l'urbanisme et de l'architecture dans lesquelles son transfert vise à soutenir l'élaboration d'une société urbaine durable fondée sur les notions de solidarité, d'intégration des habitats humains. Le concept tiendrait davantage compte des êtres humains, des animaux et des plantes, des sols et sous-sols et de l'eau (TERRIN, 2014, p. 56). Enfin, l'arrivée progressive récente de « *compétences qui débordent le socle historique de l'urbanisme* » (CNRS, 2016) portées par exemple par les designers issus du design industriel, l'ingénierie du numérique ou encore les artistes au sens large qui interviennent déjà sur l'espace urbain aura sans aucun doute dans un futur proche des conséquences sémantiques sur la résilience appliquée à la ville.

Ainsi, la proximité de certains champs disciplinaires dans leur théorie et leur pratique crée donc des facilités quant à un transfert du concept de résilience d'un champ à l'autre, ce qui démontre bien l'existence de processus dialogiques entre les différents sens de ce terme. Trouver un consensus sur la signification de ce terme ne peut donc être, de fait, que difficile (McENTIRE *et al.*, 2002) vu l'élargissement substantiel de son interprétation (WOLOSZYN et QUENAULT, 2013) qui ne cesse de s'accroître. Dans ce cadre, il est fort probable que cette mosaïque de sens associés au concept de résilience poursuive sa croissance dans le futur à un rythme aussi excessif, renforçant inévitablement sa polysémie, sa multidisciplinarité et sa pluralité.

L'interrogation sur le fait que la résilience persiste dans le temps et passe de domaine en domaine sans discontinuer est de rigueur. De concept théorique, la résilience est alors même devenue terme « à la mode » (DJAMENT-TRAN *et al.*, 2012; REGHEZZA-ZITT *et al.*, 2012; LHOMME, 2012) ou « *buzzword* » (BOIN *et al.*, 2010; WEICHELGARTNER, 2014) dans des domaines aussi nombreux que ceux qui l'utilisent. Cette omniprésence et ce succès sont même constatés par journaux et magazines ne relevant pas des sciences et cherchant à expliquer le phénomène (WALSH, 2013; MAZUR et FAIRCHILD, 2015; HUSSAIN, 2013). En fait, cet apparent succès semble s'expliquer par certains par le flou enveloppant le sens de ce terme (KLEIN *et al.*, 2004; LHOMME, 2012) permettant alors son appropriation dans des domaines très divers. Or, ces utilisations peuvent représenter un danger critique de dilution de la précision conceptuelle et de la pertinence de la résilience à mesure que le terme est justement mobilisé de manière aussi large et ambiguë⁸ (BRAND et JAX, 2007). Il est important de signaler que cette polysémie, source d'un important danger épistémique selon certains, est loin d'être le propre

8. "Both conceptual clarity and practical relevance are critically in danger. The original descriptive [...] meaning of resilience is diluted as the term is used ambiguously and in a very wide extension."

du concept de résilience. Par exemple, dans des thématiques proches de la résilience justement, le terme de vulnérabilité a souffert, et souffre toujours, « *d'un trop-plein sémantique puisqu'il évoque aussi bien le potentiel de pertes ou la fragilité que la dépendance, l'insécurité, la centralité, le gigantisme, la complexité... mais aussi l'absence de régulations efficaces ou la faible résilience* » (FABIANI et THEYS, 1987). Le terme de reconstruction lui aussi est, à tort, souvent assimilé à l'action de rebâtir une société après l'occurrence d'une catastrophe alors qu'il comporte bien d'autres facettes que la simple action de construire à nouveau (MOATTY, 2015). Le terme de risque quant à lui, pour poursuivre cette sélection de mots polysémiques, « *s'est imposé dans toutes les disciplines, ce qui a entraîné une dilution sémantique du mot risque et parfois une dilution de son sens* » (VINET, 2010, p. 7) d'autant que « *toute incursion potentielle d'un nouvel élément, d'une externalité, d'un changement est considéré comme un risque* » (VINET, 2010, p. 12). D'autres cas nombreux de « trop-plein sémantique » existent pour des concepts hautement polysémiques sans pour autant invalider la pertinence de leurs usages. La preuve en est que la plupart de ces termes polysémiques sont promus comme adjectifs qualifiants ou ayant qualifié à tour de rôle les sociétés urbaines : de la « société du risque » d'Ulrich Beck en 1986 (BECK, 2001) en passant par la « société vulnérable » de Jean-Louis Fabiani et Jacques Theys en 1987 (FABIANI et THEYS, 1987) pour atteindre aujourd'hui la « société de la résilience » encouragée par Jean-Jacques Terrin (TERRIN, 2014, p. 56) voire la « société de l'incertitude » principalement conceptualisée par Magali Reghezza-Zitt (REGHEZZA-ZITT, 2015) et caractérisée notamment par sa complexité⁹.

En définitive, que penser d'un terme qui, à tort ou à raison peut-être, traverse les siècles, se retrouve dans plusieurs courants de pensée de la philosophie, de l'écologie ou encore de l'économie et est désormais utilisé et parfois brandi par les pouvoirs publics locaux et institutions internationales comme injonction et impératif aux populations (DJAMENT-TRAN *et al.*, 2012; QUENAULT, 2015b) ? Dans ce dernier cas, le terme de résilience recouvre alors mêmes des considérations éthiques et morales (RUFAT, 2011) lui conférant une dimension quasi manichéenne selon laquelle des dysfonctionnements politiques et sociaux sont susceptibles d'engendrer une bonne ou une mauvaise résilience, des formes de résilience plus souhaitables que d'autres, plus nocives et toxiques (HERNANDEZ, 2010, 2012). Pourtant, un aperçu de la littérature scientifique traitant de la résilience montre de façon assez manifeste qu'elle est un terme, paradoxalement, « à la mode » de très longue date. En effet, le « voyage étymologique »¹⁰ du terme de résilience a été retracé dès le I^{er} siècle ap. J.-C. avec des usages retrouvés du terme dès cette époque, pour ensuite réapparaître régulièrement à partir du XVI^{ème} siècle et jusqu'à de nos jours dans des champs disciplinaires déjà très différents (Figure 1.1) (ALEXANDER, 2013). Dès lors, il semble clairement utopique de vouloir qu'un terme avec un tel historique, alimenté par des siècles d'emploi dans des domaines variés puisse être défini avec simplicité et de façon unanime. Il semblerait même que cela soit épistémiquement quasi impossible tant la connaissance portée par ce terme est importante. Toute définition est donc de fait contrainte à occulter des éléments, à ne pas aborder l'étendue des acquis qui se trouvent au sein du concept de résilience.

Cette course à la formalisation théorique ne doit pas devenir stérilisante ni inhibitrice des possibilités réelles d'opérationnalisation et de mise en pratique que véhicule ce concept particulièrement positif (REGHEZZA-ZITT, 2015; LHOMME *et al.*, 2010; KLEIN *et al.*, 2004), proactif (CUTTER *et al.*, 2008), mobilisateur¹¹ (REGHEZZA-ZITT *et al.*, 2012; FEKETE *et al.*, 2014) et à l'approche dynamique (BARROCA *et*

9. La « société de l'incertitude » est également conceptualisée dans les sciences humaines, en France, par les sociologues Michel Kokoreff et Jacques Rodriguez (voir « Une société de l'incertitude », *France 2005, Portrait d'une société*, Hors-série *Sciences Humaines*, N°50, Septembre-Octobre 2005) ainsi que par le sociologue Louis Chauvel (voir *Les classes moyennes à la dérive*, Editions du Seuil, Collection « La république des idées », 2006, 108 p.)

10. "An etymological journey."

11. "Stimulating"

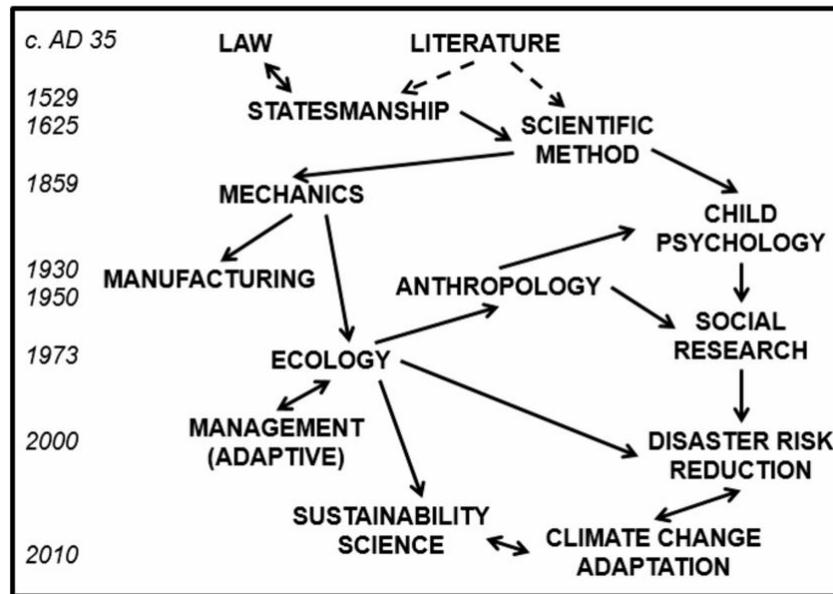


FIGURE 1.1 – Diagramme schématique de l'évolution historique et disciplinaire du terme de résilience (ALEXANDER, 2013)

SERRE, 2013 ; BARROCA *et al.*, 2012). Le concept de résilience n'a pas fondamentalement besoin d'être érigé comme un paradigme unique pour la gestion des risques en milieu urbain vis-à-vis des praticiens. Sur le plan théorique, il peut sembler amplement suffisant en effet de voir ce concept comme un point de départ ou comme le commencement d'une recherche vers un nouveau paradigme¹² (MANYENA, 2006) dès lors que le but est de le mettre en œuvre de façon opérationnelle. Car, si certains ont une approche sans doute démesurée de la résilience en allant jusqu'à penser qu'elle va changer le monde, en concevant localement des petits systèmes résilients et des politiques promptes à réagir face aux chocs économiques, sociaux et écologiques à venir (SINAI *et al.*, 2015), **son réel apport se situe sans doute dans sa pratique, dans sa mise en œuvre, dans les leviers d'actions** économiques, politiques, sociaux que le concept est concrètement capable d'inciter puis de soutenir.

Finalement, malgré cette ambiguïté imparable du concept laissant conclure qu'il existe des résiliences plutôt qu'une résilience, il est essentiel de constater qu'à condition d'explicitier à quel paradigme se rattache telle ou telle acception du terme (REGHEZZA-ZITT, 2014), à condition de toujours comprendre précisément de quoi parle chaque auteur (TISSERON, 2014), à condition de spécifier pour chaque situation donnée l'objet d'étude (« la résilience de quoi ») et la source du changement (« la résilience face à quoi ») (GERSONIUS *et al.*, 2012; GERSONIUS, 2012; CARPENTER *et al.*, 2001; WALKER *et al.*, 2009) ainsi que l'échelle temporelle et spatiale d'analyse¹³ (WEICHSELGARTNER, 2014; WEICHSELGARTNER et KELMAN, 2014), **le concept de résilience s'inscrit dans un contexte précis et pour un usage précis**. Dès lors, contexte et usage identifiés, la résilience ne s'opère que dans une dimension **pratique** et non plus théorique, dans une **situation donnée** et pour une utilisation claire du concept. Et c'est sans doute dans une optique d'opérationnalisation que le concept de résilience démontre tout son intérêt. Un des domaines dans lesquels l'application de la résilience fait l'objet de nombreux travaux depuis les deux dernières décennies est celui de la ville, et plus précisément celui du génie urbain.

12. "It is perhaps safe now not to label it [resilience] as a paradigm but as 'a[n] [...] entry point' or to see it as the beginning of a search for a new paradigm."

13. "Resilience of what to what at what scales".

1.1.2 Résilience et génie urbain : des logiques concordantes pour des apports mutuels

1.1.2.1 Problématiques communes entre résilience urbaine et génie urbain

Cette section s'interroge sur les relations qui peuvent exister entre le génie urbain et la résilience. S'il est sans doute possible de les opposer sur un grand nombre d'aspects, il apparaît également que le génie urbain et la résilience appliquée à l'urbain sont étroitement liés par, d'une part, le fait que les difficultés de leur émergence et d'une acception unanime de leur signification présentent des similitudes fortes et, d'autre part, que leur approche respective converge vers une logique semblable qui est celle de l'action. Pour justifier le rapprochement épistémologique entre génie urbain et résilience qui s'opère depuis peu dans la recherche et dans laquelle s'inscrit pleinement nos travaux, cette section questionne donc leurs similitudes.

Tout d'abord, le génie urbain, selon certains auteurs, d'emblée existe et n'existe pas de par sa position à cheval entre plusieurs autres sciences du génie (THIBAUT, 2000). Or, bien au contraire certains auteurs affirment que le génie est urbain dès l'origine. En effet, en France, la science militaire peut être considérée comme la première science d'un point de vue historique et elle est de fait intrinsèquement urbaine car elle s'est toujours appliquée à des villes : fortification, assiègement, etc. (GUILLERME, 2014). D'autres auteurs voient dans le génie urbain un art, en l'occurrence « *l'art de concevoir, de construire et/ou de gérer des réseaux [...] techniques mais aussi sociaux, supports de services urbains* » (ALLEMAND, 2009b, p. 21)¹⁴. Ainsi, c'est le (i) premier point commun entre génie urbain et résilience, le **génie urbain est polysémique**. Du fait lui aussi de sa plasticité (ALLEMAND, 2009a, p. 318), le génie urbain ne fait pas l'objet d'une acception définitionnelle commune mais plutôt de plusieurs définitions qui se recoupent et qui parfois s'opposent. La définition proposée par le Dictionnaire de l'urbanisme et de l'aménagement estime, par exemple, que le génie urbain est « *une approche unique et globale de la voirie, des réseaux divers et des transports qui cherche à améliorer la productivité et l'efficacité des aménagements et services urbains en associant des pans de l'analyse urbaine jusque-là séparés : choix techniques, structure spatiale, intercommunalité* » (MERLIN et CHOAY, 2015). Cette définition rejoint celle du dictionnaire consacré à *La ville et l'urbain* qui, de façon prudente, indique que le génie urbain « *pourrait être l'art de construire des villes dans leur dimension technique, en particulier l'art de l'ensemble des réseaux techniques qui permettent à la ville de fonctionner* » (PUMAIN et al., 2006). D'autres définitions mettent en avant, non pas les enjeux uniquement techniques mais aussi la dualité scientifique et technique que comprend le génie urbain qui est « *l'ensemble des professionnels, entreprises et services, ayant en charge la conception, la réalisation et la gestion de l'ensemble des réseaux techniques urbains, de la voirie aux nouveaux réseaux d'informations numériques, le corpus des savoir-faire, recherches et connaissances, établi à cet effet, l'ensemble des formations d'ingénieurs orientées vers les techniques urbaines* » (THIBAUT, 2000). En conséquence, et c'est le (ii) deuxième point commun : l'approche prônée par le **génie urbain est « unique et globale »** tout comme celle de la résilience dont la logique est systémique et holistique. Dans le cas du génie urbain, l'unification est nécessaire et possible au sein des différents champs disciplinaires (MARTINAND, 1986) dont le génie urbain semble être à l'interface. Cette nécessité est d'autant plus grande que le champ du génie urbain porterait des tendances à l'éclatement en plusieurs domaines sectoriels et cloisonnés

14. L'ouvrage *Sous la ville durable, le génie urbain* a été réalisé en 2009, année où l'Ecole des Ingénieurs de la Ville de Paris a fêté ses 50 ans. Dans ce contexte, le journaliste Sylvain Allemand a fourni sa vision personnelle de l'actualité relative aux recherches et initiatives en matière de développement durable. Si sa vision peut être discutable, il n'en demeure pas moins un travail très riche de rencontres et d'interviews de professionnels de la ville donnant à l'ouvrage une portée opérationnelle et pratique.

car l’articulation entre les nombreux réseaux, les acteurs, les échelles administratives, spatiales et les enjeux sociaux-économiques n’est pas une tâche aisée (MARTINAND, 1986). Subséquemment à cette exigence d’unification, le génie urbain en tant que domaine de recherche souffre de fait de difficultés à identifier ses frontières (PROST, 1999, p. 10) puisque « dans cette démarche dialectique et sans frontière » force est de constater que « le champ qui s’ouvre à lui est incroyablement [...] vaste » (DUPUY, 1981). D’où, le (iii) troisième point commun entre résilience et génie urbain : les **frontières** respectives de ces deux concepts sont **complexes à déterminer** car les limites sont sans cesse repoussées dès lors que l’évolution des techniques, des technologies et des métiers remet en question ce qu’ils englobent. De plus, l’émergence et l’utilisation ces dernières décennies de notions telles que le développement durable et consécutivement la ville durable amènent le génie urbain « historique » à évoluer. Le génie urbain « modernisé », « renouvelé » voire « refondé » (DIAB et SOUCY, 2013) se différencie du génie urbain historique par une approche plus globale, qui tient compte des relations complexes que les composants des villes entretiennent entre eux, des risques de tous types que cette haute connectivité peut engendrer, des enjeux de développement durable ou encore des jeux d’acteurs (LAB’URBA, 2016). En un sens, le génie urbain refondé ne se focalise plus sur une course à la théorisation puisque « de toute façon, des conceptions différentes, voire divergentes, du génie urbain vont continuer à cohabiter à l’avenir et ces ambiguïtés ou ces à-peu-près sont sans doute nécessaires pour rassembler des professions et des institutions qui n’ont pas la même position et donc pas le même point de vue » (MARTINAND, 1986) mais plutôt sur une vision immédiatement active car il est un outil opérationnel à la fois pour la mise en œuvre de politiques locales de développement durable (DIAB, 2012) et de résilience urbaine (DIAB et SOUCY, 2013). Cet élément constitue (iv) le dernier point commun qu’il est possible de mettre en avant entre génie urbain et résilience : leur obstacle définitionnel semble se clarifier, ou du moins être **dépassé**, par le biais d’une **logique opératoire** qui les rend finalement préhensibles dès lors qu’ils sont traduits dans l’**action urbaine**. Cette action urbaine, entendue comme un urbanisme de planification et/ou un urbanisme de projet, présente donc des caractéristiques en lien avec la résilience. L’action urbaine au travers d’interventions planifiées ou d’urgence, massives sur un territoire ou restreintes localement est donc qualifiable par son degré de résilience.

Les similitudes entre génie urbain et résilience urbaine sont résumées dans le [Tableau 1.1](#).

TABLEAU 1.1 – Synthèse générale des problématiques similaires qui concernent la résilience et le génie urbain

Problématique	Résilience		Génie urbain
Approche	Holistique	↔	Systemique, intégrée
Terme	Polysémique	↔	Polysémique
Concept	Limites floues	↔	Frontières indéterminées
Logique	Orientée vers l’action	↔	Opérationnelle

Finalement, le rapprochement épistémologique entre génie urbain et résilience semble légitime. La pertinence du rapprochement de ces deux concepts est prouvée dans leurs apports réciproques. En particulier, ces contributions sont essentielles dans la gestion des risques qui affectent les villes.

1.1.2.2 Apports réciproques entre résilience urbaine et génie urbain

1.1.2.2.1. La résilience urbaine, une démarche pratique de gestion des risques ?

Un des sujets applicatifs de prédilection de la résilience en génie urbain est celui des risques qui affectent une ville.

Parmi ces risques, qualifiés alors d'urbains à la fois par leur inhérence aux évolutions et dynamiques des villes qui les aggravent voire les engendrent (DUBOIS-MAURY et CHALINE, 2004) et par les dimensions sociales, économiques, environnementales ou encore politiques qu'ils recouvrent (METZGER et D'ERCOLE, 2011), se trouvent les risques naturels. Le risque **inondation** est le plus prégnant car il représente pour illustration dans le monde 47 % des catastrophes naturelles survenues les vingt dernières années en ayant affecté 2,3 millions de personnes (CRED, 2015). Pour illustration en France, un habitant sur quatre et un emploi sur trois sont potentiellement exposés (MEDDE, 2012). À une échelle plus réduite encore, les retours d'expériences d'inondations passées et plus généralement d'aléas montrent que les dysfonctionnements urbains peuvent être liés aux dysfonctionnements des réseaux techniques urbains et à leur criticité (SERRE, 2011). L'explication est double : d'une part, les réseaux techniques urbains sont très sensibles à tous types d'aléas, de l'erreur humaine aux attentats, en passant par les aléas technologiques et naturels ; d'autre part, le fonctionnement de la ville dépend en grande partie du fonctionnement des réseaux (SERRE *et al.*, 2016). Dans ce contexte, la moindre défaillance de ces réseaux, squelette (VENTURA *et al.*, 2010; LHOMME *et al.*, 2011) ou système nerveux (YUSTA *et al.*, 2011; SERRE, 2015b) des sociétés modernes, peut avoir des conséquences en cascade sur le fonctionnement urbain (ROBERT et MORABITO, 2009). Les réseaux techniques constituent ainsi ce qu'il est désormais consensuel de nommer des « infrastructures critiques » (LA PORTE, 2006) car ils ont déjà été explicitement identifiés comme portes d'entrée de l'aléa et du risque (LHOMME *et al.*, 2010) et l'analyse de leur résilience a même prouvé qu'elle constitue un préalable nécessaire mais non suffisant à la mise en place de politiques d'amélioration de la résilience urbaine face aux inondations (LHOMME, 2012). Par conséquent, la gestion des risques urbains, en particulier celui du risque inondation, demeure un enjeu essentiel pour la pérennité des villes et leur persistance socio-économique.

Partant de ce fait-là, le concept de résilience s'est vu érigé comme une réponse (LHOMME, 2012, p. 81) qu'elle soit théorique ou pratique, en rupture (SERRE, 2013) par rapport à la gestion traditionnelle des risques ou encore prometteuse (REGHEZZA-ZITT *et al.*, 2012) par rapport aux difficultés récurrentes rencontrées par celle-ci. Or, actuellement l'enjeu essentiel et l'attente majeure, s'il en est, de la résilience se situent dans la traduction de celle-ci dans la pratique, dans l'action. Ce constat est unanime au sein de la communauté scientifique et trouve essentiellement ses fondements dans les problématiques suivantes.

Premièrement, le manque de consensus dans l'acceptation de ce que couvre et ne couvre pas, théoriquement, le concept de résilience est un frein somme toute logique à sa mise en action. Les connaissances sur la résilience sont donc imparfaites d'un point de vue théorique (DAUPHINÉ et PROVITOLLO, 2007) limitant de fait sa mise en pratique.

Deuxièmement, des expériences et des méthodes appliquées à des systèmes techniques urbains ont développé des démarches résilientes qu'il n'est plus possible d'ignorer, en particulier car elles questionnent les stratégies habituelles de gestion des risques, ces démarches restant néanmoins spécifiques et contextuelles (BARROCA *et al.*, 2012). Ces démarches initiatives, méthodologiques mais surtout pratiques et concrètes, émergent à l'échelle des quartiers urbains car ils apparaissent adaptés pour l'expérience et le développement de nouvelles pratiques de conception afin d'implémenter la

résilience notamment face au risque d'inondation (BALSELLS, 2015). Ces démarches locales et ponctuelles, à travers l'Europe notamment, ne datent que d'une vingtaine d'années et il est encore difficile d'apprécier leurs qualités (DAUPHINÉ et PROVITOLLO, 2007) et leurs effets sur le long terme. C'est la raison pour laquelle elles ne font l'objet d'analyses précises que depuis très récemment pour en déterminer, autant que faire se peut, des pratiques génériques.

Troisièmement, en corollaire à la problématique précédente, la résilience urbaine est déjà en train de s'opérationnaliser de façon tangible dans les pratiques de conception urbaine ; il est raisonnable de s'interroger sur la nécessité, voire l'urgence désormais, d'avoir des référentiels qui surtout encadrent les pratiques plus qu'ils ne les contraignent, afin que ce recours naissant à la résilience dans l'action urbaine devienne pertinent, propice et peut-être presque intuitif pour les acteurs associés ne voyant que trop rarement dans les risques urbains une opportunité sous-jacente forte pour l'aménagement (PASCHE et GEISLER, 2005; VAN HERK *et al.*, 2011; SERRE, 2011; ASHLEY *et al.*, 2012). Ces référentiels peuvent tout autant contenir des « bonnes pratiques » en matière de résilience (OCDE, 2014, p. 1) que des indicateurs pertinemment construits, validés et dont l'intérêt semble croître dans la recherche sur la résilience (CARPENTER *et al.*, 2001; FRANCIS et BEKERA, 2014; LHOMME, 2015). Ils peuvent également présenter des grilles d'évaluation à partir de critères spécifiques de la résilience urbaine face à un risque donné comme le risque inondation (SAJALOLI *et al.*, 2011). Ces grilles ne sont d'ailleurs pas nouvelles dans le domaine de la gestion des risques. De telles grilles ont, en effet, déjà été exploitées pour des lectures de vulnérabilités (REGHEZZA, 2006; REGHEZZA et GLEYZE, 2007; MESCHINET DE RICHEMOND et REGHEZZA, 2010), de risques (MERAD, 2003) ou encore des processus d'alerte (CRÉTON-CAZANAVE, 2010) et leur multiplicité peut s'expliquer par le fait qu'elles représentent souvent le meilleur formalisme permettant de rendre compte de la relation complexe entre les risques et les territoires urbains (LHOMME, 2012, p. 65). Ces référentiels peuvent, enfin, être des cadres d'analyse ou *a minima* contenir des éléments de cadrage, permettant de justifier comment une action déterminée sur la conception urbaine peut contribuer ou non à l'amélioration de la résilience (BALSELLS *et al.*, 2013).

Finalement, si les synergies entre la recherche sur la résilience urbaine face aux risques naturels et les pratiques de conception urbaine n'ont pas encore été clairement établies (BALSELLS *et al.*, 2015), c'est essentiellement par manque de référentiels qui permettraient alors de passer le cap du théorique vers l'opérationnel. Ce cap peut être franchi par le rapprochement, désormais justifié et légitime, entre résilience et génie urbain.

1.1.2.2.2. Modèle conceptuel de représentation de la démarche de résilience en génie urbain

Actuellement, la gestion des risques en génie urbain est essentiellement vue à travers la fiabilité des systèmes urbains au vu de la dépendance des villes à leur bon fonctionnement (SERRE *et al.*, 2016). Dans ce contexte de risques urbains et de dépendance croissante des populations vis-à-vis de ceux-ci (LA PORTE, 2006), les réseaux urbains doivent être analysés par l'approche transversale et bivalente portée par le génie urbain. Cette approche consiste d'une part à caractériser les contraintes techniques qui amènent à la conception et à la gestion des réseaux, et d'autre part à analyser l'inscription de ces réseaux dans les territoires, dans les usages et les appropriations ; le réseau technique devient alors un système technique, c'est-à-dire un ensemble d'éléments techniques, organisationnels, de méthodes, d'acteurs connexes, s'inscrivant dans un territoire urbain (BARROCA *et al.*, 2012).

Une des manières d'opérationnaliser le concept de résilience est donc d'analyser les systèmes techniques urbains au travers du prisme du génie urbain. Pour chercher les moyens d'opérationnaliser la résilience en génie urbain, c'est-à-dire de rechercher et construire de la connaissance utile à sa

mise en action, il semble être nécessaire de travailler dans ce que (PROST, 1999) appelle des « zones frontières », qu'elles soient les frontières des domaines de validité des modèles, les frontières entre les différentes échelles de temps et d'espace, ou bien les frontières avec d'autres sciences. Pour paraphraser l'auteur, la résilience peut être considérée comme une frontière du génie urbain en ce sens qu'elle se situe à la convergence entre :

- la recherche portée par le concept de résilience, et, l'action sur la ville portée par le génie urbain ; cette démarche est à rapprocher d'une démarche de recherche-action urbaine dont on retrouve les deux traits caractéristiques que sont la complexité théorique des objets étudiés et le manque de méthodes éprouvées pour les praticiens afin de mener à bien leurs activités (LIU, 1997, p. 20) ;
- l'approche globale portée par le concept de résilience et l'approche pratique des acteurs de la gestion urbaine portée par le génie urbain ; l'objectif dans cette zone frontière est alors ici de proposer une conceptualisation commune de la résilience permettant d'orienter des stratégies opérationnelles de résilience et de construire un cadre de référence pour l'échange autour de ces stratégies parmi les acteurs de la gestion urbaine (BARROCA *et al.*, 2012).

Dans cette optique double de recherche-action et de globale-pratique, l'approche conduite par le génie urbain permet une utilisation de la résilience à l'origine de cadres de conceptualisation, aussi nécessaires que fortement souhaités, de celle-ci. Une des constructions pionnières de tels cadres de conceptualisation rendue possible par le rapprochement du concept de résilience de celui du génie urbain est celle d'un **modèle synthétique** d'une connaissance fondée sur des savoirs et savoir-faire mise en avant par (BARROCA *et al.*, 2012). En effet, les auteurs démontrent que, sur le thème de la résilience de la ville face au risque inondation, le concept de résilience associe trois critères complémentaires que sont la résilience fonctionnelle, la résilience corrélative et la résilience territoriale/organisationnelle, revus à quatre (BARROCA et SERRE, 2013) par l'ajout d'une résilience cognitive. Ces quatre « piliers » de la résilience résument ainsi la structure synthétique d'une connaissance construite à partir de nombreuses sources liées à un risque particulier, celui de l'inondation en milieu urbain dans le cas présent. Le modèle est tout indiqué au vu du phénomène, mentionné plus haut, de recours croissant à la résilience dans l'action urbaine, car il favorise la construction d'un cadre d'analyse de la pertinence des règles existantes et contribue à orienter des stratégies de résilience. Enfin, le modèle est un argument supplémentaire au postulat selon lequel le manque de consensus théorique autour du concept de résilience peut être dépassé par sa mise en pratique car, toujours selon les auteurs, il vise à véhiculer une conceptualisation commune à travers laquelle il est possible de concevoir des références pour la médiation, l'échange et la description.

L'enrichissement est, de plus, mutuel entre le concept de résilience et le concept de génie urbain. En effet, l'approche systémique véhiculée par la résilience permet l'émergence d'un génie urbain qui ne se limite pas aux développements techniques comme le génie civil urbain. La logique de résilience donne au génie urbain la possibilité de dépasser sa définition historique en cherchant à analyser de manière intégrée le rôle des réseaux, des services, des projets et des acteurs dans l'aménagement durable de la ville (TOUBIN *et al.*, 2013) afin de contribuer à la modernisation des pratiques en génie urbain (BARROCA et SERRE, 2013).

Par conséquent, c'est par l'intermédiaire de modèles, en tant qu'abstraction qui simplifie le système réel étudié (COQUILLARD et HILL, 1997) à partir d'une synthèse d'éléments de connaissance concernant ce système (JØRGENSEN, 2012) que l'opérationnalisation de la résilience semble pouvoir être possible. Or, les modèles, tremplins vers une mise en action de la résilience, se multiplient (cf. 1.2.1)

depuis ces dernières années. En effet, ces modèles qu'ils soient nommés « référentiel », « structure », « *framework* » ou « cadre » dans la littérature scientifique, ont communément l'objectif de dissocier la résilience en critères complémentaires, en capacités fondamentales, en caractéristiques essentielles ou bien en étapes d'analyse. Cette multiplication de modèles conceptuels de la résilience peut être positive en offrant des modèles complémentaires dans leurs éléments respectifs d'étude et cohérents dans leurs enjeux. Mais, si ces modèles peuvent être vus comme dit précédemment comme un moyen de dépasser l'absence de consensus définitionnel sur le concept théorique de résilience par son opérationnalisation dans l'action urbaine, leur multiplication peut aussi avoir pour effet d'amoindrir leur pertinence et, finalement, générer plus de confusions voire de contradictions que de connaissances. Dans ce dernier cas, le risque est que leur intérêt devienne inexistant puisque finalement la situation de flou théorique enveloppant le concept n'aura généré qu'une situation de flou pratique (Figure 1.2).

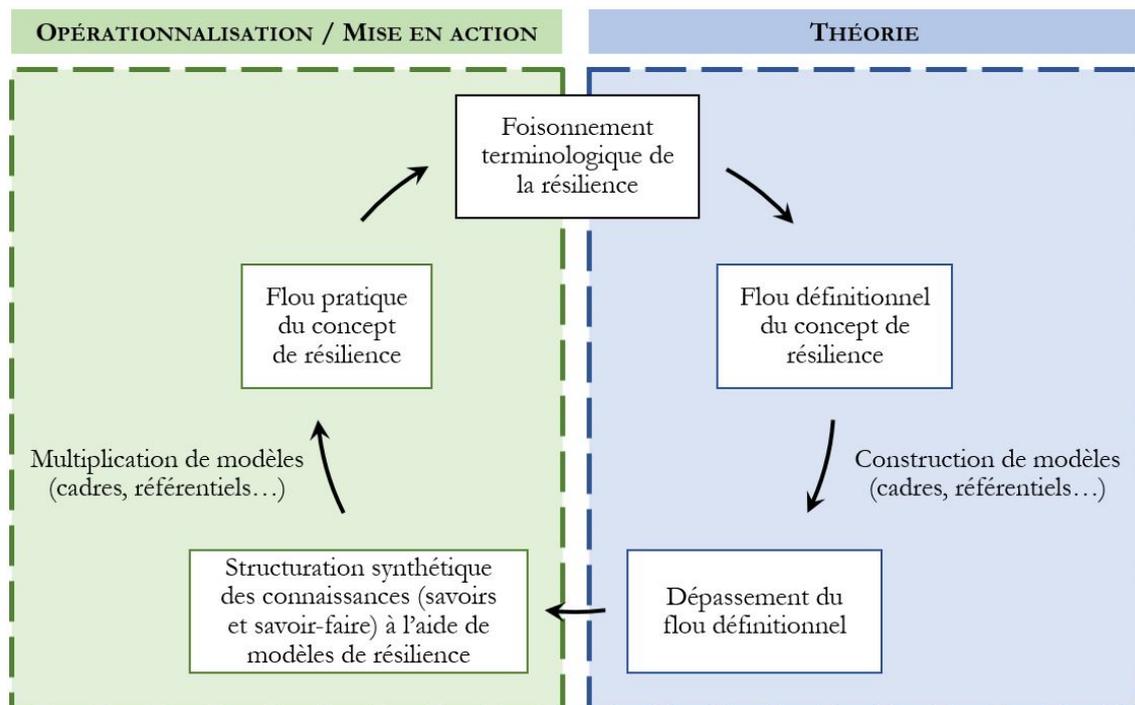


FIGURE 1.2 – Représentation du risque de flou pratique du concept de résilience suite à la multiplication de modèles, cadres et référentiels de résilience (source : auteur)

Finalement, le génie urbain fournit le cadre pour élaborer des modèles de résilience souhaités par les praticiens de la ville. Ces modèles de résilience sont nécessaires afin de décrire ce concept de façon opérationnelle. La résilience urbaine, c'est-à-dire le concept de résilience appliqué au génie urbain, dépasse son statut de concept pour devenir **concept-outil**¹⁵ de gestion des risques urbains et en particulier ceux impactant les systèmes techniques. Les modèles dominants de résilience par lesquels celle-ci devient concept-outil requièrent un passage en revue pour en identifier les spécificités et les limites, et une confrontation pour en déterminer les apports mutuels.

15. La notion de « concept-outil » est indiquée dans ce travail de recherche pour mettre en avant plusieurs éléments. Premièrement, elle indique que le concept de résilience est traité dans cette thèse avec une volonté claire de le rendre opérationnel c'est-à-dire comme un instrument d'aide à la réflexion et à la décision dans les projets urbains. Deuxièmement, les pratiques de conception urbaine démontrent un usage déjà existant de la résilience sans que le concept ne bénéficie à bien des égards de définition unique. Le concept de résilience apparaît donc dans les faits suffisamment explicite malgré ses flous définitionnels pour se traduire dans la pratique comme un instrument pour l'action urbaine. Ce transfert progressif de la théorie à la pratique lui confère donc un statut de concept-outil.

Synthèse

La résilience a fait l'objet de très importantes évolutions dans le temps et dans l'espace au point d'être devenue un concept fondamental dans de nombreux courants scientifiques et techniques. Cette utilisation prolifique et concomitante du concept n'en a pas garanti pour autant un usage identique. Passer de la théorie à l'application pratique du concept apparaît comme pertinent pour dépasser cette situation de multiplicité, et donc de flou, définitionnelle. En particulier, le génie urbain est un des domaines dans lequel l'application de la résilience fait l'objet de nombreux travaux depuis les deux dernières décennies. Dans ce cadre, seule la construction de modèles conceptuels solides de représentation de la démarche de résilience en génie urbain peut permettre sa mise en action.

1.2 Spécificités et confrontation des modèles dominants de résilience

Il s'agit ici d'examiner un à un les modèles conceptuels dominants dans la littérature scientifique récente de la résilience. Ces modèles étudient la résilience de systèmes techniques faisant principalement face à des perturbations d'origine naturelle, qu'elles se réalisent sur des temps courts comme les aléas naturels ou sur des temps longs comme le changement climatique. Pour cela, ces référentiels, structures, cadres, « *frameworks* » et « méthodologies » repris ici sous le terme de **modèle** présentent tous l'objectif identique de dissocier la résilience que ce soit en critères complémentaires, en capacités fondamentales, en caractéristiques essentielles ou bien en étapes d'analyse. Ces modèles, parfois spécifiques et parfois globaux, peuvent même jusqu'à constituer un modèle pour l'élaboration non pas de systèmes résilients mais de ville résiliente¹⁶.

Des travaux de synthèse de tels modèles de résilience existent et regroupent les développements les plus récents en la matière (VUGRIN *et al.*, 2010; SCHIPPER et LANGSTON, 2015; FRANKENBERGER *et al.*, 2014; BROOKS *et al.*, 2014; CONSTAS *et al.*, 2014); certains des auteurs indiquent d'ailleurs qu'il existe plus d'une quarantaine de modèles qui prédominent actuellement (BAHADUR *et al.*, 2015). Cette abondance offre une gamme de modèles conceptuels de résilience très large (CUTTER *et al.*, 2014) : ceux qui définissent la résilience comme un ensemble de capacités permises par un fonctionnement en réseau des systèmes; ceux qui considèrent que les fondements d'un modèle se basent sur un ensemble de capitaux (social, économique, culturel) c'est-à-dire des connaissances et savoir-faire pour promouvoir la résilience; et, enfin, ceux qui envisagent la résilience comme un ensemble de caractéristiques, d'attributs, d'atouts que présentent certains types de systèmes tels que les infrastructures, l'économie, les institutions. Dès lors, ces nombreux modèles conceptuels composent désormais un paysage (CUTTER, 2014) de méthodes, de cadres et de pratiques au service de l'évaluation de la résilience.

L'objet de cette section n'est pas de reprendre les nombreuses et très complètes synthèses de modèles de résilience pour y ajouter des modèles qui n'y sont pas. Il s'agit plutôt de mettre en exergue ceux dont les considérations théoriques et pratiques sont les plus proches de ces travaux de recherche sur la résilience des systèmes de transport guidé comme exemple particulier de systèmes techniques urbains. Les modèles dominants de résilience de systèmes sont développés selon trois axes relatifs à leurs enjeux :

1. les modèles visant à construire une **métrique** de la résilience, en l'évaluant grâce à l'élaboration de **capacités**, d'**indicateurs** ou de **critères**;
2. les modèles consistant à définir un **cadre général** de la résilience de façon à la structurer en différentes **dimensions** complémentaires, en thématiques;
3. les modèles spécifiant la résilience selon des **étapes d'analyse**, c'est-à-dire selon une procédure universelle pour l'étudier.

16. cf. "The City Resilient Framework" développé par ARUP et la Fondation Rockefeller dans le cadre du projet des 100 villes résilientes (100 Resilient Cities) : <http://www.100resilientcities.org>

1.2.1 Présentation des modèles

1.2.1.1 Behind the Barriers : A Resilience Conceptual Model (BARROCA et SERRE, 2013)

Ce modèle correspond à une structuration synthétique de la résilience en génie urbain. Les auteurs indiquent également que ce modèle peut contribuer à moderniser les savoirs et pratiques en génie urbain. Le modèle, introduit partiellement plus haut (cf. 1.1.2.2.2), dissocie, sous l'angle de la résilience de la ville face au risque inondation, le concept de résilience en quatre critères complémentaires que sont la résilience cognitive, la résilience fonctionnelle, la résilience corrélative et la résilience organisationnelle (Figure 1.3).

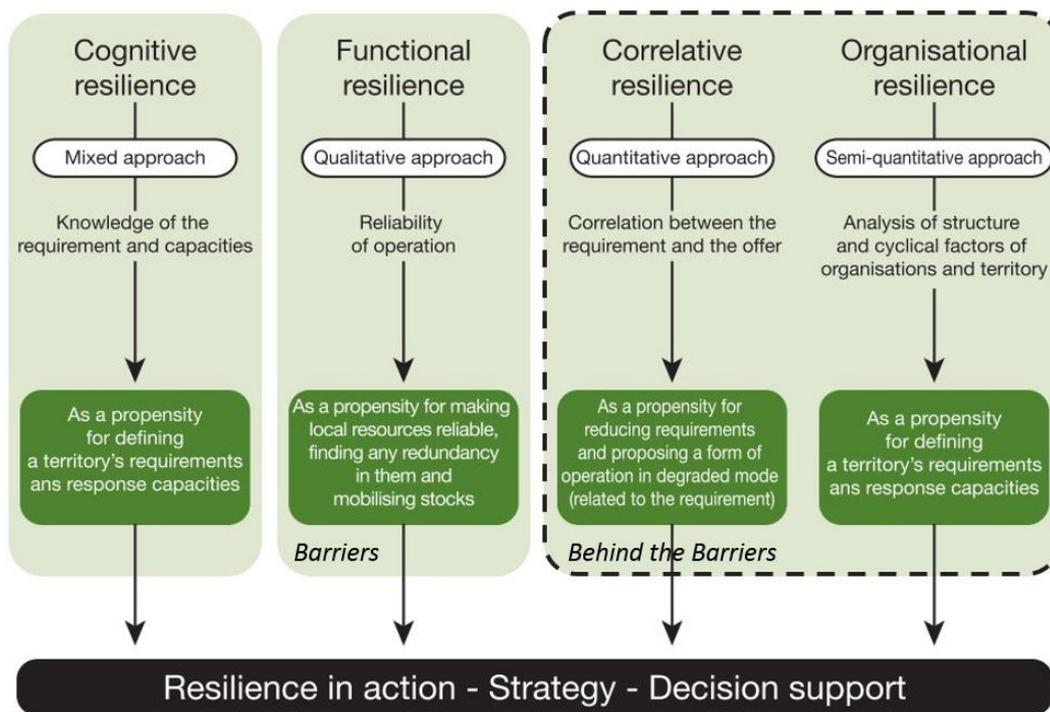


FIGURE 1.3 – Modèle conceptuel « Behind the Barriers » (BARROCA et SERRE, 2013)

La résilience *cognitive* se définit comme l'ensemble des processus qui se rapportent à la fonction de connaissance du risque : mémoire du risque, perception ou attention au risque ou encore identification, acquisition et traitement des informations en lien avec le risque. Les auteurs, à partir des travaux de (BERAUD, 2013), mettent en avant cette dimension cognitive de la résilience au travers de l'exemple de la gestion des déchets produits lorsqu'une ville est touchée par une inondation. En effet, pour pouvoir anticiper la gestion des déchets post-inondation, l'estimation des quantités et de la nature des déchets produits est un préalable nécessaire et ce, à plusieurs niveaux : envisager l'ampleur de la tâche, déterminer les moyens matériels et humains, assurer une gestion respectueuse de l'environnement.

La résilience *fonctionnelle* regroupe les enjeux de fiabilisation des systèmes techniques urbains considérés comme des infrastructures critiques (YUSTA *et al.*, 2011; O'ROURKE, 2007). Pour cela, la résilience fonctionnelle se base notamment sur des méthodes issues de la Sûreté de Fonctionnement, considérée comme la science des défaillances, incluant leur connaissance, leur évaluation, leur prévision et leur maîtrise (TALON *et al.*, 2009). La fiabilisation des réseaux techniques se base sur trois leviers d'action : le maillage important, la résistance des composants et la capacité du système à trou-

ver des modes de fonctionnement dégradé assurant un service partiel. C'est à partir de cette idéologie de maîtrise des risques qui consiste à améliorer la fiabilité des systèmes techniques critiques notamment en améliorant leur résistance face aux risques que les auteurs parlent de « barrières », au-delà desquelles d'autres modes de résilience entrent en action.

La résilience *corrélative* se base sur des enjeux d'adaptation des systèmes et promeut, comme son nom l'indique, une corrélation acceptable entre le service qu'est capable de fournir un système technique et l'usage qui en est fait par la ville, et cela, à tous les temps du risque. Cette résilience exprime donc la capacité à agir sur la demande afin de la corrélérer au service dégradé existant. Adapter, ainsi, la demande vis-à-vis de l'offre disponible.

Enfin, la résilience *organisationnelle* se base sur la capacité de l'organisation territoriale à favoriser la récupération consécutive à des dommages, en particulier pour les systèmes techniques. La résilience organisationnelle, nommée également *territoriale*, exprime donc la capacité pour des conditions locales ou territoires locaux à mobiliser des conditions générales ou territoires plus larges, dans la phase de post-crise. Elle est donc liée à la solidarité entre les acteurs locaux des communes voisines de la zone impactée par le risque, à l'organisation territoriale, aux aspects contractuels existants liant les communes, etc.

1.2.1.2 DS3 : « Spatial Decision Support System » (LHOMME *et al.*, 2010)

Le modèle DS3 initié par (LHOMME *et al.*, 2010) et formalisé par (LHOMME, 2012) repose sur la définition de trois capacités primordiales pour étudier la résilience de réseaux techniques tels que les systèmes de transport guidé. Ces capacités sont mises en exergue à partir de la définition prise par les auteurs à propos de la résilience, définition admise et reprise dans cette thèse : la résilience est la capacité d'un système à absorber une perturbation et à récupérer ses fonctions à la suite de celle-ci. Ce triptyque est le suivant (Figure 1.4) :

- la capacité de *résistance* consiste à déterminer les endommagements matériels des réseaux consécutifs à un risque donné tel qu'une inondation. Plus un réseau est endommagé, plus celui-ci aura une probabilité forte de dysfonctionner et plus il sera difficile de le remettre en service. Il est alors pertinent d'analyser les effets de ces endommagements sur les réseaux afin d'identifier les parties des réseaux qui dysfonctionnent ;
- la capacité d'*absorption* correspond aux forces et aux faiblesses liées à la configuration du réseau, c'est-à-dire les alternatives que celui-ci peut présenter suite à la défaillance d'un ou plusieurs de ses composants. Cette capacité est très proche de celle également très mobilisée dans d'autres modèles (Bruneau et al. 2003) : la redondance ;
- la capacité de *récupération* représente le temps nécessaire à la remise en service de composants endommagés afin de retrouver un service normal, ce qui dépend alors de facteurs tels que l'accessibilité de ces composants vis-à-vis des services qui sont en charge de leur remise en état. La récupération n'est d'ailleurs pas synonyme d'un retour à l'état antérieur, mais davantage d'une récupération fonctionnelle des services redevenant opérationnels.

Ces trois capacités sont, de plus, interdépendantes, ce qui n'empêche cependant pas de les étudier par l'intermédiaire de méthodes différentes. Néanmoins, cette interdépendance, comme bien souvent dans le domaine de la gestion des risques affectant les systèmes techniques urbains, complique la production d'informations synthétiques (LHOMME, 2012, p. 123).

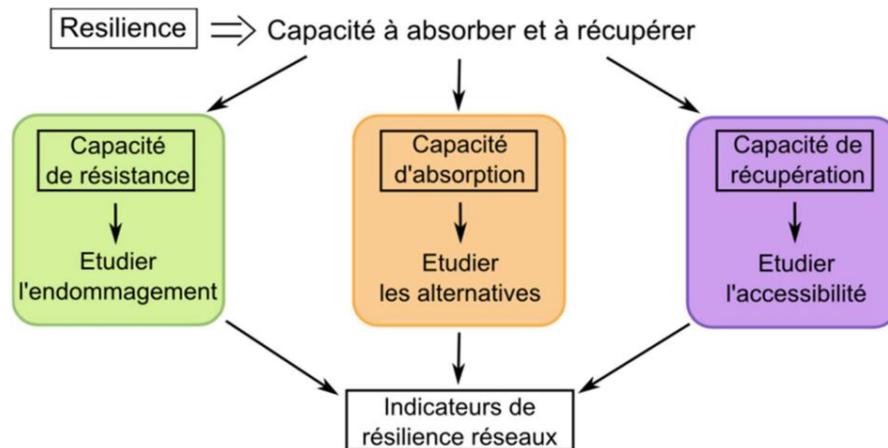


FIGURE 1.4 – Modèle conceptuel de résilience « DS3 » basé sur trois capacités pour étudier la résilience (LHOMME *et al.*, 2010; LHOMME, 2012, p. 122)

1.2.1.3 4R's Resilience Framework (BRUNEAU *et al.*, 2003)

Ce modèle théorique a été développé initialement pour évaluer quantitativement et améliorer la résilience des communautés face au risque sismique. Quelques précisions définitionnelles sont fournies par les auteurs sur les termes-clés de ce modèle.

Premièrement, le terme « *community* » s'apparente ici à un ensemble d'unités, d'éléments qui présentent une cohérence globale. Les auteurs parlent ainsi de « *community's infrastructure* » pour désigner les systèmes techniques critiques urbains tels que les réseaux de distribution d'eau potable, d'énergie... et utilisent également le terme de « *community* » pour désigner des unités sociales (« *social units*») c'est-à-dire des groupes de personnes, des populations. Par ailleurs, au-delà de ce modèle de résilience, le terme de communauté est très ambigu car il peut tout aussi bien faire référence à une unité écologique qu'à un groupe social (REGHEZZA-ZITT, 2015, p. 216) et est souvent complété par des qualificatifs. Cela donne alors lieu, par exemple, au concept de « communauté durable » (*sustainable community*) largement prôné dans le plan national de renouvellement urbain de 2003 en Angleterre et renvoyant ici fortement à l'idée de cohésion sociale en créant « *un lien solide et durable entre les individus* » (BEUCHER, 2008, p. 123) ou bien au concept de « communauté de danger » révélant une réalité mondiale d'exposition des humains à des risques globaux (REGHEZZA-ZITT, 2015). En revanche, malgré l'ambiguïté du terme, les liens communautaires sont définis comme « *de véritables forces pour mettre en œuvre des actions collectives de réponse à une crise* » (MAGNAN, 2010) et promus aujourd'hui par la plupart des grandes agences internationales (RENET, 2011) afin de valoriser l'implication des citoyens dans le processus de prévention avant une crise et de reconstruction après une crise.

Deuxièmement, la résilience des communautés face au risque sismique (« *community seismic resilience* ») est définie ordinairement par leur capacité à réduire les risques, contenir les impacts des catastrophes lorsqu'elles surviennent et à mettre en œuvre des plans de reconstruction de façon à minimiser les perturbations sociales et réduire les effets de futurs séismes¹⁷. L'amélioration de la résilience des communautés face au risque sismique se mesure donc en termes de réduction de pertes humaines, de blessés et de pertes économiques.

17. "Community seismic resilience is defined as the ability of social units (e.g., organizations, communities) to mitigate hazards, contain the effects of disasters when they occur, and carry out recovery activities in ways that minimize social disruption and mitigate the effects of future earthquakes."

Selon (BRUNEAU *et al.*, 2003), le modèle de résilience des communautés comporte quatre dimensions :

- une dimension *technique* (T) pour définir la capacité des systèmes physiques (sous-systèmes, composants interconnectés. . .) à assurer leurs fonctions au niveau souhaité, lorsqu'ils sont soumis à un risque sismique ;
- une dimension *organisationnelle* (O) se référant à la capacité des organisations en charge de la gestion des systèmes techniques critiques et de la gestion de crise à contribuer à l'amélioration des quatre critères de résilience définis ci-dessous ;
- une dimension *sociale* (S) qui consiste en des mesures spécifiquement conçues pour minimiser l'atteinte des communautés et des administrations lorsque les services critiques sont impactés par des séismes ;
- une dimension *économique* (E) qui se rapporte à la capacité à réduire les pertes économiques directes et indirectes suite à un risque sismique.

Les dimensions technique et organisationnelle se rapportent aux communautés d'infrastructures tandis que les dimensions sociale et économique se rapportent aux communautés d'individus.

Ces quatre dimensions sont quantifiables. Pour cela, les auteurs identifient quatre critères de performance (« *performance criteria* ») permettant d'évaluer les quatre dimensions fondamentales de résilience d'une communauté :

- *robustness* (robustesse)¹⁸ : capacité de systèmes à résister à un niveau donné de contrainte ou de demande sans subir de dégradation matérielle ou fonctionnelle ;
- *redundancy* (redondance)¹⁹ : évalue dans quelle mesure des éléments sont substituables afin de satisfaire les exigences de fonctionnement du système global, dans le cas d'une perturbation ou d'une perte de fonctionnalité ;
- *resourcefulness* (capacité à mobiliser des ressources)²⁰ : capacité à identifier les problèmes, établir des priorités, mobiliser des ressources (monétaires, humaines, physiques, technologiques, informationnelles) lorsque le système est menacé par un risque de perturbation ;
- *rapidity* (rapidité)²¹ : capacité à répondre aux priorités et à atteindre les objectifs, dans un délai convenable, de limitation des pertes et d'évitement de futures perturbations.

Ces quatre critères permettent d'obtenir une évaluation générale de la résilience d'une communauté face au risque sismique au travers de la grandeur $Q(t)$ que les auteurs définissent comme la qualité de service d'une infrastructure au sens de la performance qu'elle est capable d'assurer, 100 % signifiant aucune dégradation du service fourni et 0 % signifiant que le service n'est plus du tout fourni. Cette grandeur est fonction du temps et indique donc la perte de fonctionnalité due aux dommages provoqués par un séisme à un instant donné, le processus de retour à un fonctionnement normal jusqu'à un retour à un fonctionnement nominal. Ces étapes relatant le fonctionnement d'un système en phase pré-aléa, per-aléa puis post-aléa sont schématisées sous forme de triangle de la résilience

18. "Strength, or the ability of elements, systems, and other units of analysis to withstand a given level of stress or demand without suffering degradation or loss of function."

19. "The extent to which elements, systems, or other units of analysis exist that are substitutable, i.e., capable of satisfying functional requirements in the event of disruption, degradation, or loss of functionality."

20. "The capacity to identify problems, establish priorities, and mobilize resources when conditions exist that threaten to disrupt some element, system, or other unit of analysis ; resourcefulness can be further conceptualized as consisting of the ability to apply material (i.e., monetary, physical, technological, and informational) and human resources to meet established priorities and achieve goals."

21. "The capacity to meet priorities and achieve goals in a timely manner in order to contain losses and avoid future disruption."

(Figure 1.5). Cette schématisation a le mérite de représenter clairement l'amplitude ou le degré de perturbation du système selon l'axe vertical et le temps de récupération selon l'axe horizontal (TOUBIN *et al.*, 2013), deux composantes essentielles dans l'étude de la résilience d'un système face à un risque.

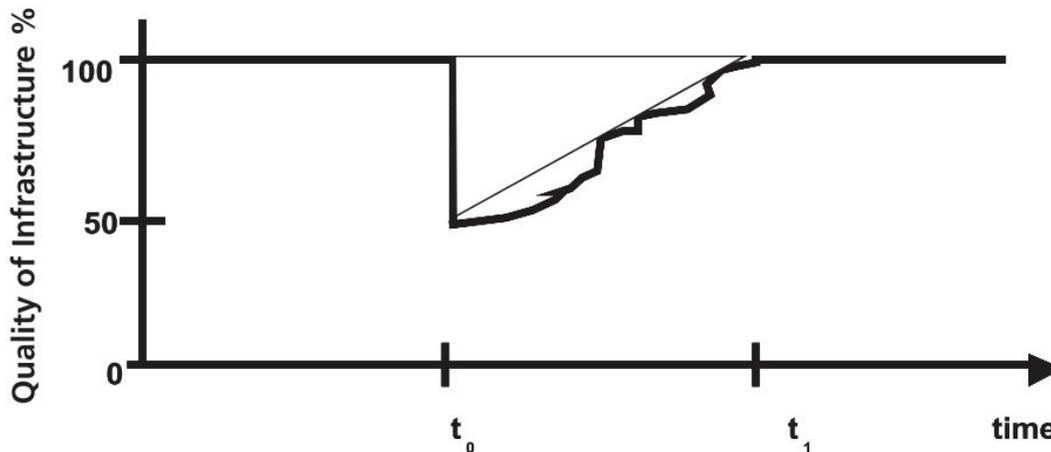


FIGURE 1.5 – Le triangle de la résilience (BRUNEAU *et al.*, 2003; TIERNEY et BRUNEAU, 2007)

Cette vision de la résilience dans ce modèle fait d'ailleurs écho à la logique du concept en économie. En effet, la résilience en économie présente un double aspect (ROSE, 2007) : un volet statique, centré sur la capacité d'un système à maintenir ses fonctions lorsqu'il subit un évènement perturbateur²² et un volet dynamique, centré sur la rapidité de ce système à retrouver un état d'équilibre. Le premier volet tend donc à se rapprocher du critère de robustesse et le second du critère de rapidité.

Des développements théoriques récents dans la même veine poursuivent cette logique de quantification de la résilience d'un système autour de ces « 4 R ». (CIMELLARO *et al.*, 2010a,b) approfondissent ces quatre critères grâce à des formulations mathématiques avancées leur permettant de comparer plusieurs systèmes techniques critiques que sont les équipements de santé selon des paramètres de fonctionnement du système : nombre de lits disponibles dans l'hôpital étudié, nombre de salles d'opérations... (D'LIMA et MEDDA, 2015) analysent la rapidité du système à retourner à son état d'équilibre et l'illustrent, par exemple, par l'étude d'un système de transport souterrain subissant un évènement perturbateur et par l'évolution de l'état du système perturbé jusqu'à un retour à un fonctionnement normal. Cette évolution est suivie par un indicateur de nombre de passagers transportés. (VUGRIN *et al.*, 2010) proposent un modèle triptyque : une définition de la résilience du système à partir là aussi de facteurs essentiels d'évaluation, une analyse quantitative de ces facteurs basée sur une étude en termes de coûts des dommages subis et des opérations de reconstruction, et enfin une analyse qualitative mettant en exergue les capacités de résilience des systèmes étudiés à partir des résultats de la précédente analyse quantitative. La seconde étape du modèle traitant des coûts des dommages et des coûts de reconstruction est particulièrement intéressante car elle donne un élément très parlant sur l'impact d'un risque pour la société. (CHANG et SHINOZUKA, 2004) construisent quant à eux un modèle capable d'évaluer la résilience de systèmes soumis au risque sismique selon leur robustesse et leur rapidité de retour à un fonctionnement normal comparativement à des valeurs seuils de robustesse et rapidité. La valeur seuil de robustesse correspond à une valeur maximale acceptable de dommages et la valeur seuil de rapidité correspond à une valeur maximale acceptable d'interruption du système. Appliqué à un système de distribution d'eau potable, ce modèle permet

22. "Static economic resilience as the ability of an entity or system to maintain function (e.g., continue producing) when shocked."

de déterminer l'impact d'opérations de rénovation sur la robustesse et la rapidité de remise en état du système. (REED *et al.*, 2009) étudient l'interdépendance à plusieurs degrés des infrastructures critiques urbaines entre elles et son effet sur leur résilience face à des événements d'origine naturelle. La résilience est ainsi développée par des constructions simples d'indicateurs du retour de ces systèmes à un fonctionnement normal afin de démontrer comment certains systèmes s'appuient pour cela sur d'autres, en particulier sur le réseau de distribution d'électricité.

Le « *4R's Resilience Framework* » a inspiré de nombreux autres modèles conceptuels visant à déterminer les dimensions essentielles de la résilience d'un système (TOSE) plutôt que d'en construire des critères de mesures (4 R). En particulier, ces modèles sont utilisés par des instances internationales. Par exemple, aux États-Unis, le *National Infrastructure Advisory Council* définit quatre caractéristiques de mesure de la résilience que sont la robustesse du système, sa capacité à mobiliser des ressources, sa rapidité à retrouver un état de fonctionnement normal et son adaptabilité (Figure 1.6). Le dernier critère d'adaptabilité, qui diffère du modèle 4R's, correspond aux moyens mis en œuvre pour apprendre des catastrophes passées : révisions des procédures d'urgence, utilisation de nouvelles technologies ou de nouveaux outils pour améliorer la robustesse du système, etc. (NIAC, 2010, p. 16). Ce critère entre en jeu dans l'élaboration d'une résilience de temps long du système, en particulier dans le cas où les événements perturbateurs sont amenés à se reproduire ou dans le cas où ils sont amenés à impacter le système sur une longue période.

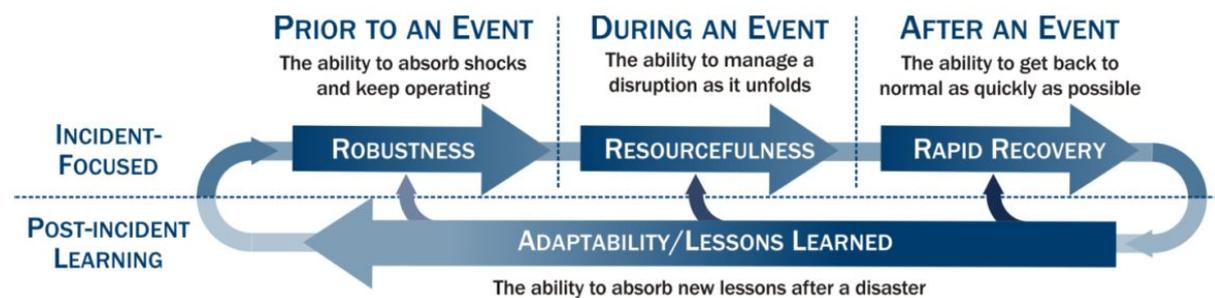


FIGURE 1.6 – Les étapes de la résilience dans le modèle élaboré par le National Infrastructure Advisory Council (NIAC, 2010, p. 17)

Autre exemple, au Canada, le *Victoria Transport Policy Institute* identifie également plusieurs dimensions similaires aux dimensions TOSE pour évaluer la résilience appliquée au domaine du transport (VTPI, 2016) : à un niveau *individuel*, faisant référence aux besoins des usagers en mobilité en toutes conditions ; à un niveau *communautaire*, indiquant l'avantage des systèmes de transport à fournir un service efficace et en toute sécurité aux personnes ayant un besoin particulier d'accessibilité ; au niveau de la *conception* du projet, c'est-à-dire que les systèmes de transport doivent permettre de faire face à une forte demande ou à des conditions imprévues ; à un niveau *économique*, mettant en avant les systèmes de transport comme réponse à la raréfaction et à l'augmentation des coûts de ressources telles que le pétrole ; et, à un niveau de *planification* stratégique urbaine, révélant le rôle des systèmes de transport dans l'atteinte des objectifs sur le long terme de durabilité urbaine.

1.2.1.4 Baseline Resilience Indicators for Communities (BRIC) (CUTTER *et al.*, 2014)

Ce modèle conceptuel se base sur un ensemble de 49 indicateurs multidimensionnels répartis à travers six dimensions ((i) dimensions sociale, (ii) économique, (iii) logement et infrastructure, (iv) institutionnelle, (v) communautés et (vi) environnementale) pour de l'aide à la décision dans un contexte

d'élaboration de politiques visant à améliorer la résilience de territoires (CUTTER *et al.*, 2014).

Cette métrique n'est pas spécifique à un aléa particulier mais vise plutôt à donner un aperçu de toutes les facettes d'une société qu'il est nécessaire d'intégrer pour en améliorer sa résilience. A partir de scores de résilience relatifs à chacune des six dimensions, il est possible de déterminer relativement des territoires plus ou moins résilients sur le plan économique, social, en termes de disponibilités des ressources. . . Ainsi, le modèle BRIC permet, d'une part, de cibler les territoires les moins résilients et nécessitant la mise en place de politiques spécifiques, et d'autre part, de vérifier par un recalcul des indicateurs, plusieurs années après, l'efficacité ou non de politiques d'amélioration de la résilience.

Ces indicateurs ont été appliqués aux Etats-Unis et permettent, sous forme de cartographies, de visualiser la résilience des territoires (Figure 1.7).

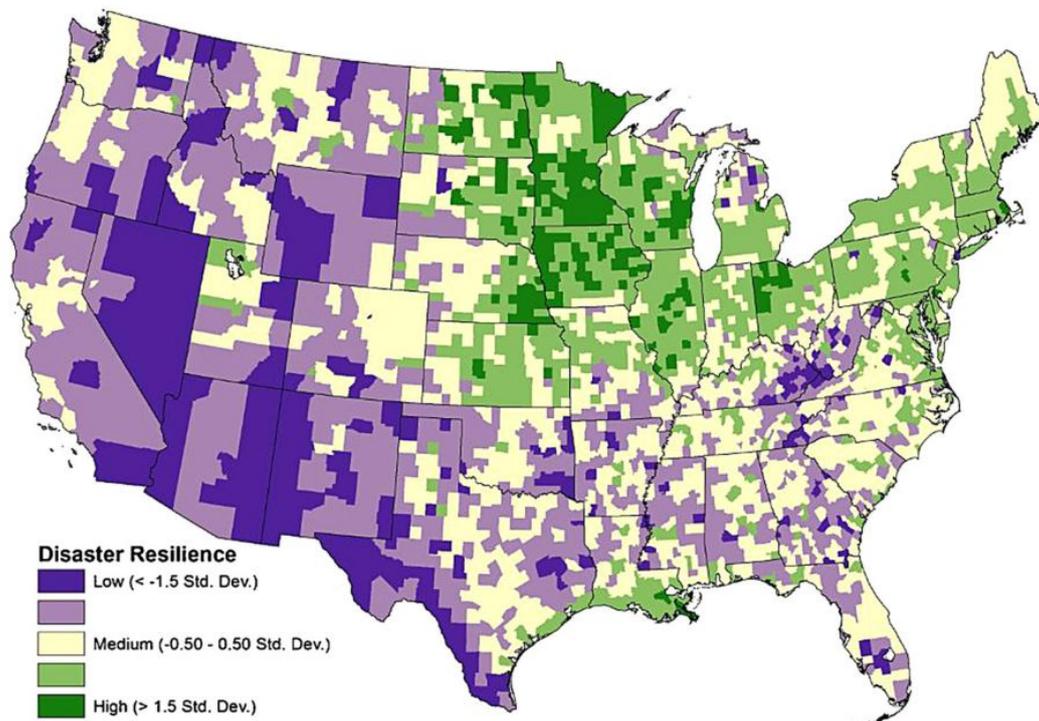


FIGURE 1.7 – Cartographie de l'indicateur de résilience construit à partir du modèle BRIC (CUTTER *et al.*, 2014)

1.2.1.5 PEOPLES Resilience Framework (RENSCHLER *et al.*, 2010)

A mi-chemin entre un modèle cadre de la résilience et un modèle de construction d'indicateurs, le modèle « PEOPLES » distingue sept dimensions constitutives de la résilience d'une communauté, considérée comme un système (GILBERT *et al.*, 2015), incluant chacune explicitement un indicateur d'évaluation. Ces sept dimensions sont les suivantes (RENSCHLER *et al.*, 2010) :

1. *Population and Demographics* : traite de la capacité des populations à résister à des aléas auxquels elles peuvent être régulièrement soumises ;
2. *Environmental/Ecosystem* : aborde la capacité des écosystèmes tels que la végétation à résister face à des aléas les mettant en péril ;
3. *Organized Governmental Services* : met en avant la capacité des services tels que les secours d'urgence, de protection ou de santé publique à réagir de façon adéquate suite à une crise ;
4. *Physical Infrastructure* : intègre les infrastructures critiques ainsi que les équipements publics ;

5. *Lifestyle and Community Competence* : caractérise la sensibilisation aux potentiels aléas, la solidarité des populations, l'entraide et leur capacité à la créativité dans des situations de crises ;
6. *Economic Development* : inclut le développement économique d'une communauté dans tout ce qui a trait à ses capacités de production de biens et de services ;
7. *Social-Cultural Capital* : intègre le capital socio-culturel au sens large d'une communauté, depuis le système éducatif, en passant par les communautés religieuses ou la vie associative.

Ce modèle est dans la continuité du 4R's *Resilience Framework* de (BRUNEAU *et al.*, 2003). Ces sept dimensions sont la base pour l'élaboration d'indicateurs qualitatifs et quantitatifs afin de mesurer dans le temps et dans l'espace la résilience des systèmes (Figure 1.8). La résilience est donc ici considérée comme une **grandeur dynamique** qui évolue **spatialement** et **temporellement**. Ce modèle prend également en compte les interdépendances qui existent entre ces sept dimensions. Sur le long terme, ce modèle a également pour objectif le développement d'outils pour de l'aide à la décision en termes d'aménagement urbain afin d'améliorer la résilience de ces sept communautés ou systèmes.

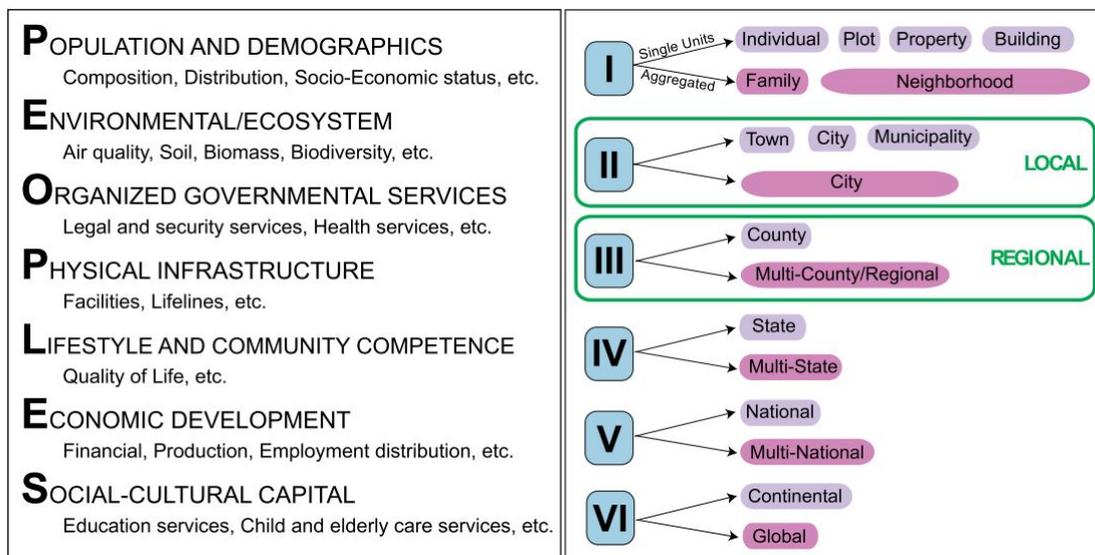


FIGURE 1.8 – Le PEOPLES Resilience Framework et les échelles géographiques associées (RENSCHLER *et al.*, 2010)

Finalement, le but de ce modèle est, d'une part, d'identifier les différentes dimensions de la résilience et d'en construire pour chacune des indicateurs-clés et, d'autre part, de pouvoir agréger ensuite les résultats de ces indicateurs afin de mesurer la résilience d'un système donné. Il s'apparente sans doute plus à une *check-list* des composantes qui forment la résilience d'une communauté et qu'il est indispensable de prendre en compte sous peine d'avoir une vision partielle et erronée plutôt qu'à un véritable cadre ou à de véritables indicateurs d'évaluation.

1.2.1.6 The City Resilient Framework (CRF) (ARUP, 2014)

Autre modèle lui aussi intermédiaire entre un modèle cadre de la résilience et un modèle composé d'indicateurs : le *City Resilient Framework* (CRF) développé par le bureau d'études britannique ARUP et avec le support de la Fondation Rockefeller. Ce modèle de résilience s'inscrit dans le cadre du réseau des « 100 Resilient Cities » qui permet aux villes membres de bénéficier d'accompagnements financier, technique et technologique afin d'analyser, planifier et mettre en œuvre une stratégie de résilience urbaine. En particulier, un *Chief Resilience Officer* est également nommé et financé par la

Fondation Rockefeller. Ses missions sont multiples et très vastes²³ : (i) travailler de façon transversale avec tous les services municipaux afin d'améliorer la communication interne en réduisant la complexité propre aux échanges dans de telles structures ; (ii) réunir une grande variété d'acteurs concernés afin de les sensibiliser aux défis que représente la construction de la résilience de la ville ; (iii) proposer et animer une stratégie globale de résilience afin de donner une unité à la démarche ; (iv) façonner une réflexion de sorte que toute décision de gouvernance soit prise dans une optique holistique, intégrée, et susceptible de générer des synergies. Bien que les missions d'un *Chief Resilience Officer* soient floues, son positionnement haut placé au sein des instances de gouvernements municipaux, c'est-à-dire à un niveau exécutif et non pas uniquement de conseil, apparaît comme très prometteur pour mettre en œuvre de façon opérationnelle la résilience.

Le modèle développé est qualitatif. D'une part, il structure le concept de résilience urbaine en formulant sept propriétés de systèmes urbains résilients, non sans rappeler des qualités partagées par d'autres modèles (ARUP, 2014) :

- *Robustesse* : les systèmes robustes incluent les équipements physiques dont la conception est telle qu'elle leur permet de résister aux impacts d'aléas sans dommage ou perte de fonction en anticipant les défaillances potentielles, en mettant en place des valeurs seuils révélatrices de défaillances imminentes et de défaillances par effet en cascade ;
- *Réflexivité* : les systèmes réflexifs ont cette capacité à intégrer les incertitudes inhérentes au monde moderne et en croissance continue dans la mesure où des mécanismes adaptés leur permettent d'évoluer constamment, de modifier leurs normes de fonctionnement à partir d'indicateurs révélateurs de tendances de transformation. Ces systèmes ont donc une attitude proactive face aux changements et savent bénéficier des expériences passées dans leur processus constant d'apprentissage ;
- *Inclusivité* : les systèmes doivent être inclusifs en stimulant l'engagement général de toutes les parties prenantes, une culture du risque permanente et omniprésente, un sens de la solidarité entre tous afin de créer une vision commune et partagée de la résilience urbaine ;
- *Redondance* : les systèmes redondants possèdent des capacités de réserve dans leur fonctionnement nominal, c'est-à-dire que lorsqu'ils font face à des aléas ils sont capables de maintenir le service qu'ils fournissent par l'intermédiaire de nombreux canaux possibles ;
- *Intégration* : en lien avec le sens communautaire porté par la qualité d'inclusivité des systèmes, l'ensemble des systèmes urbains composant une ville résiliente sont également intégrés c'est-à-dire que chaque système doit bénéficier d'investissements suffisants sans privilège particulier et de façon proportionnée, afin de promouvoir leur réponse cohérente et collective en cas de perturbation subie par la ville ;
- Capacité à mobiliser des ressources : la « *resourcefulness* » des systèmes urbains se réfère à la capacité des individus et des institutions à déterminer rapidement des réponses afin d'assurer leurs besoins lorsque la ville subit une perturbation, c'est-à-dire que cette capacité inclut une certaine agilité dans la mobilisation et la coordination de moyens humains, physiques, financiers aptes à maintenir ou à rétablir un service urbain ;
- *Flexibilité* : proche de la réflexivité, la qualité de flexibilité des systèmes d'une ville résiliente renvoie moins à la prise en compte d'un monde caractérisé par le changement qu'à la facilité de faire évoluer concrètement les systèmes par l'introduction de nouvelles technologies, de nouvelles connaissances et de nouvelles formes de gestion et de pratiques inédites jusque-là.

23. <http://www.100resilientcities.org/blog/entry/what-is-a-chief-resilience-officer1>

D'autre part, en termes d'indicateurs, le modèle propose **douze indicateurs-clés** parmi **quatre catégories** : **(i)** les individus (*health and wellbeing*), **(ii)** l'organisation (*economy and society*), **(iii)** la connaissance (*leadership and strategy*) et **(iv)** le territoire (*infrastructure and environment*). Ces douze indicateurs-clés sont eux-mêmes divisés en 48 à 54 indicateurs élémentaires mesurés par 130 à 150 variables. Cette décomposition fine s'unifie donc dans le **modèle cadre** proposé par le CRF et permet d'évaluer les sept qualités d'une ville résiliente (Figure 1.9).

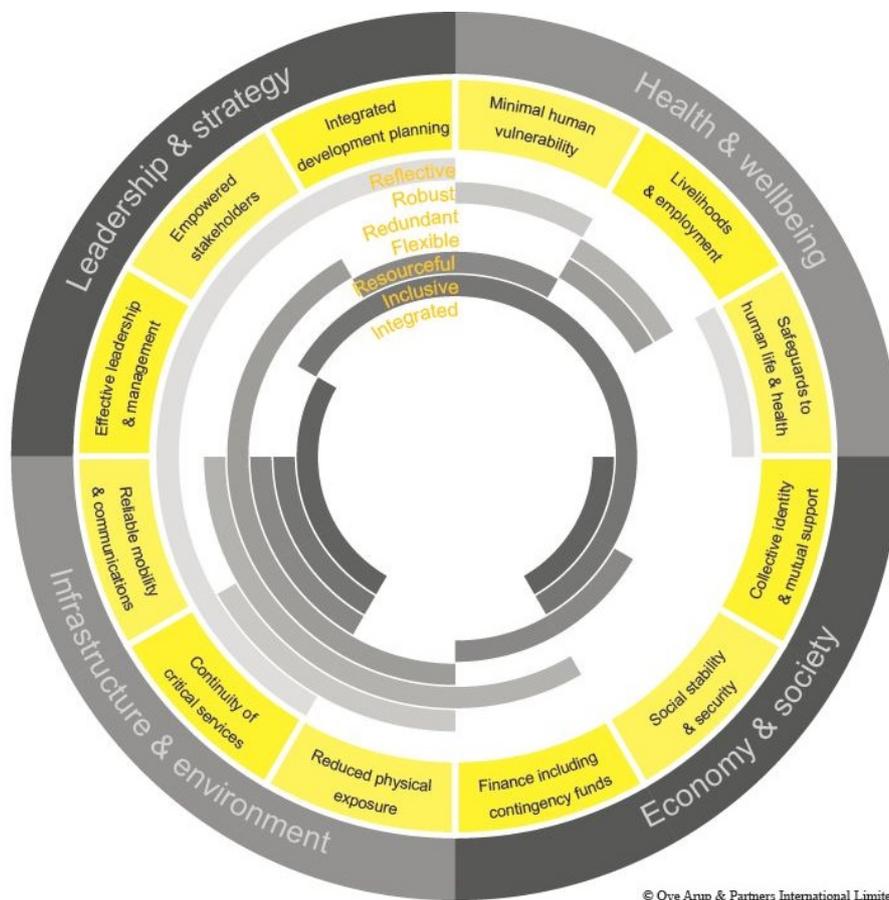


FIGURE 1.9 – Le *City Resilience Framework* composé de quatre catégories et de douze sous-catégories pour une évaluation de la résilience urbaine selon sept qualités (ARUP, 2014)

Le CRF a le mérite d'être exhaustif car il n'omet aucune dimension urbaine. L'ensemble des aspects propres à une ville sont contenus dans le modèle : humains, physiques, financiers, économiques, sociaux, environnementaux... Il s'appuie également sur des retours d'expériences précis et documentés de catastrophes passées ayant affecté des sociétés et au processus de reconstruction de celles-ci.

Dans la même veine existent d'autres modèles d'évaluation de la résilience d'une ville, de notoriété moindre que le CRF mais tout aussi reconnus. Le modèle conceptuel de (DA SILVA *et al.*, 2012) offre un modèle simplifié de la ville, considérée également comme un système, très proche du CRF pour étudier la résilience de dix villes d'Asie membres de l'*Asia Cities Climate Change Initiative Resilience Network* (ACCCRN). La résilience de ces villes face au changement climatique est étudiée au travers de sept caractéristiques permettant de décrire les systèmes urbains et les services urbains qu'ils fournissent à la fois comme base de l'activité économique et pour assurer les besoins des populations. Ces sept caractéristiques sont une première étape pour l'élaboration, ensuite, d'indicateurs de mesures non traités par (DA SILVA *et al.*, 2012).

Les sept caractéristiques sont : **(i)** flexibilité, **(ii)** redondance, **(iii)** capacité à mobiliser des ressources

(« *resourcefulness* »), (iv) capacité d'apprentissage, (v) dépendance aux écosystèmes locaux, (vi) capacité de réponse et (vii) une prédisposition à des « *safe failures* » (Figure 1.10). Les trois premières sont définies de façon similaire aux qualités du modèle CRF ; la capacité d'apprentissage est corrélée avec la qualité de réflexivité du modèle CRF et se réfère aux processus de prise en compte des impacts générés par des événements perturbateurs passés pour éviter qu'une même cause ne reproduise les mêmes effets ; la dépendance aux écosystèmes locaux traduit la juste nécessité des systèmes urbains en ressources naturelles et le lien du système urbain global à certains de ses systèmes tels que la production alimentaire ; la capacité de réponse est très proche de la qualité de flexibilité du modèle CRF ; et enfin, la notion de « *safe failures* » se rapporte à la capacité d'un système urbain résilient à subir une perturbation générale de façon progressive plutôt que soudaine dès lors qu'une partie du système dysfonctionne. Cette dernière caractéristique est à rapprocher à la fois d'une capacité de résistance qui permet d'encaisser un certain nombre de perturbations sans perturbation globale et d'une capacité d'absorption dans le sens où les impacts aux systèmes qui dépendent du système étudié sont limités.

Par ailleurs, l'interconnexion des systèmes urbains au sein du système ville est prise en compte afin de mettre en lumière les dépendances fonctionnelles qui existent entre eux.

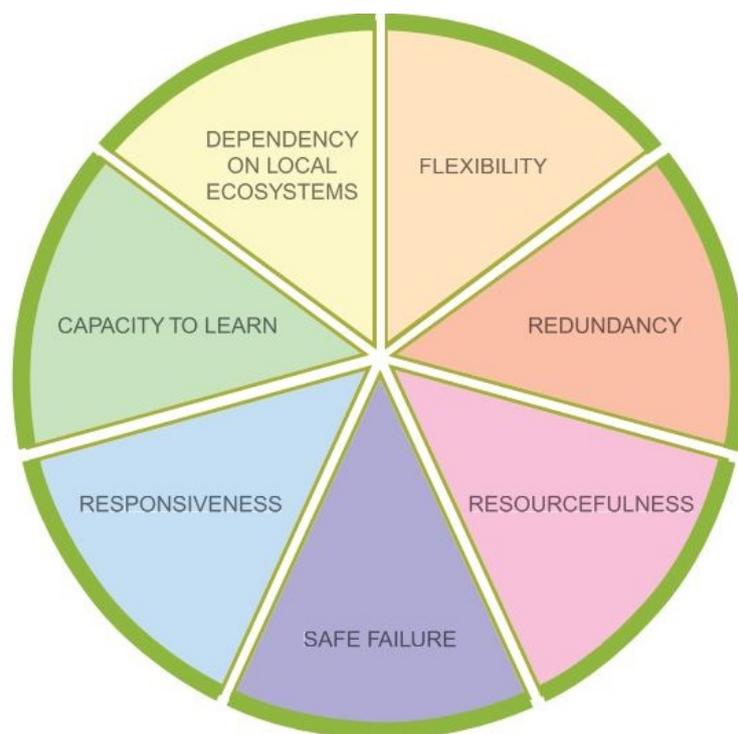


FIGURE 1.10 – Liste des caractéristiques de systèmes urbains résilients (DA SILVA *et al.*, 2012)

1.2.1.7 4A: Awareness, Allaviation, Avoidance, Assistance (ASHLEY *et al.*, 2010)

D'autres modèles, plutôt que de développer critères et indicateurs d'évaluation de la résilience d'un système soumis à un aléa donné, mettent en avant des capacités essentielles pour l'adaptation de ces systèmes. Dans ces approches, la résilience est alors un **cadre général** qui s'appuie sur un **ensemble d'activités thématiques** présentant chacune des programmes d'actions (SERRE, 2011, p. 20). C'est le cas de l'approche des 4 A, développée dans le cadre du projet européen *FloodResilienCity* (2007-

2012) (FLOODRESILIENTCITY, 2012)²⁴ où il est question de préparer la ville et de l'adapter aux risques d'inondation à travers des programmes déclinés en quatre thèmes (ASHLEY *et al.*, 2010) :

- *Awareness* : caractérise la sensibilisation au risque inondation et la mobilisation des acteurs au niveau institutionnel, au niveau des professionnels et au niveau des individus ;
- *Avoidance* : consiste à chercher à limiter les dommages et à faciliter un retour à un fonctionnement normal à travers la planification urbaine et l'adaptation des systèmes, des activités. . . ;
- *Alleviation* : réduire les dommages provoqués par les inondations grâce à des mesures structurelles et non structurelles ;
- *Assistance* : concerne la mise en place de procédures pour un retour facilité à un fonctionnement normal, tant en temps de crise qu'en préparation au risque redouté (Figure 1.11).

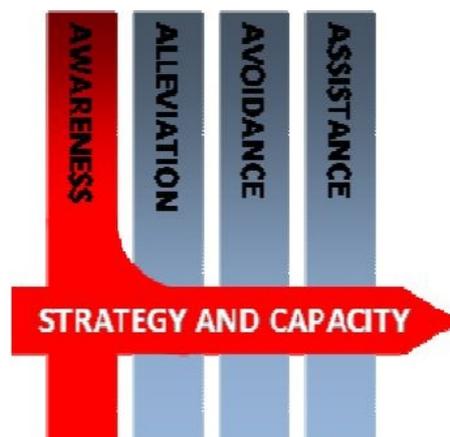


FIGURE 1.11 – L'approche intégrée de gestion du risque inondation proposée dans le cadre du projet *FloodResilientCity*

Cette approche fait écho au principe des 3 P de la Directive Inondation (COMMISSION EUROPÉENNE, 2007) qui oriente la gestion des risques d'inondation selon des activités de **protection** contre les inondations, de **prévention** des victimes et des dommages et de **préparation** à l'aide de mesures adaptées. D'autres cadres généraux de résilience existent à travers le monde en se basant sur une telle décomposition multidimensionnelle et regroupés sous la notion de *Multi-Layered Safety framework* (RIJKE *et al.*, 2014), notamment en Belgique (CRABBÉ et MEES, 2013) et aux Pays-Bas (ASHLEY *et al.*, 2010).

1.2.1.8 Approche « identité » : résilience d'un objet face à un évènement et à des échelles données (GERSONIUS *et al.*, 2012)

Enfin, d'autres modèles s'attachent à identifier et à formaliser des étapes d'analyse de la résilience d'un système face à un évènement donné.

C'est le cas du modèle conceptuel de (GERSONIUS *et al.*, 2012) basé sur une approche identitaire de la résilience des systèmes techniques urbains face au risque inondation. Cette approche « identité » repose sur l'identification, comme son nom l'indique, des **paramètres de résilience** afin de la **définir** tout d'abord et de l'**évaluer** ensuite : la résilience de quel **objet** ? La résilience face à quel **évènement** ? La résilience à quelle **échelle temporelle et spatiale** ? (Figure 1.12)

24. *FloodResilientCity* (FRC) a permis aux autorités publiques de huit villes du nord-ouest de l'Europe de mieux faire face aux phénomènes d'inondations dans les zones urbaines. En effet, l'objet du projet FRC a été de développer des zones urbaines capables d'être résilientes face aux changements qui entraîneraient autrement un risque croissant d'inondation. L'EIVP a été l'unique établissement d'enseignement supérieur en France à participer à ce projet européen. Source :

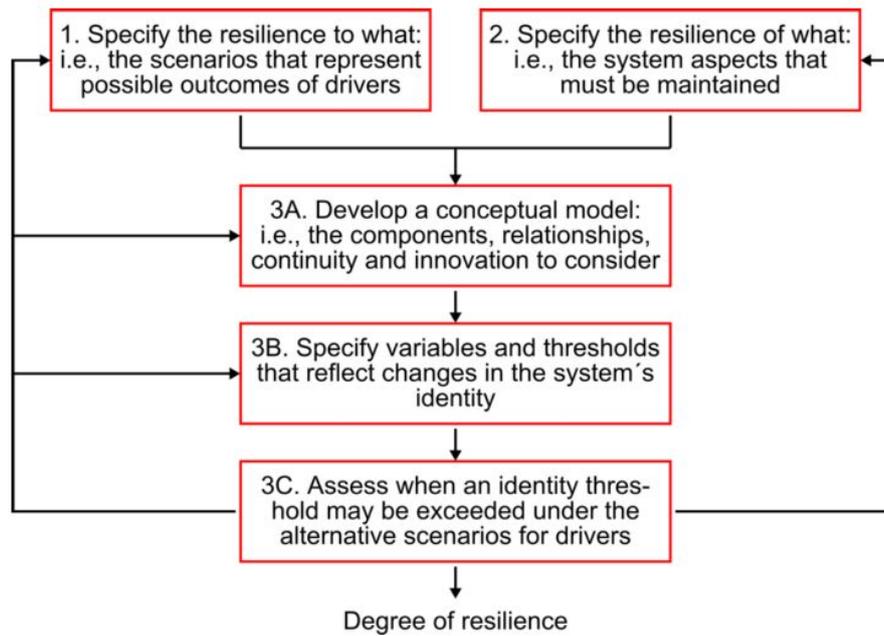


FIGURE 1.12 – Etapes successives de l’approche « identité » pour l’évaluation de la résilience d’un système (GERSONIUS *et al.*, 2012)

La première étape (1.) consiste à définir face à quoi la résilience du système est étudiée, c’est-à-dire face à quel évènement perturbateur susceptible d’engendrer un changement dans le fonctionnement du système. (GERSONIUS *et al.*, 2012) considère le changement climatique et les différents scénarios de celui-ci.

La seconde étape (2.) spécifie les caractéristiques du système faisant l’objet d’une analyse de résilience, avec en particulier une distinction entre sa résilience structurelle et sa résilience fonctionnelle, l’amélioration de la première ayant des effets sur la seconde.

Enfin, la troisième partie est à proprement parler le modèle conceptuel de résilience. En effet, à partir d’une analyse des composants du système, des relations fonctionnelles que ceux-ci entretiennent les uns avec les autres et des organisations qui les gèrent et les maintiennent (3A.), l’objectif est de déterminer les valeurs seuils liées au système qui démontrent un changement dans son identité (3B.). Ce changement provient de l’évènement perturbateur auquel le système fait face et qui peut alors impliquer que le système n’assure plus un niveau de performance acceptable : son « identité » a changé. Une fois que cette valeur seuil, nommée « *adaptation tipping point (ATP)* » (KWADIJK *et al.*, 2010), est identifiée, une dernière étape (3C.) est nécessaire pour déterminer l’impact de cette modification d’identité sur le niveau de résilience du système.

Dans le cas d’une étude de la résilience face au changement climatique, si le système parvient à maintenir son identité selon plusieurs scénarios alors il est considéré qu’il possède un haut degré de résilience face à ce changement. Les auteurs soulignent, à juste titre, que la détermination des ATP d’un système est complexe, car les évènements perturbateurs auxquels le système fait face sont changeants, en constante évolution dans le temps et soumis à un degré d’incertitude très important, particulièrement lorsqu’il s’agit du phénomène de changement climatique.

Finalement, les ATP permettent d’exprimer, d’une part, les scénarios d’intensité du changement climatique de telle façon que les stratégies de gestion des risques pour les systèmes urbains deviendront

inopérantes, et d'autre part, les options d'adaptation structurelles et non structurelles du système afin que sa performance perdure en repoussant les ATP critiques.

1.2.1.9 Plateforme logicielle HAZUR®²⁵

HAZUR® est une plateforme logicielle qui consiste à accompagner les villes dans la conception, la mise en œuvre et la gestion de stratégies d'amélioration de la résilience urbaine.

Cette plateforme logicielle se base sur une méthodologie en deux étapes : l'**évaluation** et la **gestion**. Premièrement, l'évaluation (*HAZUR Assessment*) consiste en une analyse des interdépendances qui existent entre les différents services urbains. L'objectif de cette identification est d'évaluer les potentielles perturbations par effet en cascade permises par ce réseau d'interdépendances, qui peuvent survenir lors de l'occurrence d'un aléa. Cette évaluation permet donc essentiellement de mettre en lumière certaines interdépendances fortes pour lesquelles des stratégies spécifiques doivent être mises en place afin de limiter les perturbations en chaîne qu'elles pourraient générer. Deuxièmement, la gestion (*HAZUR Management*) consiste à fournir de la connaissance susceptible d'être une aide lors de situation de crise. Cette connaissance peut-être par exemple apportée par des simulations de situations de crise afin de préparer au mieux l'ensemble des acteurs. Elle peut également être apportée par un suivi en temps réel (dispositifs de *monitoring*) de l'état de fonctionnement des services urbains. Ces deux étapes sont donc complémentaires car la seconde se base sur les résultats de la première.

Des certifications sont également délivrées dans le cadre de HAZUR® afin de former les acteurs de la gouvernance urbaine à l'utilisation de la plateforme logicielle et plus généralement à la mise en place d'une démarche de résilience urbaine.

Enfin, plusieurs villes telles que Barcelone utilisent actuellement HAZUR® pour l'évaluation et la gestion de la résilience urbaine.

1.2.1.10 Cadre d'évaluation de la *Resilience Alliance* (THE RESILIENCE ALLIANCE, 2016)

Fondée par C.S. Holling en 1999, la *Resilience Alliance* est un réseau international pluridisciplinaire de chercheurs sur le concept de résilience des systèmes socio-écologiques et des nombreux concepts qui l'entourent tels que l'adaptation, la transformation ou encore la *panarchy* (THE RESILIENCE ALLIANCE, 2016). La *Resilience Alliance* promeut la mobilisation du concept de résilience et offre un grand nombre de cas d'étude de la résilience de systèmes socio-écologiques face à différentes perturbations telles que le changement climatique par exemple.

La *Resilience Alliance* définit un cadre pour l'évaluation du degré de résilience d'un système à partir d'une modélisation conceptuelle préalable du système lui-même : composants, ressources utilisées et produites, fonctions, questionnaires... Le principe général du cadre d'évaluation est de déterminer des **seuils** qui représentent un **changement d'état du système** impliquant une **amélioration** ou, au contraire, une **dégradation** de sa résilience. Les résultats de cette évaluation offrent ainsi l'opportunité de développer des stratégies d'amélioration de la résilience des systèmes face à des événements perturbateurs connus ou bien exceptionnels.

25. <http://opticits.com/#hazur>

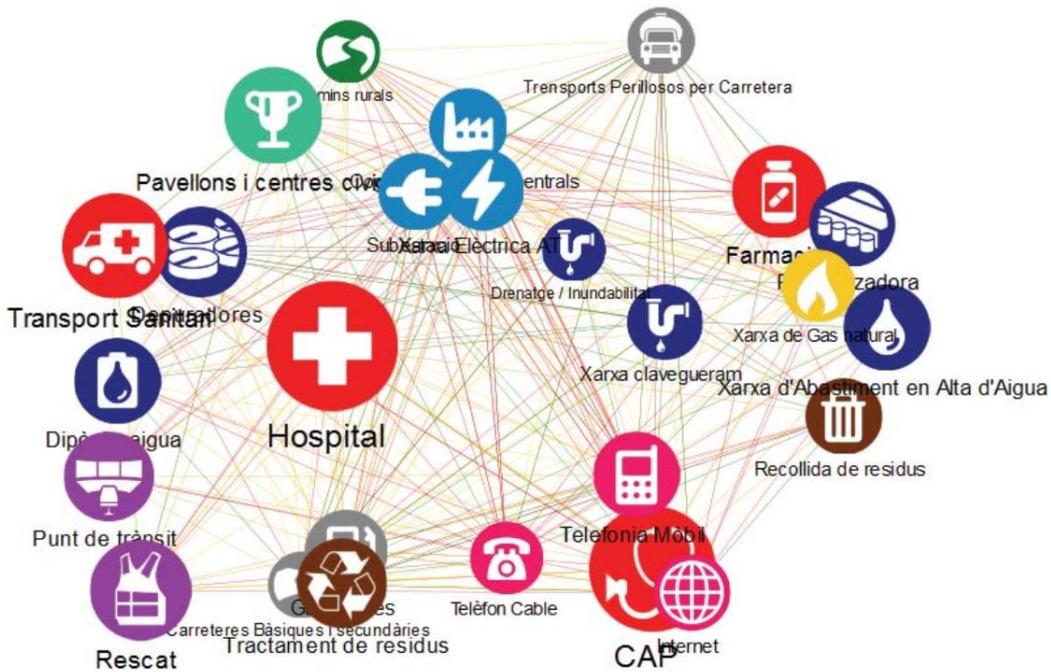


FIGURE 1.13 – Exemple d'utilisation de la plateforme logicielle HAZUR® pour cartographier les interdépendances existantes entre des services urbains (CHELLERI et FONTANALS, 2014)

Ce cadre d'évaluation de la résilience est profondément systémique, orienté pour un usage opérationnel par les praticiens (« *a workbook for practitioners* ») (THE RESILIENCE ALLIANCE, 2010) et se base sur une **analyse en cinq étapes** formant un cycle (Figure 1.14) :

1. la *description* du système : résilience de quel objet, face à quel évènement et à quelles échelles ;
2. la *dynamique* du système : quels états de fonctionnement celui-ci présente, comment se déroule la transition d'un état à un autre et par quelles variables se caractérise-t-elle ;
3. les *interactions* du système : en interne et en externe avec son environnement, notamment entre échelles spatiales ;
4. la *gouvernance* du système : par quelles institutions, pour quels usages, dans quel contexte socio-économique ;
5. les *actions* à mener sur le système : synthèse des résultats, construction de stratégies adaptées au système étudié et mise en action de celles-ci.

Le cadre est **itératif**, chaque étape devant être réalisée avant de passer à la suivante et **réflexif**, c'est-à-dire qu'à chaque étape il est possible de revenir aux précédentes pour les modifier et ce dans un processus continu de révision et d'amélioration.

D'autres modèles itératifs en plusieurs étapes successives existent, notamment basés sur un processus algorithmique alimentant des métriques à l'échelle d'un système (OUYANG *et al.*, 2012) ou alors à l'échelle de plusieurs systèmes afin de prendre en compte leurs interdépendances et les effets induits de propagation des risques (HERNANDEZ-FAJARDO et DUEÑAS-OSORIO, 2011).

1.2.1.11 Resilience engineering (HOLLNAGEL *et al.*, 2006)

La *resilience engineering* n'est pas à proprement parler un modèle de résilience mais une nouvelle façon de penser la sûreté des systèmes (DEKKER *et al.*, 2008). L'« ingénierie de la résilience » est considérée comme un paradigme de gestion des risques dans lequel la complexité de l'environnement des

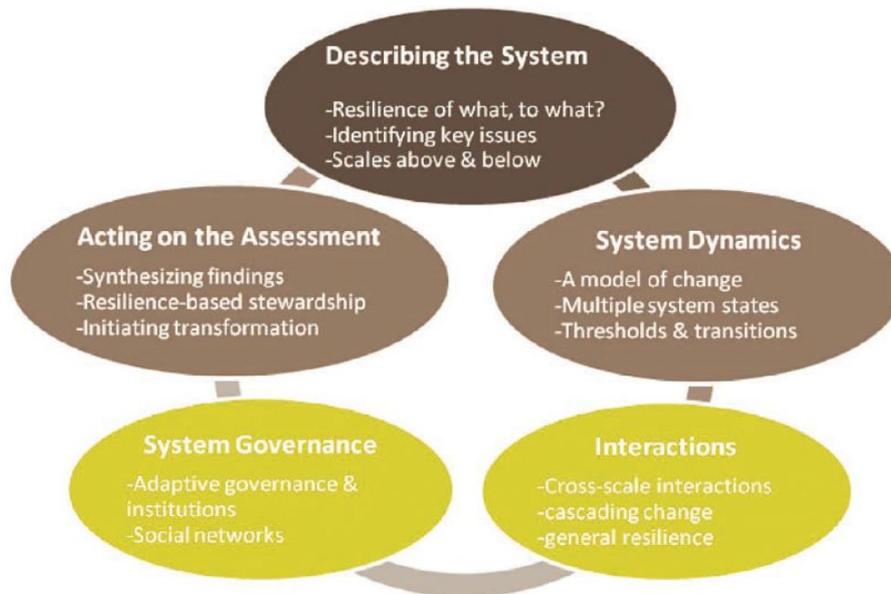


FIGURE 1.14 – Cadre d'évaluation de la résilience d'un système construit par la Resilience Alliance (THE RESILIENCE ALLIANCE, 2010)

systèmes est prise en compte (LHOMME, 2012, p. 73). Ce paradigme est en rupture avec la gestion classique ou traditionnelle des risques qui affectent un système car celle-ci met ordinairement des normes et des programmes en face de chaque cause éventuelle de dysfonctionnements (HOLLNAGEL *et al.*, 2006). Les accidents, dans la gestion traditionnelle des risques, sont ainsi vus comme la conclusion d'une séquence d'évènements, impliquant parfois des erreurs humaines initiales ou intermédiaires; *a contrario*, dans la gestion des risques portée par la *resilience engineering*, la vision est plus systémique dans la mesure où les accidents apparaissent de façon complexe à partir des multiples activités humaines permises par un contexte technique et organisationnel donné (DEKKER *et al.*, 2008, p. 6). Les dysfonctionnements pouvant mener à des accidents ne sont dès lors pas considérés comme des insuffisances d'un système par rapport à un fonctionnement nominal mais plutôt comme un signal d'adaptations nécessaires pour faire face à un environnement qui se complexifie (DEKKER *et al.*, 2008, p. 43).

La *resilience engineering* offre une réponse à la gestion de risques qui émergent d'un environnement changeant, incertain et porté sur la complexité. Cette complexité n'est, cependant, pas le propre de l'environnement des systèmes urbains, mais caractérise aussi les systèmes eux-mêmes. La complexité des systèmes eux-mêmes ne peut que croître dans les sociétés contemporaines globalement orientées vers le progrès car notamment fortement enclines à l'introduction de nouvelles technologies pour y parvenir. Or, dans tout système, la mise en place de technologies nouvelles implique inévitablement de façon plus ou moins subtile des changements au sein des relations et interconnexions qui maintiennent justement ce système comme un ensemble²⁶ (DEKKER, 2012).

Dans ce contexte, l'ensemble des éléments qui composent un système, devenu de fait complexe, sont difficilement échangeables et ont un fonctionnement qui peut même être mal compris (DEKKER, 2012) car multiple et dont chacun des modes « émerge » à partir de multiples relations bilatérales et interactions plus ou moins importantes entre parties (WOODS, 1988; CILLIERS, 2005). Les systèmes composant les sociétés actuelles sont donc complexes car intrinsèquement ouverts, formant même des « super systèmes », aux frontières floues et inscrits dans des processus de changements per-

26. "The introduction of new technology changes, in many subtle and less subtle ways, the relationships and interconnections that hold a complex system together."

manents générés par les échanges avec leur environnement (HEYLIGHEN *et al.*, 2007) devenu moins stable, moins prédictible et plus complexe (DEKKER *et al.*, 2008, p. 4).

Selon le paradigme de la *resilience engineering*, le système a donc une **attitude proactive** face aux risques auxquels il fait face. Pour être résilient, il doit en effet être en mesure de ne plus nécessairement respecter les consignes prévues lorsque survient un risque à partir du moment où il a été reconnu que son environnement a changé (HOLLNAGEL *et al.*, 2006). Finalement, le système devient lui-même acteur de la maîtrise de ses risques.

Dans ce cadre, un système est résilient s'il est capable **d'ajuster son propre fonctionnement avant, pendant ou après des changements ou des événements perturbateurs de façon à pouvoir poursuivre ses missions après une défaillance**, un incident majeur ou bien dans le cas d'une perturbation continue²⁷ (DEKKER *et al.*, 2008, p. 53). A partir de cette définition, quatre « pierres angulaires » de la résilience sont identifiées comme **capacités essentielles** d'un système résilient (Figure 1.15) :

- la capacité à savoir à quoi **s'attendre** (*what to expect*) : comprendre les menaces actuelles et anticiper leur potentielle transformation dans le temps en risques ;
- la capacité à savoir quoi **observer** (*what to look for*) : surveiller, au sein du système et dans son environnement, ce qui pourrait devenir une menace pour son fonctionnement ;
- la capacité à savoir quoi **faire** (*what to do*) : faire face aux dysfonctionnements ordinaires en adaptant le fonctionnement nominal ;
- la capacité à savoir **ce qu'il s'est passé** (*what has happened*) : apprendre des risques passés et de leurs conséquences de façon adéquate.

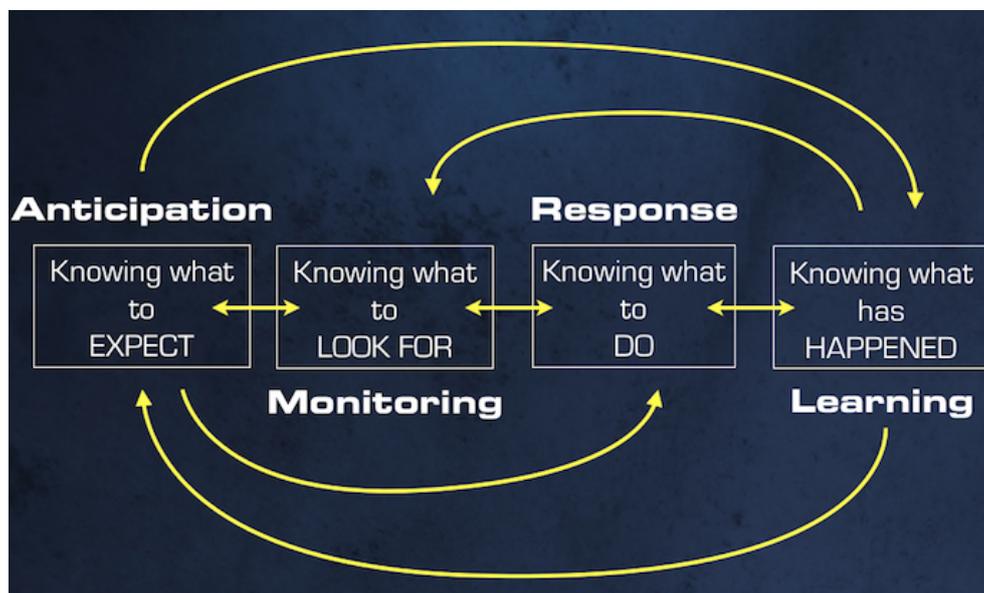


FIGURE 1.15 – Les 4 pierres angulaires de la *resilience engineering*, leurs interactions et influences (source : John Allspaw)

Finalement, la *resilience engineering* s'est très clairement imposée actuellement dans le paysage de la gestion et de la maîtrise des risques. Depuis la première conférence internationale en 2004²⁸, l'intérêt pour la *resilience engineering* n'a cessé de croître, d'une part, grâce aux apports théoriques de celle-ci,

27. "A resilient system is able effectively to adjust its functioning prior to, during, or following changes and disturbances, so that it can continue to perform as required after a disruption or a major mishap, and in the presence of continuous stresses."

28. Cette première conférence a permis d'initier des symposiums internationaux réguliers : en 2006, en 2008, en 2011, en 2013, en 2015 et le prochain mi-2017.

et d'autre part, en raison de l'incapacité des approches existantes à analyser les systèmes complexes (RIGHI *et al.*, 2015).

De plus, le paradigme de l'« ingénierie de la résilience » engendre d'autres concepts proches tels que l'« **ingénierie de l'urgence** », notamment dans le domaine de la sûreté nucléaire. L'ingénierie de l'urgence constitue un ensemble de stratégies aptes à répondre à des situations extrêmes « hors scénarios », c'est-à-dire en dehors des cadres et référentiels classiques de sûreté, afin de renforcer la capacité d'un système à **entrer en résilience** dans la période post-accidentelle (GUARNIERI et TRAVADEL, 2014).

1.2.2 Bilan des modèles dominants de résilience

L'élaboration de modèles conceptuels de résilience semble être passée sur le devant de la scène scientifique par rapport à la confrontation des multiples acceptions du concept.

Ces modèles conceptuels sont capitaux car leur développement permet à la résilience de dépasser son statut de concept pour devenir **concept-outil**. Ils permettent alors de recentrer le travail scientifique sur la manière de concrétiser le concept, en laissant de côté les réflexions polémiques autour de la construction de son modèle définitionnel car « *ce qui importe alors, ce n'est pas que le modèle soit rigoureux, mais qu'il soit opératoire* » (TISSERON, 2014). Dans le cas de la résilience urbaine, le concept devient concept-outil pour la gestion des risques urbains et en particulier ceux impactant les systèmes techniques.

Les modèles dominants de résilience développés précédemment peuvent être classés selon trois catégories relatives à leurs finalités (Tableau 1.2) : les modèles visant à construire une **métrique** de la résilience, à partir de capacités, d'indicateurs ou de critères quantitatifs ; les modèles définissant un **cadre général** de la résilience de façon à la structurer en différentes pierres angulaires, piliers, dimensions complémentaires ; et, les modèles déclinant la résilience selon des **étapes d'analyse** du système étudié.

Ces catégories sont plus des **zones de transition** entre modèles qui, le plus souvent, sont à mi-chemin entre deux types que des **délimitations** imperméables pour distinguer strictement les types de modèles de résilience.

1.2.3 Apports et complémentarités des modèles présentés

Plusieurs points communs peuvent être dressés parmi l'ensemble des modèles présentés (Tableau 1.2).

Les modèles conceptuels de définition opérationnelle de la résilience se répondent plus qu'ils ne s'opposent et peuvent en fait offrir des évaluations de la résilience selon plusieurs phases, comme dans le cas des modèles conceptuels DS3 et « *Behind the Barriers* ». En effet, dans le cas des systèmes de transport, ces deux modèles sont complémentaires en ce sens qu'ils ne s'emploient pas aux mêmes phases d'un projet (GONZVA *et al.*, 2014b). D'une part, le modèle DS3 s'intéresse aux capacités intrinsèques du système à résister, à absorber et récupérer suite à l'occurrence d'un aléa (cf. 1.2.1.2). Il permet donc la détermination du niveau de dégradation du système post-aléa, et en corollaire, la caractérisation des apports ou non de stratégies de protection du système face à l'aléa. Le modèle DS3 contribue donc, en phase d'exploitation du système et pendant tout son cycle de vie, à évaluer

TABLEAU 1.2 – Catégorisation des modèles dominants de résilience

Catégories	Enjeux	Exemples de modèles										
		BB (1)	DS3 (2)	4R's (3)	BRIC (4)	PEOPLES (5)	CRF (6)	4A (7)	Identity (8)	HAZUR (9)	R.A. (10)	R.E. (11)
Critère, indicateur, métrique	Mesure de la résilience		✓	✓	✓	✓	✓					
Cadre général	Structuration de la résilience	✓	✓	✓		✓	✓	✓		✓	✓	✓
Etapes d'analyse	Procédure commune d'évaluation de la résilience								✓	✓	✓	
Modèle spécifique	Application à un système		✓						✓	✓		✓
Modèle holistique	Application globale	✓		✓	✓	✓	✓			✓		
		(1)(BARROCA et SERRE, 2013)	(2)(LHOMME et al., 2010)					(3)(BRUNEAU et al., 2003)				
		(4)(CUTTER et al., 2014)	(5)(RENSCHLER et al., 2010)					(6)(ARUP, 2014)				
		(7)(ASHLEY et al., 2010)	(8)(GERSONIUS et al., 2012)					(9)(CHELLERI et FONTANALS, 2014)				
		(10)Resilience Alliance (THE RESILIENCE ALLIANCE, 2010)	(11)Resilience Engineering (HOLLNAGEL et al., 2006)									

l'aptitude du système à faire face à des aléas. D'autre part, le modèle « *Behind the Barriers* », en simplifiant le système réel étudié et en structurant le concept de résilience en quatre axes (cf. 1.2.1.1), offre une connaissance du système en lien avec ses capacités intrinsèques de résilience, son organisation, ses ressources extérieures. Le modèle contribue notamment à orienter la réflexion sur des stratégies de résilience pour la protection des systèmes : possibilités de réduire le besoin, de déterminer des ressources... Il peut donc être mobilisable en phase de conception du projet de transport.

Par conséquent, **les modèles de résilience sont loin d'être exclusifs les uns des autres** ; il s'agit plutôt de les utiliser **conjointement** et sur des **phases spécifiques du cycle de vie** d'un système technique.

De plus, le modèle d'identité de la résilience (cf. 1.2.1.8), basé notamment sur l'identification d'*Adaptation Tipping Points*, présente des similitudes avec le modèle conceptuel « *Behind the Barriers* ». Si la résilience corrélative, un des quatre piliers du modèle conceptuel « *Behind the Barriers* » (cf. 1.2.1.1), est importante pour que la corrélation entre service et usage reste acceptable à tous les temps du risque, c'est parce qu'il y a une acceptation juste dans le fait que le service et l'usage forment un ensemble dont les parties se correspondent mutuellement et dont les changements pour l'un impliquent des changements pour l'autre (BARROCA et SERRE, 2013). Cette synergie s'exprime également dans le modèle de (GERSONIUS et al., 2012) basé sur une détermination de valeurs seuils ou *adaptation tipping points* de changement d'identité du système étudié. Ce modèle conceptuel lie, en effet, le risque de réduction de sa performance voire d'arrêt du service qu'il fournit avec l'acceptabilité de cette réduction en termes d'usage. Dépendances d'usages et acceptabilité d'une diminution de service par la société sont également traitées conjointement dans ce modèle identitaire. Ainsi, la définition et l'identification des ATP alimentent le contenu de la résilience corrélative.

Finalement, le risque décrit plus haut (cf. 1.1.2.2.2) que la multiplication des modèles conceptuels

visant à l'opérationnalisation de la résilience ne favorise qu'une transition malheureuse entre un flou définitionnel du concept de résilience et un flou pratique de celui-ci semble pouvoir être nuancé. Ces modèles, en effet, ne s'excluent pas les uns les autres. L'intérêt ne réside donc pas dans une recherche d'union de l'ensemble des modèles ou de construction de « méta-modèles », d'ailleurs très utilisés dans un contexte de résilience pour décrire les processus de changements d'un système (CUMMING et COLLIER, 2005). L'important est de déterminer dans quel **contexte**, à quelle **phase** d'un projet urbain et pour répondre à quels **objectifs** un ou plusieurs modèles conceptuels de résilience peuvent et doivent être utilisés.

La situation de multiplicité des acceptions du concept de résilience est donc bien différente de celle de multiplicité des modèles de mise en action du concept. Si dans le premier cas la coexistence de définitions tantôt complémentaires tantôt antinomiques nécessite une prise de position rigoureuse pour mener toute étude de résilience d'un système, dans le second cas la concomitance de modèles opérationnels est possible et même source de connaissances croisées (Figure 1.16).

Ainsi, cette diversité des modèles opérationnels offre une pluralité heureuse au concept de résilience lorsqu'il est mobilisé pour l'étude d'un système.

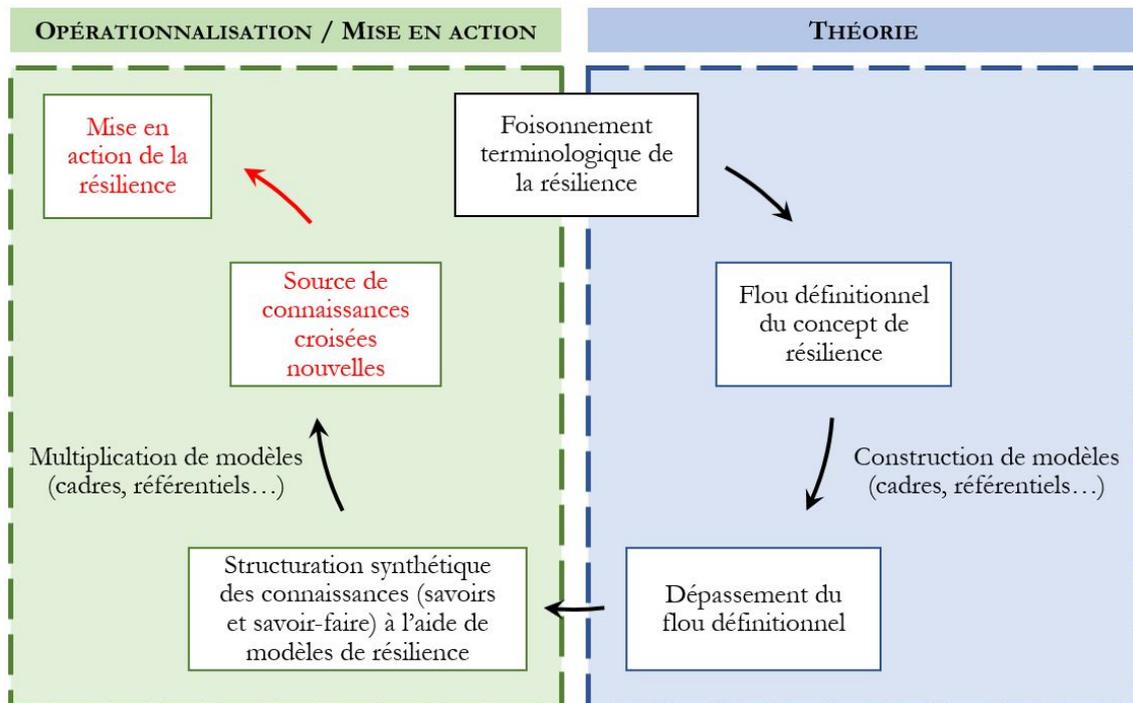


FIGURE 1.16 – Représentation de l'apport de connaissances nouvelles pour la mise en action du concept de résilience grâce à la multiplicité de modèles, cadres et référentiels de résilience (source : auteur)

1.2.4 Singularités et manquements des modèles présentés

Bien que ces modèles, chacun à leur façon, offrent des possibilités pertinentes et efficaces d'opérationnalisation de la résilience à partir, pour la plupart, de cas d'application réels, un certain nombre de limites restent présentes.

Premièrement, ces modèles proposent des critères, en particulier les critères qualitatifs, **subjectifs** (HUGHES et HEALY, 2014, p. 34). Cette subjectivité se traduit usuellement par des échelles d'évaluation de la résilience qui sont propres à une modélisation elle-même spécifique d'un système donné.

Elle se traduit aussi par des valeurs de critère global obtenues à partir de critères individuels pondérés par des coefficients définis selon les préférences de l'utilisateur (HUGHES et HEALY, 2014). Le recours à la logique floue, en tant que raisonnement basé justement sur la prise en compte de la subjectivité et de l'imprécision, dans la construction d'indicateurs pour l'analyse de la résilience de systèmes techniques face à différents types d'aléas apparaît donc naturel (JASSBI *et al.*, 2015; AZADEH *et al.*, 2014; ALEKSIC *et al.*, 2013). Cette subjectivité n'est pas un problème en tant que tel mais nécessite au préalable que les résultats obtenus pour tous critères soient issus de calculs traçables et partagés par les acteurs concernés par le système étudié et l'analyse menée (HUGHES et HEALY, 2014, p. 82).

Deuxièmement, l'interrogation quant à la réelle **corrélation** des métriques construites avec la résilience est de rigueur. Si certains indicateurs ont une influence directe, c'est-à-dire de cause à effet, et estimable sur la résilience, pour d'autres indicateurs cette influence est beaucoup moins appréhendable et plus hypothétique (NIST, 2015, p. 230).

Troisièmement, les modèles présentés ont tendance à occulter un volet important dans leur conceptualisation de la résilience : la **vulnérabilité**. Sans chercher à les opposer, des modèles formalisent plutôt l'imbrication qui existe entre vulnérabilité et résilience en soulignant les interactions entre les deux concepts. C'est le cas, par exemple, du modèle de « **vulnérabilité résilience** » de (PROVITOLLO, 2009; PROVITOLLO et REGHEZZA-ZITT, 2015). En effet, ce modèle intègre la fragilité d'un système et, parallèlement, « *met en lumière l'ensemble des potentialités, capacités et réactions qui vont lui permettre, malgré cette fragilité, de faire face aux événements mineurs comme extrêmes* » (PROVITOLLO et REGHEZZA-ZITT, 2015). Ce modèle n'est pas pertinent dans le cadre de cette recherche car il permet de mettre en avant les effets positifs et négatifs de la résilience alors que le présent travail vise avant tout à proposer et évaluer des stratégies d'amélioration de la résilience.

Par ailleurs, toutes métriques de la résilience se doivent d'être précises, fiables, claires, flexibles, accessibles et pratiques (NIST, 2015, p. 230) et, pour ce faire, quelques critères essentiels doivent être respectés dans leur élaboration dont notamment (CUTTER, 2014) : **clarté** et **transparence** dans leurs constructions, **lien avec les ambitions** de développement du territoire étudié, **simplicité**, **réplicabilité** à d'autres territoires, **unicité** même dans le cas d'aléas différents et **utilisation** quelle que soit l'échelle spatiale du système étudié. Enfin, de façon générale, tous ces modèles permettent (HUGHES et HEALY, 2014, p. 35) :

- soit d'évaluer les dysfonctionnements en termes de niveau de service fourni suite à l'occurrence d'un événement perturbateur ;
- soit d'évaluer le temps de retour à un niveau de service acceptable du système ;
- soit de comparer la capacité de récupération d'un système ayant fait l'objet d'une stratégie particulière pour améliorer sa résilience par rapport au même système sans stratégie.

Pour l'évaluation de la résilience de systèmes de transport ferroviaire comme routier, les modèles conceptuels basés sur des indicateurs quantitatifs ou des critères de performance semblent être les plus pertinents. Pour les systèmes de transport routier, le degré de résilience se détermine par exemple à partir d'indicateurs tels que la perte d'accès à certaines zones par les usagers et les services de secours, l'impact économique suite à la perturbation voire à la fermeture de certains axes routiers ou encore l'existence de routes alternatives (BRABHARAN, 2006). D'autres nombreux exemples d'évaluation de la résilience de systèmes de transport routier à partir d'indicateurs existent (HEASLIP *et al.*, 2009; MURRAY-TUITE, 2006; OMER *et al.*, 2013).

Quelques traits communs sont mis en avant parmi ces modèles de résilience appliqués aux systèmes

de transport (REGGIANI *et al.*, 2015) :

- la mesure de la résilience est majoritairement appliquée à des simulations numériques sur des systèmes fictifs et à des cas d'études sur des systèmes réels ;
- les concepts fréquemment associés au concept de résilience sont la **robustesse** et la **fiabilité** de ces systèmes ;
- d'autres associations conceptuelles naissantes avec le concept de résilience apparaissent : le concept de **connectivité**, défini comme la capacité d'un système spatial à maintenir et à créer une connexion entre plusieurs de ses éléments et celui d'**accessibilité**, défini comme la capacité des individus à atteindre des services, des biens, des activités par l'usage des transports (LITMAN, 2016).

Néanmoins, les modèles évaluant la résilience à partir de capacités complémentaires semblent aussi tout à fait opportuns pour des applications aux systèmes de transport. Le modèle DS3 avec ses trois capacités de résistance, d'absorption et de récupération (cf. 1.2.1.2) en est un bon exemple dans la mesure où le cas des systèmes de transport offre d'ailleurs une application critique du modèle. Concernant la capacité d'absorption définie dans ce modèle, si cette capacité dépend des alternatives offertes par le réseau technique suite à la défaillance d'un ou plusieurs de ses composants, cette capacité n'est pas exclusivement liée à ces alternatives physiques au sein du réseau comme le laisse penser (SERRE, 2015a, p. 117). En effet, prenant l'exemple d'un réseau de transport endommagé, (SERRE, 2015a, p. 117) illustre la capacité d'absorption par le report du trafic sur des chemins alternatifs à l'itinéraire initial, et que de fait, plus ses chemins sont nombreux et divers et moins la perturbation est ressentie. Les alternatives physiques permettraient, par conséquent, à elles seules la continuité du service et le fonctionnement du réseau en mode dégradé.

Or, la démarche méthodologique construite dans cette thèse (cf. *Partie II* et *Partie III*) démontre que le fonctionnement en mode dégradé se décline en fait en plusieurs possibilités : une dégradation en termes de vitesse d'exploitation du système, de gares desservies, de capacité du système... Tous ces paramètres entrent en jeu dans la dégradation du service fourni et donc dans la capacité d'absorption plus ou moins grande d'un réseau de transport. La capacité d'absorption est également fonction de la criticité des composants quant au bon fonctionnement du système et à leur propension à générer des défaillances internes au système (cf. *chapitre 4*). Ainsi, les alternatives topologiques qu'offrent un réseau de transport ne sont donc qu'une partie des composantes de la capacité d'absorption.

Finalement, deux manquements majeurs sont mis en avant dans l'ensemble des modèles conceptuels dominants de résilience développés précédemment et auxquels cette thèse propose d'apporter une contribution méthodologique et pratique appliquée aux systèmes de transport guidé. Premièrement, **l'absence d'une caractérisation d'un fonctionnement « intermédiaire », c'est-à-dire basé sur le principe de fonctionnement du système en mode dégradé durant chacune des phases de la crise. Les principes actuels de fonctionnement d'un système de transport guidé faisant face à un risque naturel, tant dans les phases avant, durant et après l'occurrence de l'aléa, reposent aujourd'hui sur une logique fortement binaire : soit le système fonctionne et assure son service, soit il est arrêté.** Il apparaît donc nécessaire d'élaborer des stratégies intermédiaires c'est-à-dire permettant d'assurer un service, même dégradé, du système de transport. C'est l'objet du second manquement important sur lequel porte le travail de cette thèse : **l'absence d'une démarche de continuité de service, en particulier durant la phase du risque.**

1.2.5 Positionnement scientifique et circonscription théorique de la recherche

1.2.5.1 Un ancrage dans le génie urbain

La thèse se positionne précisément parmi l'ensemble des concepts et des modèles présentés précédemment.

Sur le plan scientifique, ce positionnement est fondamentalement ancré au sein du génie urbain pour deux raisons majeures.

Premièrement, le rapprochement épistémologique entre génie urbain et résilience est approprié, d'une part grâce aux problématiques communes entre ces deux concepts et d'autre part, grâce aux apports réciproques qui émergent lors de leur croisement (Tableau 1.1, page 32). La pertinence du rapprochement de ces deux concepts est établie dans les sciences de la maîtrise et de la gestion des risques qui affectent les systèmes urbains et *a fortiori* les villes. L'usage du concept de résilience sur le système ville est donc rendu légitime par la vision unitaire, globale et de mise en cohérence que porte le génie urbain.

Deuxièmement, la mise en œuvre de la résilience urbaine se conçoit et se définit au regard du génie urbain. Autrement dit, la mise en pratique de la résilience urbaine est rendue possible par le génie urbain et pour celui-ci. C'est, en effet, par le biais du génie urbain que la résilience passe d'une représentation **mentale**, c'est-à-dire un ensemble structuré, fonctionnel et évolutif de connaissances qui ont trait à un objet donné, à une représentation **action**, c'est-à-dire un modèle pour une mise en œuvre par l'action (DEBARBIEUX, 1998). Cette logique de représentation, mentale et action, est d'ailleurs tributaire de dimensions spatiales et temporelles (LE LAY, 2016) tout comme le concept de résilience pour lequel, là aussi, tout est question d'échelles spatiales et temporelles (DJAMENT-TRAN, 2015).

Par conséquent, l'intérêt de la résilience pour le génie urbain est double : un intérêt **épistémologique** issu de leur rapprochement et un intérêt **problématique** issu de leurs questionnements et apports réciproques. En considérant également l'évolution récente du génie urbain, présentée par (DIAB, 2012; DIAB et SOUCY, 2013) comme un génie urbain *refondé*, la résilience vis-à-vis du génie urbain maintient ce double lien épistémologique et problématique. Le génie urbain refondé se positionne, en effet, sur les faits suivants : passage progressif vers des systèmes et sous-systèmes urbains complexes, multiplication des interactions entre ces systèmes et sous-systèmes complexes, mobilisation de la modélisation fonctionnelle et dysfonctionnelle, et besoin de mise au point d'outils opérationnels au service de la décision. Ces éléments interrogent encore et renforcent les liens épistémologiques et problématiques entre résilience et génie urbain. L'intérêt de la résilience pour le génie urbain peut donc être vu selon un troisième angle : il est aussi d'ordre **méthodologique** vis-à-vis de ce besoin par les praticiens d'outils opérationnels. C'est essentiellement cet enjeu d'ordre méthodologique que cette thèse étudie.

Au regard des enjeux particuliers de la maîtrise et de la gestion des risques dont l'influence est directe sur la conception et l'exploitation d'un système urbain, le besoin est justement fort en méthodologies (GONZVA *et al.*, 2016d). La prépondérance de ces enjeux est vérifiée dans le cas des systèmes de transport public guidé, régulièrement affectés par des aléas naturels d'intensité variable (OSLAKOVIC STIPANOVIC *et al.*, 2013, 2012) impliquant d'importants dommages économiques et sociaux.

L'importante diversité des systèmes de transport guidé à travers le monde va d'ailleurs dans le sens de

la complexification de ces enjeux de gestion des risques et de la difficulté à les intégrer. Cette diversité provient des vitesses d'exploitation, des capacités de transport de passagers et essentiellement des configurations d'implantation des systèmes. Parmi les configurations d'implantation possibles sur un territoire existent les systèmes **souterrains**, qui circulent, sur tout ou partie de leur linéaire, au travers de structures en sous-sol de type tunnel (cas du métro de Paris, de Londres...). Les systèmes de **surface** circulent quant à eux sur des plateformes au sol dédiées (cas du tramway de Jérusalem, de Dijon...). Les systèmes **aériens** circulent, sur tout ou partie de leur linéaire, sur des ouvrages d'art en hauteur tels que les viaducs ou les ponts (cas du métro de Dubaï, d'Hanoï...). Dans le cas des métros, il est important de souligner que la part du souterrain semble bien supérieure à celle de la surface et de l'aérien. En effet, en 2009, sur 146 lignes de métros urbains identifiées au sein de 15 pays européens et représentant 2 335 km de voies ferrées, 4 % sont en aérien, 24 % sont en surface et 72 % sont en souterrain (ERRAC & UITP, 2012, p. 5).

Cette considération relative à l'implantation d'un système de transport n'est pas sans effet sur l'impact de risque naturel : comme étudié dans cette thèse, les configurations d'implantation peuvent avoir un impact positif de réduction du risque ou, au contraire, négatif d'accroissement du risque selon l'aléa naturel étudié (GONZVA *et al.*, 2014b).

Ainsi, dans ce contexte, le besoin en méthodologies d'analyse des risques qui affectent les systèmes urbains, spécialement les systèmes de transport guidé dans leurs trois configurations classiques d'implantation, apparaît important.

1.2.5.2 Entre résilience fonctionnelle et ingénierie de la résilience

Sur le volet de la circonscription théorique de la recherche, celle-ci se positionne à la fois dans la résilience fonctionnelle, au sens de (BARROCA et SERRE, 2013), et dans la *resilience engineering*.

Concernant la résilience fonctionnelle, l'objectif est, d'une part, d'identifier les composants des systèmes de transport public guidé impactés à la fois directement et indirectement par l'intermédiaire de processus de défaillances par effet domino, et d'autre part, de déterminer les conséquences fonctionnelles que ces impacts d'ordre matériel génèrent au niveau de l'exploitation. Dans une optique de dégradation du service fourni, l'objectif consécutif est de déterminer dans quelle mesure le service peut-il être assuré par un fonctionnement en mode dégradé dont il convient de construire les caractéristiques et les conditions de déclenchement, et cela à toutes les étapes du risque. Les travaux se situent donc pleinement dans la résilience fonctionnelle car ils s'intéressent à la fiabilité des composants du système de transport guidé soumis à des risques naturels et aux possibilités d'identifier des modes de fonctionnement dégradé assurant un service partiel.

En revanche, si l'approche de la résilience fonctionnelle est qualitative (BARROCA et SERRE, 2013), les travaux développés dans cette thèse s'inscrivent au-delà en construisant une démarche quantitative. Dans cette logique, la résilience fonctionnelle ne se limite alors plus à des enjeux de fiabilité permis par des analyses qualitatives mais s'ouvre à des enjeux de continuité de service rendus possibles par des indicateurs quantitatifs (chapitre 5) et par l'utilisation de méthodes probabilistes (chapitre 6).

C'est par rapport à ce dernier point que la thèse s'insère également dans l'approche de la *resilience engineering*. Elle apporte des éléments de réponse aux réflexions propres à la *resilience engineering* par rapport à une vision classique de sûreté des systèmes, dans le cas particulier ici des systèmes de transport guidé. En effet, au sens de la *resilience engineering* (DEKKER *et al.*, 2008, p. 59) :

- un système est résilient s'il cherche à *comprendre* comment il fonctionne et non pas pourquoi il dysfonctionne. La résilience n'est donc pas la capacité à prévenir les dysfonctionnements mais à maintenir le système en fonctionnement même en mode dégradé ;
- un système est résilient s'il cherche à *spécifier* les dépendances parmi les éléments qui le composent, les fonctions que ces éléments assurent et les facteurs de variabilité de ces fonctions. La résilience n'est donc pas un moyen pour décrire des dysfonctionnements et déterminer les évènements qui les ont causés ;
- un système est résilient s'il cherche à *apprendre* de manière continue dans le temps, sur la base d'un processus d'apprentissage défini pour des évènements de court terme et des changements de long terme. Il est résilient s'il est également capable d'actualiser sans cesse les connaissances apprises. La résilience n'est donc pas la capacité d'apprendre uniquement d'évènements ponctuels ayant entraîné des dysfonctionnements du système.

Ces trois éléments sont développés dans ce travail de recherche. La compréhension du fonctionnement du système par la spécification de ses dépendances est traitée dans le [chapitre 3](#). Par conséquent, le travail est quantitatif, et donc parfaitement en lien avec les considérations de la *resilience engineering* en dépassant le descriptif fonctionnel qualitatif du système au profit d'une caractérisation quantitative des impacts de l'aléa, jusqu'à l'exploitation du système.

1.2.6 Problématique de la thèse

Dans ce contexte, la problématique de la thèse est la suivante : une démarche méthodologique est élaborée afin de **caractériser de quelles manières une inondation d'intensité donnée affecte un système de transport guidé**.

Cette démarche méthodologique tournée vers l'action comprend une **modélisation structurelle, fonctionnelle et dysfonctionnelle** du système, ainsi qu'une **analyse des défaillances matérielles du système dues à des effets directes ou domino**. Elle traite les **trois configurations classiques d'implantation d'un système de transport : en souterrain, en surface et en aérien**. L'objectif final est de déterminer les **conséquences fonctionnelles de ces impacts d'ordre matériel**. Le travail de recherche s'attache donc à déterminer **dans quelle mesure l'exploitation du système de transport peut se faire dans un fonctionnement en mode dégradé en situation d'inondation, avant et après l'occurrence de l'aléa**.

L'enjeu est de **mettre en exergue l'apport d'une telle démarche méthodologique applicable sur les systèmes urbains, à partir d'une approche technico-fonctionnelle, pour la gestion des risques urbains. De façon globale, l'enjeu est de contribuer à la résilience des villes face au risque inondation**.

Synthèse

De nombreux modèles conceptuels existent pour étudier la résilience de systèmes faisant face à des perturbations d'origine naturelle. Trois catégories apparaissent après un passage en revue des modèles actuels dominants : les modèles visant à construire une métrique de la résilience en l'évaluant grâce à des aptitudes requises, des indicateurs ou des critères ; les modèles consistant à définir un cadre général de façon à structurer la résilience en dimensions complémentaires ; les modèles caractérisés par des étapes successives d'analyse. Pourtant, cette importante multiplicité de modèles représente une source de connaissances croisées contrairement à la multiplicité des définitions tantôt complémentaires tantôt antinomiques de la résilience. Néanmoins, un manquement majeur peut être signalé : l'absence de spécification quant aux possibilités de fonctionnement en mode dégradé des systèmes, comme facteur d'amélioration de la résilience. C'est dans cette veine que se positionne cette recherche de construction d'une démarche méthodologique d'étude de la résilience des systèmes de transport guidé soumis au risque inondation.

1.3 Conclusion du chapitre 1

L'omniprésence de la résilience dans le temps et dans l'espace est une caractéristique classiquement mise en avant. Cette omniprésence est liée à une mobilisation du concept depuis des siècles dans des disciplines diverses comme la psychologie, les sciences physiques, les sciences écologiques, les sciences sociales et la science des risques. Ces disciplines qui ont « historiquement » vu les premiers développements conceptuels de la résilience sont complétées actuellement par d'autres champs qui se l'approprient également : la géographie des risques, l'adaptation au changement climatique, l'aménagement du territoire et l'urbanisme, l'architecture, la durabilité. En particulier dans le cas de l'urbanisme, cette mobilisation du concept de résilience promet d'être poursuivie dans les prochaines années grâce aux champs qui émergent actuellement tels que le design industriel, l'ingénierie du numérique ou encore les disciplines artistiques qui interviennent déjà sur l'espace urbain. Cette omniprésence est également liée à des développements de ce concept un peu partout dans le monde, en particulier aux Etats-Unis et en Europe. De cette multiplicité d'usages est apparue une multiplicité de définitions du concept. Cette situation est devenue problématique à partir du moment où les acceptions existantes au sein de diverses disciplines sont devenues contradictoires, donnant au concept de résilience à la fois un sens chez l'un et son contraire chez l'autre. C'est la raison pour laquelle tout usage du concept de résilience doit **s'inscrire dans un contexte précis**, pour un **système défini** faisant face à un **événement perturbateur explicite**, et à des échelles **temporelles et spatiales données**. Sans ces clarifications préalables, toute conclusion risquerait d'être erronée.

Dans le cadre de cette recherche qui mobilise la résilience dans le génie urbain, il est important de justifier pourquoi ce rapprochement conceptuel est légitime. Premièrement, le génie urbain et la résilience appliquée à l'urbain sont étroitement liés par leurs difficultés communes d'**émergence** et d'**acceptation unanime**. Les deux concepts sont, en effet, hautement polysémiques et les frontières de ce qu'ils intègrent respectivement sont difficiles à déterminer clairement. Deuxièmement, l'approche portée par la résilience et l'approche portée par le génie urbain convergent vers une logique semblable : les deux concepts ont une approche **systémique** et tendent vers une logique **opérationnelle** c'est-à-dire orientée vers des **actions** concrètes : gestion et maîtrise des risques, etc. Ainsi, le fait d'appliquer la résilience au génie urbain pour étudier alors la résilience dite urbaine est légitime et présente une véritable pertinence par des apports réciproques entre ces deux concepts.

Par ailleurs, ce rapprochement permet de définir des modèles conceptuels de résilience dans le cadre du génie urbain offrant la possibilité de dépasser le flou définitionnel attaché à la résilience. Plusieurs modèles dominants de résilience existent actuellement dans la littérature et apparaissent, en effet, en lien avec les considérations théoriques et pratiques de ces travaux de recherche sur la résilience des systèmes de transport guidé face au risque inondation. Plus précisément, trois catégories de modèles se dessinent selon leurs enjeux : les modèles visant à construire une **métrique** de la résilience, en l'évaluant grâce à l'élaboration de capacités, d'indicateurs ou de critères ; les modèles consistant à définir un **cadre général** de la résilience de façon à la structurer en différentes dimensions complémentaires ; les modèles détaillant des **étapes communes d'analyse**.

Dans le cadre de cette thèse, le positionnement scientifique peut se définir comme à mi-chemin entre la **résilience fonctionnelle**, au sens de (BARROCA et SERRE, 2013), et la **resilience engineering**. Une fois ce positionnement pris, l'enjeu scientifique est donc de construire un modèle conceptuel de résilience apte à fournir de la connaissance théorique et pratique à l'amélioration de la résilience des systèmes de transport guidé soumis au risque inondation.

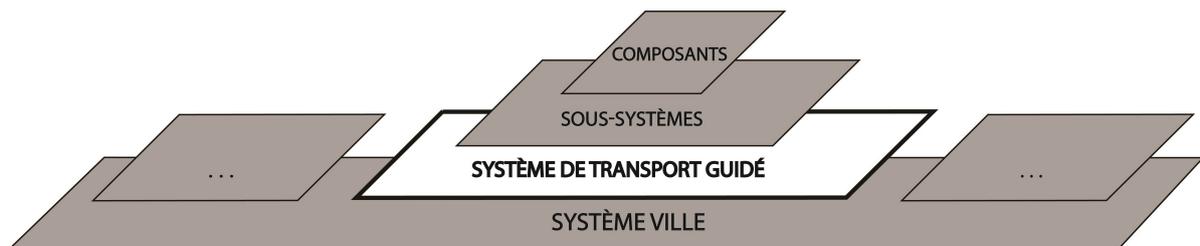


Chapitre 2

Spécificités de l'objet d'étude et de la démarche méthodologique entreprise

« Penser de façon complexe est pertinent dans les cas, (presque tous), où nous rencontrons la nécessité d'articuler, de relationner, de contextualiser. Penser de façon complexe est pertinent chaque fois qu'il faut penser. Lorsqu'on ne peut réduire le réel ni à la logique, ni à l'idée. Lorsqu'on ne peut ni ne doit rationaliser. Lorsque nous cherchons à dépasser ce qui est déjà connu. »

Edgar Morin, *Éduquer pour l'ère planétaire*, p.48, Editions Balland, 2003.



Grâce à sa grande polysémie, le concept de résilience recouvre de nombreux usages fondamentaux dans des disciplines d'une très grande diversité. A cause de sa grande polysémie, le concept de résilience éprouve actuellement des difficultés à former un consensus d'ordre théorique au sein de la communauté scientifique. Cette polysémie, et le flou résultant concernant la définition du concept, n'est pas problématique en soi dès lors que la résilience est envisagée de façon pratique. Autrement dit, fixer la définition de la résilience et le contexte précis de son utilisation permettent d'orienter le concept vers des perspectives opérationnelles. Le chapitre 1 a mis en évidence que toute volonté d'opérationnalisation de la résilience passe par une modélisation conceptuelle préliminaire qui permet de cadrer la démarche d'opérationnalisation : étapes d'amélioration de la résilience, critères, indicateurs d'évaluation de la résilience, etc.

L'objectif de ce chapitre est d'abord de définir l'objet d'analyse, à savoir les **systèmes de transport guidé**. Jusqu'ici considérés sans démonstration comme des systèmes, la théorie des systèmes ou *systémique* est utilisée pour justifier le fait qu'il est bien opportun de considérer les transports guidés comme des systèmes. Cette démonstration est d'autant plus importante que tout le travail qui suit est valable si et seulement si l'objet d'étude est un système et non un objet quelconque. Une fois cette idée acquise, un passage en revue de plusieurs types de systèmes qui existent en milieu urbain permet de caractériser les systèmes de transport guidé comme des systèmes technico-fonctionnels. De plus, la pertinence de la théorie des systèmes est également démontrée dans la modélisation qu'elle peut offrir du système lorsqu'il est soumis à une inondation : quelles perturbations sont générées, de quelles façons se propagent-elles au sein du système, quelles sont leurs conséquences à l'échelle globale du système ? Notamment, la systémique permet la modélisation des défaillances par effet domino qui sont des mécanismes particuliers dans leur manière de diffuser une perturbation isolée et locale pour engendrer un dysfonctionnement généralisé et global.

Les besoins d'une démarche méthodologique sont proposés en vue de caractériser la vulnérabilité du système face aux risques naturels de façon globale c'est-à-dire depuis les dommages matériels jusqu'aux conséquences fonctionnelles sur l'exploitation. Les besoins visant à apporter une aide à la réflexion en matière de gestion des risques tant en phase de conception, d'exploitation et de maintenance d'un système sont également détaillés. A cet égard, la configuration d'implantation des systèmes de transport guidé, en souterrain, surface ou aérien, est intégrée dans la démarche proposée qui étudie l'impact du risque inondation.

2.1 Les systèmes urbains : un constat d'interdépendances à plusieurs échelles spatiales

2.1.1 Le concept de système et application au transport public guidé

Le concept de système est applicable au transport ferroviaire, de personnes comme de marchandises dans son sens définitionnel primitif d'« *ensemble d'éléments en interaction dynamique organisé en fonction d'un but* » (DE ROSNAY, 1975). Le but de ces systèmes est formulable simplement : l'accessibilité, c'est-à-dire donner la capacité à des individus d'atteindre des services, des biens, des activités par leur usage (LITMAN, 2016) et conséquemment, la mobilité, c'est-à-dire soutenir la propriété individuelle de pouvoir se déplacer (LE FEON, 2014, p. 29). C'est bel et bien l'existence d'une finalité à un objet qui en fait un système car alors il devient une « *totalité[s] dont les éléments, en interaction dynamique, constituent des ensembles ne pouvant être réduits à la somme de leur parties* » (VON BERTALANFFY, 1993). Le système forme donc un tout assurant un but précis dont la réalisation est permise par l'ensemble des interactions entre les éléments qui le composent. Le recours au concept de système dans le domaine des transports est également contextuel dans la mesure où il apparaît naturellement dès lors qu'il est question d'étudier la structure et l'évolution de ces objets (LADRIÈRE, 2016) ; l'étude de sa structure s'apparentant à une situation de fonctionnement courant du système tandis que l'étude de son évolution s'associant plutôt à l'occurrence d'évènements internes ou externes au système susceptibles de produire des modifications structurelles.

A la définition précédente de (DE ROSNAY, 1975) s'ajoutent celles dans la même veine de (VON BERTALANFFY, 1993) qui formalise le concept de système comme « *un ensemble d'unités en interactions mutuelles* » et de (LADRIÈRE, 2016) pour qui le système est un « *objet complexe, formé de composants distincts reliés entre eux par un certain nombre de relations.* » Cette dernière définition révèle le premier aspect essentiel du concept de système : la **complexité**. La théorie des systèmes, l'approche systémique ou plus classiquement la systématique, en effet « *s'efforce d'établir le cadre le plus général à l'intérieur duquel on peut étudier le comportement d'une entité complexe analysable, c'est-à-dire son évolution au cours du temps* » (LADRIÈRE, 2016) en regroupant en fait « *les démarches théoriques, méthodologiques et pratiques relatives à l'étude de ce qui est reconnu comme trop complexe pour pouvoir être abordé de façon réductionniste et qui pose des problèmes de frontières, de relations internes et externes, de structure, de lois, ou de propriétés émergentes caractérisant le système comme tel, ou des problèmes de mode d'observation, de représentation, de modélisation ou de simulation d'une totalité complexe* » (DONNADIEU *et al.*, 2003). De façon concise, l'idée essentielle est que « *le système possède un degré de complexité plus grand que ses parties, autrement dit qu'il possède des propriétés irréductibles¹ à celles de ses composants.* » (LADRIÈRE, 2016).

Penser système, c'est donc de fait s'acheminer sur le terrain de la complexité et, réciproquement, analyser la complexité est possible par une approche systémique. Dans ce contexte, la compréhension des systèmes qui constituent les villes peut paraître partielle, avec d'importantes zones d'ombre. Il apparaît alors important de distinguer, pour cette recherche, la **complexité** de la **complication** afin d'identifier sur quel terrain se place ce travail. La différence fondamentale entre ces deux termes est la suivante (BARROCA *et al.*, 2016) : un objet compliqué peut être simplifié alors que la complexité est un

1. Cette irréductibilité mentionnée par Jean Ladrière insiste sur le fait que l'on ne peut assimiler ou ramener les propriétés d'un système à la présence de l'un ou l'autre de ses composants. C'est la raison pour laquelle l'auteur ajoute justement que « *cette irréductibilité doit être attribuée à la présence des relations qui unissent les composants.* »

état fondamental qui définit l'objet considéré. Un objet complexe ne doit, par conséquent, pas être simplifié. Dès lors, les systèmes de transport sont des systèmes compliqués voire *hyper compliqués* plutôt que des systèmes complexes au sens de la systémique car ils ne présentent pas, par exemple, de phénomènes qui émergent de façon imprévisible dans leur fonctionnement. Néanmoins, le haut degré de complication ou l'**hyper complication** du fonctionnement, et surtout du dysfonctionnement d'un système de transport guidé soumis à un risque inondation nécessite de s'orienter vers les approches offertes par la systémique.

La notion de **globalité** est le deuxième aspect fondamental du concept de système qui est, en effet, « *une unité globale organisée d'interrelations entre éléments, actions ou individus* » (MORIN, 1977, p. 102) c'est-à-dire entre un ensemble d'objets hétérogènes. Cette dimension holistique est plus forte qu'un simple « tout » car elle permet en effet « *l'apparition de qualités émergentes [au système] que ne possédaient pas les parties* » (DURAND, 2013). Cette globalité est par conséquent structurelle, un ensemble de parties agrégées, et surtout fonctionnelle, un ensemble de propriétés rendues possibles par la globalité.

Cette émergence fonctionnelle révèle, de plus, une troisième caractéristique du concept de système : celle d'**organisation**. L'agencement que présentent les éléments les uns par rapport aux autres et les relations qu'ils entretiennent mutuellement sont au cœur du concept de base de système. La notion d'organisation vient préciser celle de globalité en soulignant que le système est « *une totalité organisée, faite d'éléments solidaires ne pouvant être définis que les uns par rapport aux autres en fonction de leur place dans cette totalité.* » (DE SAUSSURE, 1995). Les éléments présentent donc une imbrication déterminée et une hiérarchie prédisposée trouvant leur origine dans la finalité du système. Un système est donc, selon (LAJOIE, 2007), « *un tout organisé, l'organisation interne du système constituant sa structure et le comportement des éléments en interactions définissant sa dynamique* ».

L'idée de dynamisme, retrouvée également dans la définition de (DE ROSNAY, 1975), formalise le dernier aspect fondamental du concept de système à savoir celui d'**interactions** ou d'**interrelations**. Ce sont ces interrelations qui établissent son degré de complexité, pas tant sur la quantité de relations existantes entre les composants du système mais plutôt car celles-ci ne représentent pas forcément un lien fonctionnel direct entre eux (LEGROS, 2009, p. 72), une relation classique de cause à effet. Ce sont justement ces interactions entre les éléments qui permettent à chacun de « *concourir à l'objectif commun ou finalité du système* » (YATCHINOVSKY, 2005) en leur « *donnant un caractère de totalité* » (DE BESNARD, 2007, p. 16). Ces interactions sont aisément identifiables dans le cas, par exemple, de systèmes urbains en prenant la forme de flux d'énergie, de matière ou d'information qui transitent au sein du système ou alors entre le système et son environnement. Les systèmes sont, en effet, ouverts en ce sens qu'ils échangent avec les éléments de leur environnement. Les systèmes de transport guidé sont, pour illustration, un ensemble intégré dans un contexte socio-économique tel que leur capacité de transport constitue un enjeu majeur de développement. L'environnement est donc actif sur le système, et réciproquement d'ailleurs : le système « *évoluant dans un environnement* » (LE MOIGNE, 1994) et n'étant pas simplement placé au sein de celui-ci. Enfin, ces interactions sont multiples et peuvent prendre la forme de relations de causalité, de rétroactions directes ou indirectes avec un retard temporel, chacune de ces rétroactions pouvant d'ailleurs avoir un effet global positif ou négatif sur le système (DE BESNARD, 2007, p. 19).

Finalement, plusieurs notions sous-tendent le **concept de base de système** et sont les suivantes : la **complexité**, la **globalité**, l'**organisation** et l'**interaction**. Les systèmes de transport guidé de personnes répondent pleinement à ces caractéristiques (Tableau 2.1) justifiant alors, dans cette recherche,

l'utilisation d'une approche systémique pour l'analyse de leurs dysfonctionnements en situation de risques naturels et en particulier de risque inondation.

TABLEAU 2.1 – Les transports guidés de personnes, un exemple de système

Caractéristiques d'un système		Caractéristiques des transports guidés de personnes
Complexité	↔	La complexité est une dimension générale des transports guidés (HUGHES et HEALY, 2014, p. 81) et émerge essentiellement des interactions. Cette apparente complexité est en fait un très haut degré de complication, qui est d'autant plus visible lorsque les transports guidés font face à des risques, générant ainsi des modes de défaillances : linéaires entre deux composants (causalités simples), linéaires entre quelques composants (causalités et dépendances simples) et non-linéaires entre un grand nombre de composants (dépendances croisées et phénomène de propagation/amplification) (HOLLNAGEL, 2011).
Globalité	↔	La globalité est évidente : l'ensemble des composants ferroviaires (infrastructures, énergie, etc.) qui, pris un à un, sont des éléments purement techniques permettent, pris dans leur globalité, de générer de l'accessibilité et de la mobilité aux individus.
Organisation	↔	Les transports guidés présentent une architecture hautement organisée et imbriquée avec des sous-systèmes, eux-mêmes dissociables en composants et ce, sur plusieurs niveaux. Cet ensemble d'éléments nécessite d'être ensuite exploité.
Interaction	↔	Les interactions entre les composants sont nombreuses et génèrent des interdépendances fonctionnelles entre eux. Ces interdépendances se révèlent particulièrement lorsque les transports guidés font face à des risques, démontrant par la même occasion que ces interactions sont à la fois interne et en lien avec l'environnement. Les rétroactions sont également nombreuses à une échelle plus large : la multiplication des transports guidés est consécutive à l'utilisation des transports guidés existants dont la capacité ne suffit plus.

En revanche, si tous les systèmes fondent leur existence et leur fonctionnement sur ces quatre notions constitutives, il n'en demeure pas moins une importante diversité. La ville regroupe un nombre important de systèmes de types différents : techniques, sociotechniques (GERSONIUS *et al.*, 2012; JOHANSSON, 2010; SAURIN *et al.*, 2013), écologiques (HOLLING, 1973), socio-écologiques (FOLKE, 2006; WALKER *et al.*, 2004; PLESSIS, 2008; ADGER, 2003), spatiaux (ASCHAN-LEYGONIE, 2000; PIERDET, 2015), sociaux, économiques, etc. Ces typologies ne sont pas exclusives, bien au contraire : les systèmes sociotechniques urbains sont aussi spatialisés par exemple. En fait, ces qualificatifs sont attachés au concept de système selon les disciplines, c'est-à-dire que l'approche ingénieuriste voit majoritairement des systèmes techniques tandis que le géographe observe des systèmes spatiaux. La cohérence de typologies parmi l'ensemble des systèmes urbains est d'autant plus difficile à saisir que la ville elle-même ne bénéficie pas de définition unanimement reconnue (LHOMME, 2012, p. 51). Néanmoins, il est désormais « *devenu banal d'assimiler une ville à un système au sein duquel chacune de ces transformations interagit sur l'ensemble de la structure, sur son fonctionnement et son évolution au cours du temps.* » (PIERDET, 2015).

Les systèmes de transport guidé sont considérés comme des systèmes de type **technico-fonctionnel** pour plusieurs raisons (GONZVA *et al.*, 2016a). D'une part, ce sont des objets techniques avec un but précis permis par une fonction d'usage et afin de satisfaire un besoin donné. La caractéristique physique et matérielle de ces systèmes à partir de laquelle transitent des flux de tous types (informations, énergie, etc.) en font donc des objets techniques. D'autre part, ces systèmes ont une caractéristique fonctionnelle : le support physique qui assure les échanges de flux nécessite une **organisation** globale précise afin que la (ou les) fonction(s) du système soi(en)t assurée(s). La caractéristique technico-fonctionnelle est également pertinente dans cette recherche car c'est par cette double composante qu'est abordée la résilience (SERRE, 2011 ; SERRE, 2015b, p. 9) : technique, afin d'évaluer les dommages matériels directs et indirects provoqués par une inondation sur un système de transport guidé, et fonctionnelle, afin d'évaluer les conséquences sur l'exploitation c'est-à-dire sur le niveau de service que peut fournir le système (niveau nominal, niveau faiblement dégradé, niveau moyennement dégradé, etc.) et l'organisation requise par ce niveau de service (ressources à mobiliser notamment).

La double approche technique et fonctionnelle pour les systèmes urbains est d'ailleurs usuelle car elle permet leur modélisation (LHOMME, 2012) et a été appliquée de façon théorique et opérationnelle sur plusieurs d'entre eux : système de gestion des déchets (BERAUD, 2013), parc immobilier (ALLAIRE, 2012), systèmes de protection face au risque inondation (VUILLET, 2012; SERRE, 2005), etc. Par ailleurs, l'approche socio-écologique, classiquement mobilisée elle aussi dans des contextes d'étude de résilience ou de gestion des risques naturels, apparaît utile dans le champ du développement durable (PLESSIS, 2008) en donnant notamment la possibilité d'inclure les personnes comme composants à part entière de ces systèmes (ALBERTI *et al.*, 2003). Par contre, elle s'avère moins pertinente dans cette recherche où la prédominance des enjeux techniques, surtout quand il s'agit de déterminer les dommages physiques sur un système en partie technique comme les transports guidés de personnes, est très importante. Examiner les systèmes de transport guidé comme des systèmes technico-fonctionnels ne suffit bien sûr pas pour prétendre à l'exhaustivité de leur fonctionnement. Les autres dimensions — architecturale, économique, de gouvernance, etc. -- en lien avec le fonctionnement des systèmes technico-fonctionnels ne sont donc pas traitées dans cette recherche contrairement aux aspects matériels, structurels et fonctionnels.

Ainsi, même si l'amélioration de la résilience reste un problème très vaste qui intersecte de nombreux domaines de compétences (TOUBIN, 2014, p. 68), il n'en demeure pas moins vrai que l'approche par la systémique technico-fonctionnelle apparaît pertinente pour concevoir une démarche opérationnelle dans le cadre de l'étude des effets du risque inondation sur les systèmes de transport guidé.

Les systèmes technico-fonctionnels bénéficient d'une importante littérature scientifique visant à les définir et à en identifier des caractéristiques-clés. Ces systèmes associent des éléments physiques (infrastructure, énergie, etc.) avec des acteurs (exploitants, mainteneurs, etc.) et des règles données (normes, pratiques, etc.) afin d'assurer une fonction particulière (permettre l'accessibilité et la mobilité) (GEELS, 2004). Bien que tout système présente une part de complexité inhérente, celle-ci peut être plus importante dans certains domaines tels que celui de l'aviation (SAURIN *et al.*, 2013) et par analogie avec les autres réseaux de transport, celui du ferroviaire. Dans le cas de la conception de projets d'infrastructures linéaires comme des projets routiers ou ferroviaires, la structure même des objets ainsi que le nombre d'acteurs impliqués sont tels que l'ingénierie de la construction peine aujourd'hui à gérer ce niveau de complexité et s'oriente alors vers des nouvelles modélisations conceptuelles de données (TOLMER, 2016). Pour néanmoins saisir cette complexité, tâche de fait difficile vu l'aspect multidimensionnel et imprécis de cette notion (PERROW, 1984), au moins quatre spécificités

permettent de la mettre en relief : une importante diversité d'éléments hiérarchisés et fortement imbriqués ; un important nombre d'interactions non linéaires, fortement couplées, internes et externes au système ; une variabilité imprévisible en particulier due au fait que le système est ouvert à son environnement ; et, un comportement résilient (SAURIN et SOSA GONZALEZ, 2013). Si les trois premières caractéristiques sont ordinairement évoquées pour définir un système, la dimension résiliente l'est moins.

Dans l'approche technico-fonctionnelle, le comportement résilient est très proche de la logique portée par la *resilience engineering* selon laquelle le système est capable d'ajuster son fonctionnement avant, pendant et après un évènement perturbateur attendu ou non de façon à ce qu'il puisse continuer à satisfaire ses fonctions (HOLLNAGEL *et al.*, 2012). Dans cette optique, la complexité perd sa dimension négative en donnant la possibilité à ces systèmes de mieux pouvoir faire face à un environnement riche en perturbations (DEKKER, 2012) grâce à la diversité d'éléments et d'interactions. La complexité semble alors s'apparenter à ce que l'on peut proposer de nommer un « exhausteur de résilience », c'est-à-dire que, sans modifier ni même intervenir sur l'élaboration ou la mise en place de stratégies d'amélioration de la résilience d'un système, elle permet à ces stratégies de mieux « prendre » et de mieux « coller » au système, d'augmenter l'intensité de leur action sur le système et ainsi de favoriser des résultats positifs. Dans ce sens, la complexité des systèmes de transport guidé devient donc un atout à la mise en place de stratégies opérationnelles de résilience.

2.1.2 Le concept de système de systèmes : vers une intrication croissante des objets

Un volet actuellement de plus en plus présent dans la recherche comme dans la pratique est celui de la dépendance comme source majeure de complexité des systèmes ou réseaux technico-fonctionnels. Ces réseaux techniques constituent ainsi ce qu'il est désormais consensuel de nommer des « infrastructures critiques » (LA PORTE, 2006) et dès lors, la notion de dépendance à leur sujet sous-tend trois aspects.

Premièrement, cette dépendance est relative aux **populations** (BOUCHON, 2006; O'ROURKE, 2007; LA PORTE, 2006) car ces infrastructures critiques constituent l'épine dorsale des sociétés modernes² (VENTURA *et al.*, 2010). Les pays anglo-saxons parlent quant à eux, historiquement, plutôt de *lifeline* (CUTTER *et al.*, 2000; PLATT, 1995) pour identifier ces infrastructures-clés pour un territoire. Les *lifelines* sont très similaires au concept d'infrastructures urbaines critiques en se définissant comme des systèmes ou réseaux qui permettent la circulation des personnes, biens, services et informations qui sous-tendent la santé, la sécurité, le confort et l'activité économique³. Ces enjeux ou *lifelines* incluent depuis récemment, en plus des éléments stratégiques usuels tels que des équipements majeurs de transport ou de soins par exemple, des éléments plus larges liés au fonctionnement et au développement urbain : patrimoine urbain, économie, etc. (D'ERCOLE et METZGER, 2009). Les caractéristiques principales de ces infrastructures sont établies clairement (KRÖGER, 2008) et collectivement identifiées par un grand nombre d'institutions internationales (DHS, 2006⁴; EC, 2008⁵; PSC, 2009⁶). Les infrastructures de transport, de biens et de personnes en font eux-mêmes explicitement

2. "The system of critical infrastructures [...] constitutes the backbone of modern societies".

3. "Lifelines [...] may be defined as systems or networks which provide for the circulation of people, goods, services, and information upon which health, safety, comfort, and economic activity depend."

4. U.S. Department of Homeland Security

5. European Commission

6. Public Safety Canada

partie, considérant même que l'économie et la sécurité nationale de pays tels que les Etats-Unis en dépendent (PCCIP, 2001)⁷.

Deuxièmement, la prise de conscience assez récente des nombreuses **interactions** qu'entretiennent entre eux les réseaux, les infrastructures, les services urbains reconnus comme critiques, essentiels ou vitaux (ROBERT et MORABITO, 2009) a complètement modifié les **modes de gestion des risques en milieu urbain**. Ces interdépendances peuvent en effet être sources de défaillances par effet en cascade car la défaillance d'une infrastructure peut affecter directement ou indirectement d'autres infrastructures et impacter ainsi d'importants territoires géographiques (RINALDI *et al.*, 2001; CEPRI, 2016). Contextuellement, la recherche scientifique autour de la gestion des risques urbains s'est orientée vers l'étude et la modélisation de « systèmes de systèmes interdépendants » (KRÖGER, 2008; HAIMES, 2004; RINALDI *et al.*, 2001) au-delà du paradigme jusque-là mobilisé de « systèmes complexes » (LE MOIGNE, 1999; FOLKE, 2006).

Troisièmement, la dépendance est relative aux **interactions internes** que présentent les éléments d'un système. Ces éléments peuvent être considérés comme indépendants car le système est hautement compliqué mais non complexe. Les systèmes de transport guidé possèdent de nombreux sous-systèmes, eux-mêmes divisés en composants entretenant chacun des relations les uns avec les autres. Dans le cas des réseaux critiques, si ceux-ci respectent pleinement les concepts de base d'interaction et d'organisation entre éléments, ces derniers ont également un fonctionnement hautement compliqué. Cette complication en matière d'interaction et d'organisation est mise en relief par le grand nombre de processus techniques, redondants et évolutifs mais aussi par les mécanismes de défaillances multiples, bouclées, simultanées qui apparaissent dans le cas où ces systèmes font face à des risques (SERRE, 2005, p.91; SERRE, 2011, p. 40). Ces dépendances internes au sein des systèmes technico-fonctionnels en font en fait pour chacun d'entre eux et à leur propre échelle un système interconnecté à part entière, dont l'ensemble de ces *intra-dépendances* sont cruciales pour la continuité de service globale (HAIMES, 2004, p. 701).

Ces dépendances, qu'elles soient externes ou internes au système technico-fonctionnel étudié, peuvent être distinguées en plusieurs catégories non exclusives (RINALDI *et al.*, 2001; TRUCCO *et al.*, 2012) :

- les dépendances *physiques* : dues aux échanges de ressources (matières, etc.) entre deux éléments ou plus ;
- les dépendances *cybernétiques* : dues aux échanges de flux d'informations entre deux éléments ou plus ;
- les dépendances *géographiques* : dues à la proximité géographique de deux éléments ou plus pouvant influencer mutuellement leur fonctionnement, notamment dans le cas de perturbations ;
- les dépendances *logiques* : traduisent un rapport d'influence entre deux éléments ou plus d'une nature différente de celle des trois autres, et recouvrent alors des dépendances à plus grande échelle en lien avec la situation économique, financière ou encore politique.

Ainsi, la vision systémique prônée dans cette recherche s'exprime par la prise en compte de l'ensemble des dépendances entre les sous-systèmes. Elle apparaît d'autant plus indispensable pour l'élaboration de stratégies opérationnelles de résilience des systèmes de transport guidé, et plus généralement d'ailleurs, des systèmes (ou infrastructures) critiques. Bien que la modélisation et la prédiction du comportement d'une infrastructure critique soient un travail difficile⁸ (COMES et VAN DE

7. U.S. President's Commission on Critical Infrastructure Protection

8. "Modelling and predicting CI behaviour is challenging".

WALLE, 2014), l'approche systémique est, en effet, essentielle pour :

- appréhender les interdépendances grâce à un travail de quantification de ces interconnexions⁹ (ZIMMERMAN et RESTREPO, 2006) ;
- intégrer toutes les interdépendances, qu'elles soient dues à des processus internes au système, à des changements externes de son environnement (GALLOPÍN, 2006) ou à des événements inattendus et imprévisibles¹⁰ (BACH *et al.*, 2013) ;
- déterminer les défaillances dues à des effets en cascade entre réseaux techniques urbains considérés comme critiques (LHOMME *et al.*, 2011).

2.1.3 Les systèmes de transport guidé : des systèmes hautement structurés et organisés

Les systèmes de transport sont des systèmes hautement structurés. Comme le démontre l'analyse structurelle faite de ces systèmes (cf. 2.4), les sous-systèmes sont nombreux et les composants de ces systèmes le sont tout autant. Leur analyse fonctionnelle (cf. chapitre 3) démontre également le foisonnement de dépendances physiques (RINALDI *et al.*, 2001) entre certains éléments, par exemple la fourniture en énergie électrique au matériel roulant, et de dépendances cybernétiques (RINALDI *et al.*, 2001), par exemple la transmission d'informations depuis le Poste de Commandement Centralisé (PCC) à l'ensemble des autres sous-systèmes.

L'**environnement** des systèmes de transport guidé nécessite tout autant d'être pris en compte, pour deux raisons majeures. Premièrement, dans le cadre d'une analyse des dysfonctionnements de ces systèmes lorsqu'ils sont soumis à des événements perturbateurs, il est indispensable de connaître les dépendances qui existent entre les sous-systèmes et les éléments de son environnement. Par exemple, la partie « énergie » d'un système de transport ne peut être dissociée des sous-stations électriques externes au système. La deuxième raison est que la prise en compte des éléments de l'environnement, et donc des dépendances avec les éléments du système, permet une analyse globale d'un risque. Dans le cas du risque inondation, la vision globale offre une étude territorialisée plutôt que système par système. Les usagers sont aussi inclus en tant qu'éléments de l'environnement du système pour la simple raison qu'ils représentent la finalité même du système. De façon simplifiée, sans usagers, pas de nécessité de systèmes de transport. C'est la raison pour laquelle les problématiques d'accès des usagers aux gares en situation de risque inondation ou encore aux trains sont autant de sujets à inclure dans une analyse se voulant globale des systèmes de transport.

Cette recherche s'attache spécifiquement aux dépendances physiques entre les éléments d'un système de transport guidé et de son environnement. L'objet est de déterminer d'une part, **de quelle façon les intra-dépendances sont nécessaires au bon fonctionnement du système global** et d'autre part, **de quelle manière ce type de dépendances est susceptible de générer des défaillances en chaîne par propagation d'une situation initiale de risque**. L'intégration des dépendances à partir du point de vue de la géographie est explicitée (cf. chapitre 8) dans son apport à la compréhension des effets des dépendances logiques, démontrant de cette façon que cette typologie de dépendances n'est effectivement pas exclusive.

9. "These interdependencies require quantification to capture the relationships more precisely"

10. "The resilience concept also allows for the consideration of unexpected events".

Synthèse

Les systèmes de transport guidé sont des systèmes au sens de la théorie des systèmes car ils présentent les quatre caractéristiques de complexité, de globalité, d'organisation et d'interaction. De cette façon, l'utilisation d'une approche systémique pour analyser leurs perturbations lors de l'occurrence d'aléas naturels, en particulier le risque inondation, est permise. De plus, ces systèmes sont considérés sous l'angle technico-fonctionnel car ce sont des objets constitués d'un support physique auquel s'associe une organisation pour leur fonctionnement. Cette approche techni-fonctionnelle est également pertinente pour analyser leur résilience. En milieu urbain, ces systèmes ne sont pas isolés car ils possèdent de nombreuses interactions avec d'autres systèmes du même type et d'autre type (systèmes socio-écologiques, etc.) ce qui forme un maillage complexe de dépendances distribuées. Ces dépendances se retrouvent également en interne. Si l'existence de ces dépendances internes ou intra-dépendances est une condition *sine qua non* au fonctionnement du système, elles jouent un rôle très différent lors de l'occurrence d'un aléa en générant potentiellement des défaillances.

2.2 Des mécanismes de vulnérabilité complexes et difficiles à appréhender : les effets domino comme source des processus d'endommagement

2.2.1 Mécanismes de défaillances et effets domino

Si la haute structuration ou l'organisation ou encore les interconnexions internes entre éléments d'un système de transport sont un atout dans son fonctionnement en situation normale, il en est tout autre lors d'une situation de crise, c'est-à-dire durant laquelle le système fait face à un risque. Dans le cas d'une situation de crise, toutes ces dimensions peuvent potentiellement devenir une source majeure de vulnérabilité du système. Et, de façon générale aux systèmes urbains, la prise de conscience de cette vulnérabilité n'est pas récente. Au début des années 2000, la vulnérabilité de ces réseaux vitaux est déjà considérée comme ayant été démultipliée en l'espace de dix ans et trouve des sources nouvelles dans des risques désormais à grande échelle, dont la nature même est confuse à appréhender (MICHEL-KERJAN, 2003). Bien que les principales causes de vulnérabilité et de son maintien dans la durée semblent trouver leur origine dans des processus économiques, démographiques et politiques¹¹ (WISNER *et al.*, 2003, p. 52), les processus techniques au sein desquels des effets domino se produisent en sont aussi une source importante. En effet, les **effets domino**, de cascade ou boule de neige sont analysés à partir d'un aléa déclencheur, le plus souvent d'origine naturelle ou technique, produisant des aléas dérivés de même nature ou de nature différente (PROVITOLLO, 2005). Ces effets domino peuvent affecter une infrastructure puis les infrastructures qui en dépendent (BOUCHON, 2011) ou rester internes lorsque les conséquences se diffusent au sein du réseau (MICHEL-KERJAN, 2003). Les effets domino internes révèlent des mécanismes de défaillances en chaîne complexes, dynamiques et nombreux au sein du système et sont des processus pour lesquels les modèles sont rares.

Les effets domino obligent également à un **saut scalaire** dans la mesure où le risque ne peut plus se gérer à l'échelle de la zone d'aléa puisque les effets domino le diffusent, augmentant ainsi la taille de l'espace affecté par les effets induits de la perturbation initiale (REGHEZZA-ZITT, 2015). Ces effets domino sont fréquemment la cause d'importantes perturbations au sein des systèmes de transport lorsqu'ils sont affectés par des aléas naturels.

En 2000, un orage bref et intense de pluie mêlée de grêle est survenu sur la commune de Sarry dans l'Yonne et a entraîné d'importants ruissellements sur les infrastructures de la ligne à grande vitesse Sud-Est reliant Paris à Lyon. A cause des systèmes de drainage aux capacités insuffisantes et bouchés par des embâcles, l'excédent d'écoulement d'eau a débordé sur la voie emportant le pied de banquette de ballast sur une centaine de mètres (Figure 2.1a). Puis, les matériaux solides transportés ont bouché la buse de collecte des eaux sous un pont-route à proximité ayant pour effet d'augmenter encore l'écoulement d'eau sur la voie (Figure 2.1b). L'écoulement d'eau a, en plus, pris de la vitesse sous le pont-route du fait du rétrécissement, sous l'ouvrage d'art, de la piste le long de la voie et l'importance de la pente longitudinale, à 3,5 %. L'eau a donc naturellement atteint la voie ferrée pour ensuite emporter le ballast sous les traverses, en s'écoulant sur les deux voies. La circulation a été interrompue suite à l'alerte d'un choc anormal donné par un train (PAMS CAPOCCIONI *et al.*, 2015).

Les effets domino sont donc les suivants : l'aléa déclencheur, l'orage, est naturel et a conduit à un

11. "The most important root causes that give rise to vulnerability (and which reproduce vulnerability over time) are economic, demographic and political processes".



(a) Ecoulements d'eau et éléments solides collectés par les fossés (PAMS CAPOCCIONI *et al.*, 2015)
(b) Drainage bouché par des éléments solides et présence de ballast issu du pied de la banquette (PAMS CAPOCCIONI *et al.*, 2015)

FIGURE 2.1 – Conséquences de l'inondation survenue sur la ligne à grande vitesse Sud-Est en 2000 au niveau de la commune de Sarry

premier aléa dérivé qu'est la défaillance des composants assurant le drainage, puis à un second aléa dérivé correspondant à l'emportement du ballast et, enfin, à un dernier aléa dérivé d'ordre fonctionnel : l'interruption de la circulation au niveau de certaines gares pendant plusieurs heures. Le **saut scalaire**, caractéristique des perturbations dues à des effets domino, a alors fait de ce risque hydrologique perturbant le système à une **échelle communale**, un risque ayant des conséquences à l'**échelle nationale** (Figure 2.2).

Un autre exemple d'inondation illustre parfaitement la logique d'effets domino en tant que propagateurs d'un risque localisé ayant des conséquences globalisées : l'inondation du métro souterrain de Prague, en 2002. Au mois d'août de cette année, le sud de la région de la Bohême a en effet été exposé à des pluies très intenses pendant environ deux semaines. Epuisant les capacités de rétention des deux rivières *Berounka* et *Vltava*, celles-ci entrent alors en crue à proximité de Prague puis à Prague même à partir du 13 août 2002. Une des conséquences de cette montée des eaux à Prague est celle de l'inondation de son métro souterrain à partir de la fin de journée du 13 août jusque dans la journée du 15 août (Figure 2.3a et Figure 2.3b). En termes d'impact, les trois lignes qui constituent le réseau du métro de Prague ont été touchées comme suit (CHAMRA, 2006) :

- ligne A : 3,8 km (longueur totale de 9,97 km) ainsi que 4 stations (sur 12) ont été inondées ;
- ligne B : 11,2 km (longueur totale de 25,70 km) ainsi que 12 stations (sur 24) ont été inondées ;
- ligne C : 2,3 km (longueur totale de 14,14 km) ainsi que 3 stations (sur 17) ont été inondées.

Pour expliquer l'ampleur de cette crise qui a affecté l'ensemble des lignes du métro de Prague à partir de l'inondation initiale de quelques stations particulières (les 3 stations « *Nádraží Holešovice* », « *Vltavská* » et « *Florenc C* » sur la ligne C et les 4 stations « *Klížkova* », « *Invalidovna* », « *Palmovka* » et « *Florenc B* » sur la ligne B), il a été constaté que **les eaux se sont propagées très loin depuis ces points d'entrée**. En effet, les linéaires de tunnels ont transporté les eaux à plusieurs kilomètres des stations

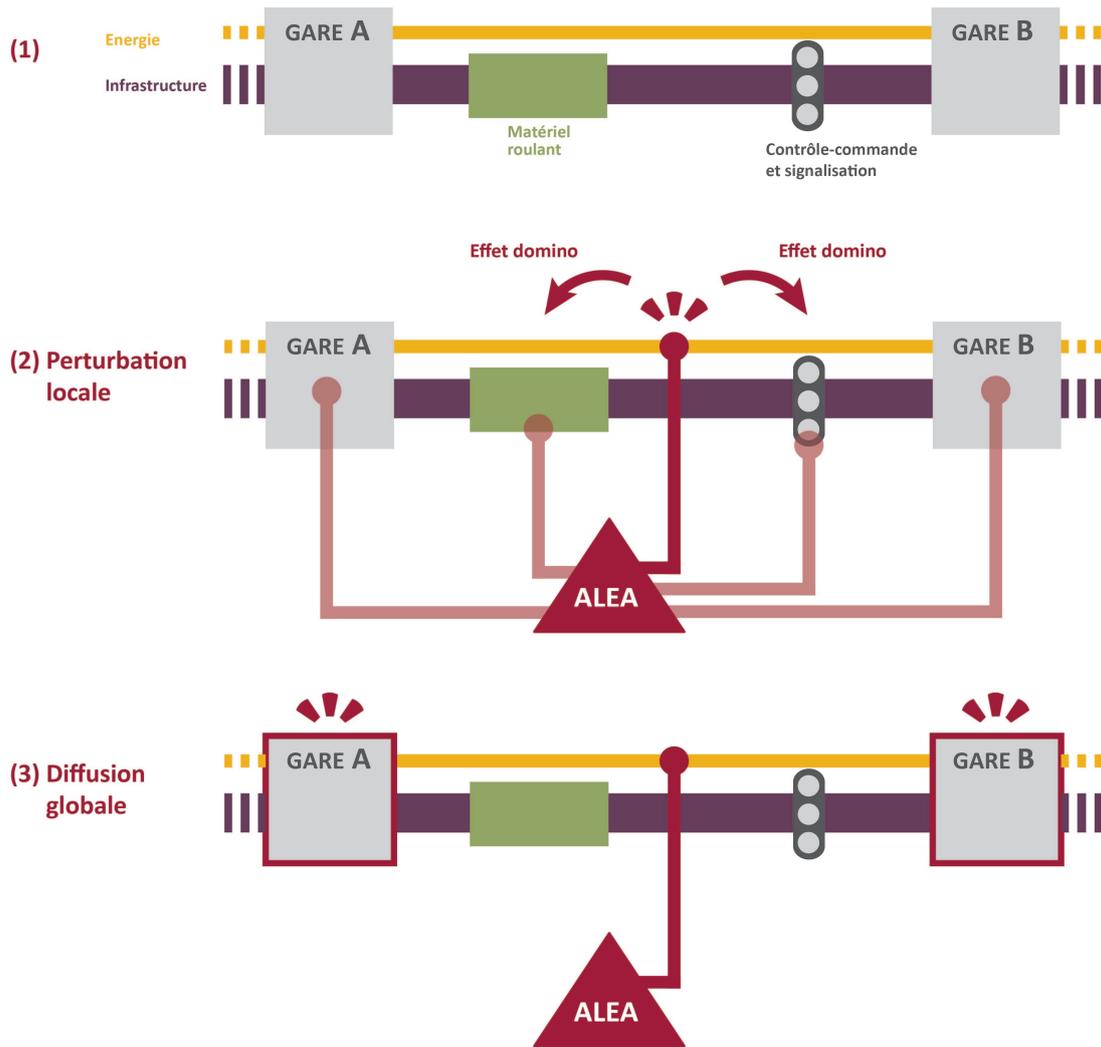


FIGURE 2.2 – Processus d'endommagement d'un système de transport par un aléa et propagation du risque à une échelle globale (source : auteur)

par lesquelles elles se sont infiltrées (JAKOUBEK, 2007). En particulier, au niveau des stations centrales du réseau situées en centre-ville de Prague qui forment un triangle de correspondances (*Mustek, Florenc et Muzeum*) entre les trois lignes, l'inondation s'est diffusée sur l'ensemble du réseau (Figure 2.4). Certains facteurs ont intensifié le phénomène de propagation du risque : la fermeture bien trop tardive de certaines stations jugées hors de la zone inondée, la défectuosité de systèmes de ventilation qui ont été inondés au lieu d'être maintenus bouchés, et enfin les passages de câbles qui étaient non scellés et donc sans la moindre étanchéité ont causé à eux seuls la pénétration de plus de 44 % de l'ensemble du volume d'eau au sein du réseau souterrain (CHAMRA, 2006).



(a) Station « Florenc » durant les inondations du métro de Prague en 2002 (source : zpravy.aktualne.cz) (b) Station « Vltavská » durant les inondations du métro de Prague en 2002 (source : zpravy.aktualne.cz)

FIGURE 2.3 – Conséquences de l'inondation du métro de Prague survenue en 2002

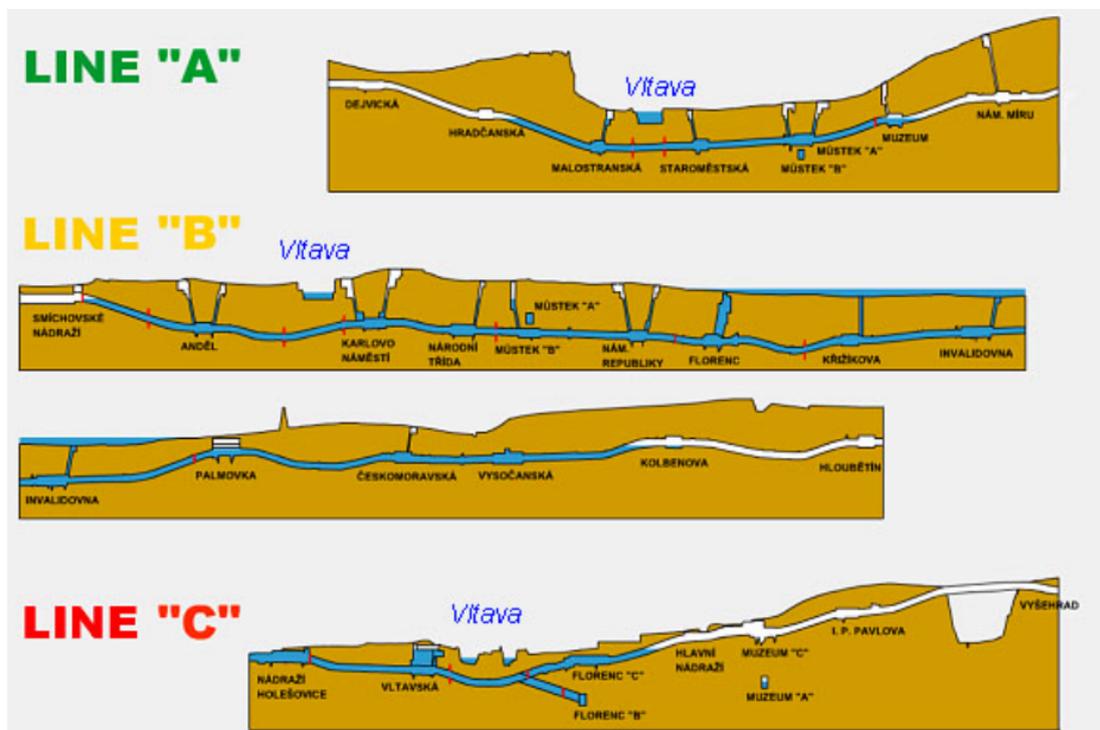


FIGURE 2.4 – Stations et tunnels inondés du métro de Prague en 2002 (CHAMRA, 2006)

Ainsi, la complexité croissante des systèmes urbains génèrent aussi une complexité croissante des mécanismes de défaillances de ceux-ci : complexité due au saut d'échelle spatiale entre celle du risque et celle de ses conséquences; complexité due aux mécanismes eux-mêmes aux origines mul-

tibles, dissociées, potentiellement simultanées et parfois difficilement identifiables. Les « nouveaux » risques et « nouvelles » vulnérabilités mis en avant par (MICHEL-KERJAN, 2003) ont donc engendré de « nouveaux » mécanismes de défaillances par leur origine, leurs dynamiques et leurs conséquences. Ces mécanismes d'effets domino internes exploitent en fait les dépendances entre éléments du système devenant alors vecteurs de propagation du risque (LHOMME, 2012) ou encore des voies préétablies, opportunes pour la propagation d'évènements indirects (KADRI *et al.*, 2014).

Comme l'ont, de plus, montré les deux exemples précédents, les effets domino existent au sein des systèmes de transport guidé faisant face au risque inondation quelle que soit leur configuration d'implantation. Dans cette optique, il apparaît essentiel de prendre en considération les effets domino internes dans les processus d'analyse et de gestion des risques. Quelques définitions sur ces phénomènes de défaillances s'imposent donc.

2.2.2 Définitions et caractéristiques des effets domino

Si les effets domino, en tant que processus de propagation des risques au sein des systèmes urbains tels que les systèmes de transport guidé, sont aujourd'hui pointés du doigt comme source importante de dommages à grande échelle dans le cas du risque inondation, ils ont été reconnus depuis plusieurs décennies dans d'autres domaines que la gestion des risques en milieu urbain.

Selon (KADRI *et al.*, 2011), les sites industriels tels que les industries chimiques, les lieux de stockages de matières dangereuses ou les établissements industriels au sens large ont reconnu l'existence des effets domino depuis 1947 au travers de documents techniques traitant ces évènements. La probabilité d'occurrence de ce type d'évènements ne cesse d'ailleurs de croître depuis cette période en raison du développement de complexes industriels, de l'augmentation de la population mondiale et de l'intensité des catastrophes naturelles.

La littérature scientifique et technique, en particulier dans le domaine industriel, abonde concernant l'épineux sujet de définir ce que sont les effets domino. La nature des systèmes exposés à ce type d'évènements en chaîne et les phénomènes physiques étudiés sont essentiellement la cause de cette multiplicité de définitions (KADRI *et al.*, 2011). (LEES, 1980) définit les effets domino comme un paramètre à prendre en compte dans les aléas qui peuvent survenir suite à une fuite de matière entraînant une aggravation de cet incident initial¹² et les généralise dans (LEES, 2012, p. 340) en indiquant qu'un incident dans une unité donnée d'un système génère des effets domino s'il cause d'autres évènements provoquant des conséquences dans une unité différente du système. (DELVOSALLE, 1996) explique, dans la même veine, qu'un effet domino correspond à un accident initial, pas nécessairement majeur, dans une installation initiale induisant un ou plusieurs accidents secondaires potentiellement majeurs et relatifs à des installations secondaires, ce qui a alors pour effet d'étendre les dommages causés par l'évènement initial.

Les notions de « saut » d'une entité affectée vers une autre entité indirectement affectée et de **chaînage d'évènements dommageables** sont donc au cœur de la définition des effets domino. (GLEDHILL et LINES, 1998) définissent justement un effet domino comme un défaut de confinement ou d'endigement d'un incident (« *a loss of containment incident* ») au sein d'un équipement ayant pour

12. "Factor to take account of the hazard that can occur if leakage of a hazardous material can lead to the escalation of the incident, e.g. a small leak which fires and damages by flame impingement a larger pipe or vessel with subsequent spillage of a large inventory of hazardous material."

conséquence, de façon directe ou indirecte, un incident sur un autre équipement adjacent ou voisin au premier. Dans le domaine industriel, cette propagation d'une unité à une autre est possible par des événements tels que des incendies, des explosions, des projections (KHAN et ABBASI, 1999; CCPS, 2000). Enfin, (COZZANI et SALZANO, 2004; COZZANI *et al.*, 2005) insistent sur le fait que cette propagation de proche en proche entraîne des conséquences globales dépassant l'échelle des équipements impactés et dont la gravité est plus importante que celle des dommages dus à l'évènement initiateur. Les effets domino, du fait de l'importance de leurs impacts potentiels, sont également présents dans la législation européenne au travers de la directive « Seveso III » concernant la maîtrise des dangers liés aux accidents majeurs impliquant des substances dangereuses. La directive indique, en effet, que les effets domino peuvent accroître la probabilité d'accidents majeurs ou aggraver leurs conséquences (COMMISSION EUROPÉENNE, 2012).

Bien que les définitions soient donc nombreuses, elles permettent de dresser quelques caractéristiques communes des incidents ou accidents ayant été générés par effet domino (COZZANI *et al.*, 2005) :

- un évènement **initial** qui **amorce la séquence d'évènements en chaîne** ;
- la **propagation de l'évènement initiateur** due à des **vecteurs d'intensification** des impacts de cet évènement primaire ce qui conduit à l'endommagement d'au moins un autre équipement ;
- un ou plusieurs évènements **secondaires** impliquant **le même système ou un autre système** résultant ainsi en une **chaîne de défaillances** issue d'un évènement initial.

L'**intensification** des conséquences permises par un évènement primaire dues aux effets des évènements secondaires est une spécificité essentielle des défaillances par effet domino (KADRI *et al.*, 2011). Ces défaillances par effet domino ne consistent donc pas en des chaînes ou scénarios de défaillances aux dommages constants. Autrement dit, les dommages provoqués par les évènements perturbateurs pris un à un s'accroissent d'évènement en évènement.

Une synthèse des spécificités propres aux effets domino est établie dans le [Tableau 2.2](#) afin de démontrer qu'ils sont présents dans les risques qui affectent les systèmes de transport guidé. Dans le cadre de cette recherche, les effets domino potentiels provoquant des défaillances successives sont donc étudiés à **l'échelle d'un système de transport guidé donné soumis à un risque inondation**.

2.2.3 La systémique, moyen de modélisation et d'analyse des effets domino

Dans des contextes de crise, c'est-à-dire ici lorsqu'un système urbain tel qu'un système de transport guidé fait par exemple face à un risque inondation, il devient évident de constater la recrudescence de défaillances par effet domino. Ce fait dépasse même l'échelle des systèmes de transport puisque « *les espaces urbains sont devenus des systèmes sociotechniques de plus en plus complexes, où l'enchevêtrement des activités, réseaux, territoires, permet la diffusion très rapide des perturbations* » dont celles-ci sont, de surcroît, issues de « *l'émergence de nouvelles menaces : soit des aléas inédits (panne du réseau électrique ou de l'internet, nucléaire), soit des aléas anciens (inondations tempêtes, risque industriel, terrorisme) dont les dynamiques deviennent complexes à cause des effets domino* » (SERRE, 2015a). L'idée, donc, que la moindre défaillance au sein d'un sous-système puisse entraîner des conséquences en cascade sur l'ensemble du système, voire sur le méta-système qu'est la ville (PIERDET, 2015), est donc aujourd'hui unanimement partagée par les acteurs de l'action urbaine et en particulier les gestionnaires des réseaux. La structure même des réseaux, c'est-à-dire les éléments et l'ensemble des relations qu'ils entretiennent, « *constituent non seulement la porte d'entrée de l'aléa*

TABLEAU 2.2 – Les caractéristiques des effets domino s'appliquent aux risques affectant les systèmes de transport guidé

Caractéristiques des effets domino	Conséquences sur les systèmes de transport guidé
Aléa origine /aléas dérivés de même ou de nature différente (PROVITOLLO, 2005)	<p>↔ De nombreux incidents démontrent le maintien ou le changement de nature entre l'aléa d'origine et les aléas dérivés au sein d'un système de transport guidé :</p> <ul style="list-style-type: none"> — aléas d'origine technologique peuvent provoquer des aléas d'origine technologique (exemple : échauffement anormal au niveau des essieux du matériel roulant, puis rupture de l'axe de rotation des roues, puis défaillance du matériel roulant) ; — aléas d'origine naturelle peuvent provoquer des aléas d'origine technologique (exemple : aléa inondation puis défaillance de composants de signalisation, aléa de vents forts puis rupture de la caténaire).
Amplification du risque dans le temps et dans l' espace (COZZANI <i>et al.</i> , 2005)	<p>↔ Dans le cas de l'inondation du métro de Prague en 2002, l'infiltration des eaux dans quelques stations s'est propagée à plusieurs lignes. Le risque s'est donc amplifié dans l'espace, partant de stations endommagées à des linéaires de tunnels, puis à d'autres stations situées, qui plus est, hors de la zone d'aléa. L'amplification dans le temps est également avérée car en plusieurs jours, l'inondation a atteint de plus en plus de sections du métro.</p>
Saut scalaire (REGHEZZA-ZITT, 2015) : diffusion du risque à des échelles spatiales supérieures	<p>↔ Le cas de l'inondation en 2000 de la ligne à grande vitesse au niveau de Sarry en France révèle ce saut scalaire : d'une perturbation locale (sur une centaine de mètres) au niveau d'une ville, les répercussions se sont faites sentir au niveau national avec un arrêt de la circulation des trains (PAMS CAPOCCIONI <i>et al.</i>, 2015). Cet exemple révèle le saut scalaire d'un risque mu par des effets domino.</p>

(*source initiale du danger*) mais aussi la porte d'entrée du risque (ensemble des perturbations et des dommages) compte-tenu des effets domino pouvant être induits » (SERRE, 2015a). Les effets domino peuvent ainsi être vus comme l'**équivalent de plusieurs risques**, parfois décalés dans le temps et parfois simultanés, qui impactent le système à différents points d'entrée (FEKETE, 2011) ce qui complique de fait la compréhension des processus d'endommagement des systèmes affectés.

La dualité qui représente aujourd'hui un des défis majeurs de conception, gestion et maintenance des systèmes urbains est la suivante : réussir à concilier la nécessité absolue de l'intrication des systèmes (ou infrastructures) critiques à leur échelle (intra-dépendances) et à l'échelle de ville (interdépendances) pour un bon fonctionnement urbain, avec le phénomène potentiellement destructeur de propagation des risques *via* ce tissu d'intra-dépendances et d'interdépendances. Le défi est d'autant plus ardu que la solution extrême qui consisterait à développer une protection absolue à l'égard de tout effet domino au sein et entre les systèmes critiques ne pourrait être économiquement supportée par la société (APOSTOLAKIS et LEMON, 2005), ni même d'ailleurs être faisable (FEKETE, 2011). Ce sont les raisons pour lesquelles l'élaboration de méthodologies représente une solution prometteuse pour la gestion et la maîtrise des risques naturels qui affectent les systèmes critiques urbains tels que les systèmes de transport guidé. L'amélioration de la gestion et de la maîtrise de ces risques passe par l'amélioration de la résilience de ces systèmes, c'est-à-dire par leur capacité à absorber une perturbation comprise ici comme un aléa naturel et à récupérer leurs fonctions à la suite de celle-ci (LHOMME, 2012, p. 77). Ces méthodologies d'analyse doivent donc être **complètes**, en se basant sur les **caractéristiques d'intensité de l'aléa** naturel pour en déterminer les dommages **directs** sur les systèmes, puis les dommages **matériels indirects** c'est-à-dire ceux causés par la **propagation du risque par effet domino** pour enfin en déduire les **conséquences fonctionnelles** c'est-à-dire les possibilités, ou non, d'exploiter le système.

Néanmoins, les effets domino, de par leur omniprésence latente dans tout système et leurs conséquences potentiellement désastreuses, font déjà l'objet d'un grand nombre de modélisations. Dans le domaine industriel, précurseur en matière d'analyse de ce type très particulier de chaîne d'incidents ou accidents, il existe des modèles qui servent à évaluer les effets domino provoqués par des incendies, des explosions, des surpressions ou encore des projections de fragments (KADRI *et al.*, 2011). D'une part, il existe des modèles simplifiés qui reposent sur des valeurs seuils d'intensité d'événements initiaux à partir desquelles un effet domino, c'est-à-dire la génération d'événements secondaires, est possible. D'autre part, il existe des modèles probabilistes dont l'objet est d'évaluer les dommages causés sur des équipements (KADRI *et al.*, 2012a,b). En revanche, peu de méthodologies prennent en compte les risques naturels tels que les inondations ou les séismes dans leur potentialité à initier des chaînes d'accidents par effet domino au sein des systèmes critiques (KADRI *et al.*, 2014). Quelques exemples existent cependant.

(ANTONIONI *et al.*, 2007) utilisent des données disponibles pour l'évaluation de la fréquence et la magnitude d'événements sismiques et en déduisent des probabilités de défaillance et de dommages causés aux équipements critiques industriels. L'objectif est donc d'identifier les chaînes d'événements, c'est-à-dire les événements secondaires, qui peuvent suivre l'événement sismique et d'évaluer les conséquences des chaînes. Or, dans le cas des systèmes de transport guidé faisant face au risque inondation, cette démarche apparaît comme difficilement transposable dans la mesure où les impacts des grands épisodes d'inondation sur le réseau ferré et de son exploitation ne sont pas aujourd'hui répertoriés dans une base de données ; ils sont donc méconnus (PAMS CAPOCCIONI *et al.*, 2013a). Le choix de ce type de méthodologies gourmandes en données d'entrée sur des événements passés est

donc compromis pour le réseau ferroviaire vu qu'ils font l'objet de peu de synthèses spécifiques lors d'inondations où la priorité reste la reconstruction.

(RENNI *et al.*, 2009) développent une procédure pour l'évaluation quantitative de scénarios d'accidents générés par la foudre sur des sites industriels à partir d'une caractérisation des événements naturels. Là encore, la procédure nécessite des données d'entrée relatives à l'aléa naturel, des données de fréquence et d'intensité, qui ne sont pas ou peu disponibles dans le cas de cette recherche à savoir le risque inondation affectant des systèmes de transport guidé. Il est, enfin, essentiel de constater que tous ces modèles ont une approche systémique en considérant à chaque fois les systèmes dans leur globalité, leur complexité, leurs interactions et leur structure organisationnelle.

(KADRI et CHÂTELET, 2013) dressent une revue très complète des méthodologies et logiciels existants pour la modélisation et l'analyse des effets domino dans le cas de sites industriels. Ces modèles et outils servent donc à déterminer les effets domino issus de phénomènes naturels ou physiques tels que des séismes, la foudre, des explosions ou des incendies. Ils sont essentiellement basés sur des analyses statistiques et probabilistes à l'aide d'outils informatiques tels que MAXCRED (*MAXimum CREDible accident analysis*) (KHAN et ABBASI, 1997), FREEDOM (*FREquency Estimation of DOMino accidents*) (ABDOLHAMIDZADEH *et al.*, 2010) ou bien DOMIFFECT (*DOMIno eFFECT*) (KHAN et ABBASI, 1998). D'autres modèles s'attachent avant tout à identifier les scénarios potentiels de défaillances en chaîne à partir d'une énumération exhaustive (DOMINO XL) (DELVOSALLE *et al.*, 2002) voire d'une spatialisaiton des éléments exposés (*MiniFFECT pour MINImization of domino eFFECT*) (LEE *et al.*, 2005) pour étudier la vulnérabilité globale d'une installation.

Néanmoins, dans le cadre du problème qui incombe à cette recherche sur l'analyse des effets domino provoqués par un risque inondation au sein d'un système de transport guidé, en tant qu'exemple de système technico-fonctionnel urbain, ces modèles existants ne sont pas transposables pour deux raisons majeures.

La première, évoquée plus haut, relève d'un problème de disponibilités de données relatives à la fois à l'aléa naturel dont il est difficile, lors d'évènements pluvieux affectant les systèmes ferroviaires, de savoir exactement son intensité (hauteurs d'eau, débits d'eau, durée de l'aléa...), et à la phase post-aléa où les dommages constatés et les reconstructions réalisées ensuite ne font pas l'objet de synthèses spécifiques. Il y a donc d'importantes lacunes aujourd'hui sur les retours d'expériences à l'international lors d'inondations affectant les systèmes de transport tant sur la phase pré-aléa de préparation et d'anticipation, que pendant l'aléa sur le phénomène naturel lui-même et que sur la phase post-aléa en matière de reconstruction des systèmes.

La seconde raison majeure, en corollaire à la première, se base sur la difficulté d'interprétation des analyses des données potentiellement exploitables. En effet, si tant est que l'on puisse récupérer des données relatives à l'aléa inondation afin d'en caractériser son intensité, il reste très complexe d'en déduire une évaluation quantitative ou qualitative des dommages que cet aléa est susceptible d'engendrer. Il n'existe actuellement pas, ou peu, d'équivalent de fonctions de ruine ou courbes de vulnérabilité des composants d'un système de transport telles qu'elles peuvent exister dans le domaine du génie civil pour la vulnérabilité sismique des bâtiments (MEKKI, 2015; VALENCIA DAVID, 2006; DUCO, 2012) ou celle d'ouvrages d'art de protection comme les digues (PEYRAS, 2002) par exemple. Encore moins donc dans le cas de défaillances successives de composants par effet domino où la vulnérabilité globale est difficilement appréhendable de cette façon.

Ainsi, une démarche méthodologique doit être construite pour l'analyse de la résilience des systèmes

de transport guidé et l'approche retenue dans cette recherche est celle de la **systemique**. La théorie des systèmes permet la modélisation de ces derniers. C'est en effet par l'intermédiaire de modèle en tant qu'abstraction qui simplifie le système réel étudié (COQUILLARD et HILL, 1997) selon une synthèse d'éléments de connaissance concernant ce système (JØRGENSEN, 2012) qu'il devient possible d'obtenir une intelligibilité suffisamment fidèle du système (ALLAIRE, 2012, p. 161) pour en percevoir la totalité des phénomènes qui le caractérisent et qui le perturbent. « *La modélisation est le principal et sans doute le premier des outils dont nous disposons pour étudier le comportement des grands systèmes complexes* »¹³ (SIMON, 1990). Cette importance de l'analyse systemique pour étudier l'urbain est d'ailleurs confirmée par une littérature conséquente (SERRE, 2015a) et la nécessité de l'analyse des effets domino provoqués au sein d'un système de transport prône de surcroît ce recours à la systemique. La question consiste maintenant à **élaborer de telles méthodologies aptes à prendre en compte les effets domino dans le cas où un système de transport guidé fait face à un risque inondation** dans le but d'anticiper et de diagnostiquer les conséquences.

Synthèse

Lorsque les systèmes de transport guidé sont affectés par des aléas naturels comme l'inondation, les importantes perturbations provoquées sont fréquemment imputables à des mécanismes de défaillances par effet domino. Les effets domino sont constitués d'un évènement initial qui joue le rôle d'amorçage d'une séquence d'évènements en chaîne, en l'occurrence des défaillances, puis d'un processus de propagation de cet évènement permis par l'existence de vecteurs de diffusion, en l'occurrence les connexions entre les composants du système. L'effet domino conduit alors de proche en proche à une chaîne de défaillances internes. D'une ou de plusieurs perturbations initiales locales, les effets domino sont alors susceptibles d'engendrer un endommagement généralisé du système à une échelle globale. Leur analyse est donc incontournable afin de limiter les conséquences qu'ils sont susceptibles de générer. La théorie des systèmes est mobilisée car elle permet leur étude à partir d'une modélisation.

2.3 Élaboration d'une démarche méthodologique multi-aléas comme réponse à un besoin scientifique et opérationnel

Le haut degré de complication des défaillances à la fois du point de vue de leur mode d'occurrence, de leur manière de propagation et de leur ampleur au sein du système apparaît comme dominant dans le cas d'un système de transport guidé soumis au risque inondation. Une démarche méthodologique est donc essentielle à développer pour appréhender ces mécanismes de défaillances localisées aux conséquences globalisées sur le système.

2.3.1 Besoins de la démarche méthodologique proposée

Avant tout développement théorique, il est important de caractériser le besoin de la démarche méthodologique souhaitée.

13. "Modeling is a principal — perhaps the primary — tool for studying the behavior of large complex systems."

2.3.1.1 Besoin d'analyses multi-risques et multi-systèmes de transport guidé

Plus qu'un besoin de la démarche méthodologique, ce travail constitue un préalable à la démarche en mettant en relief la vulnérabilité d'un important panel de systèmes de transport guidé face à un important panel d'aléas naturels (GONZVA *et al.*, 2014b).

La vulnérabilité des systèmes de transport guidé face à différents aléas naturels est avérée et clairement démontrée dans la part d'incidents imputables à des conditions météorologiques intenses. Dans la plupart des pays européens, ces aléas naturels concernent ordinairement la neige, les variations de températures (basses et hautes) et les phénomènes liés aux aléas hydrologiques (pluies intenses, crues). C'est la raison pour laquelle il apparaît pertinent d'établir un **état de l'art** préliminaire le plus large possible quant à cette vulnérabilité empiriquement constatée à l'échelle internationale. Cet état de l'art initial est **qualitatif**. L'objectif est double : fournir une évaluation initiale de la vulnérabilité d'un panel de systèmes de transport guidé face à un panel d'aléas naturels et identifier les couples système de transport guidé -- aléa à traiter prioritairement au vu de l'importance du risque observé.

Concernant le premier objectif, le panel de systèmes de transport guidé retenus reprend les systèmes traditionnels en se calquant sur le réseau ferroviaire en France : transports **urbains** (tramways, métros), transports **régionaux** (lignes express), transports **régionaux** (lignes dites « classiques ») et transports **nationaux rapides** (lignes à grande vitesse). Il est également important d'intégrer d'ores et déjà l'aspect relatif à la configuration d'implantation du système de transport : **surface** ou en **souterrain**. En effet, pour un aléa donné, ces systèmes ne sont pas exposés de la même façon selon qu'ils sont positionnés au-dessus ou au-dessous du sol comme cela peut être le cas pour les aléas de vents forts ou de basses températures. En termes d'aléas, **onze** sont identifiés suite à une revue de littérature diverse se basant sur des documents techniques, des retours d'expériences, des articles de presse... mentionnant les impacts de ces aléas sur les systèmes de transport guidé.

Ainsi, le panel d'aléas est le suivant : **séismes, inondations, neige, hautes températures, basses températures** et phénomène de **gel, vents forts, feuilles mortes, chutes d'éléments** (incluant roches, arbres...), **sable et poussières, incendies et variations d'humidité**. Les résultats sont commodément présentés sous forme d'une matrice qui croise les deux panels établis afin de caractériser l'impact des aléas sur les systèmes de transport pour en évaluer qualitativement leur vulnérabilité (Figure 2.5).

Cette caractérisation de la vulnérabilité se décline en quatre niveaux relatifs à l'impact sur l'exploitation du système de transport :

- *non significatif* (blanc) : pas ou peu d'atteintes ;
- *faible* (jaune) : atteintes de composants impliquant des temps de retards très courts, de l'ordre de quelques minutes ;
- *moyen* (orange) : atteintes de composants impliquant des temps de retards moyens, jusqu'à plusieurs heures ;
- *fort* (rouge) : atteintes de composants impliquant des temps de retard voire d'arrêt importants, jusqu'à au moins plusieurs jours.

Certains couples système de transport guidé – aléa sont qualifiés avec deux niveaux (case bicolore) indiquant alors des tendances sur l'impact lié à l'exploitation. D'autres impacts (en vert) indiquent que le système, de par sa conception, présente des avantages tels qu'il est partiellement voire totalement préservé d'un aléa donné. L'ensemble de ces niveaux ont été déterminés à partir d'une revue

		SYSTEMES DE TRANSPORT GUIDE							
		Urbains				Régionaux		(Inter)nationaux classiques	(Inter)nationaux rapides
		Tramway		Métro (manuel/automatique)		RER, Transilien, ...	TER	Trains grandes lignes (Intercités,...)	LGV
		surf.	sout.	surf.	sout.				
A L É A N A T U R E L	Séismes	Orange	Rouge	Rouge	Rouge	Rouge	Rouge	Rouge	Rouge
	Inondations	Orange	Rouge	Orange	Rouge	Rouge	Rouge	Rouge	Rouge
	Neige	Jaune	Vert	Jaune	Vert	Rouge	Orange	Rouge	Rouge
	Basses températures / Gel	Orange	Jaune	Orange	Jaune	Jaune	Orange	Orange	Orange
	Chutes d'éléments	Orange	Vert	Orange	Vert	Orange	Orange	Orange	Orange
	Sable et poussière	Jaune	Jaune	Jaune	Jaune	Blanc	Orange	Orange	Orange
	Feux environnants	Blanc	Blanc	Blanc	Blanc	Orange	Orange	Orange	Orange
	Vents forts	Blanc	Vert	Blanc	Vert	Blanc	Orange	Orange	Orange
	Hautes températures	Jaune	Blanc	Jaune	Blanc	Jaune	Orange	Orange	Orange
	Feuilles mortes	Jaune	Vert	Jaune	Vert	Jaune	Jaune	Orange	Orange
	Variations d'humidité	Blanc	Blanc	Blanc	Blanc	Blanc	Jaune	Jaune	Jaune

FIGURE 2.5 – Matrice de vulnérabilité multi-systèmes & multi-aléas (GONZVA *et al.*, 2014b)
Impacts sur l'exploitation des aléas naturels : non significatif (blanc), faible (jaune), moyen (orange) et fort (rouge); surf. : système positionné en surface; sout. : système positionné en souterrain

de littérature contenant des informations relatives à l'impact matériel (emportement de ballast, voie ferrée détruite, pont ferroviaire écroulé, poteaux supportant la caténaire renversés... et les coûts de reconstruction associés à ces impacts) et fonctionnel (retards de plusieurs minutes à plusieurs heures, interruption de la circulation de plusieurs jours à plusieurs semaines affectant plus ou moins d'usagers selon la fréquentation du système étudié...) plus ou moins importants lors de ces aléas.

Par exemple, dans le cas du risque sismique vis-à-vis des lignes à grande vitesse, la matrice de vulnérabilité indique une atteinte importante (case rouge) sur l'exploitation du système de transport. Cette situation s'illustre, entre autres, avec le séisme de 2004 de Chûetsu au Japon qui a eu de graves conséquences sur le système de train à grande vitesse *Shinkansen*. Ce séisme de magnitude 6,8 sur l'échelle de Richter a en effet entraîné des dommages sur plusieurs systèmes : le déraillement d'un train (premier cas de déraillement d'un train à grande vitesse au Japon), l'endommagement du tunnel ferroviaire *Uonuma* et l'endommagement d'ouvrages d'art aériens (Figure 2.6).

Autre exemple d'information contenue dans la matrice de vulnérabilité : l'impact moyen (case orange) du risque de vents forts sur les systèmes de transport à vitesse classique ou grande vitesse. De nombreux exemples à travers le monde démontrent, en effet, empiriquement la vulnérabilité des systèmes de transport face à ce risque naturel (Figure A.1a et Figure A.1b). Ce risque est d'ailleurs étudié depuis les années 1970 dans les pays d'Asie dans lesquels les lignes sont fortement exposées et a ensuite été internationalement analysé avec le développement de la grande vitesse ferroviaire (USHIJIMA, 2006; KUNIEDA, 1972).

Cette matrice, dont l'objet est bien de fournir une analyse qualitative initiale, permet de déterminer quelques tendances quant à la vulnérabilité des systèmes de transport face aux aléas naturels.

Premièrement, on constate que la **vulnérabilité semble croître avec la vitesse d'exploitation du sys-**



(a) Pont endommagé



(b) Tunnel endommagé



(c) Déraillement d'un train

FIGURE 2.6 – Conséquences du séisme de Chūetsu au Japon, survenu en 2004, sur la ligne à grande vitesse *Shinkansen* (GONZVA et GAUTIER, 2016)



(a) Renversement d'un train en Suisse suite à d'importantes rafales de vent, 2007 (Source : *Medienbericht der Kantonspolizei Appenzell Innerrhoden*)



(b) Renversement d'un train en Chine suite à d'importantes rafales de vent, 2007 (JIN *et al.*, 2012)

FIGURE 2.7 – Exemples de renversement de train dû au risque de vents forts

tème. En effet, des tramways (première colonne de la Figure 2.5) aux systèmes à grande vitesse (dernière colonne de la Figure 2.5), il apparaît que pour un aléa donné, l'impact de celui-ci sur l'exploitation du système de transport est d'autant plus important que la vitesse d'exploitation est grande. Cette tendance ressort bien en observant le gradient global de couleurs passant du blanc vers le rouge à mesure que l'on lit le tableau de gauche à droite.

Deuxièmement, une tendance peut être mentionnée à partir de cette matrice : pour un aléa donné, **le positionnement en souterrain ou en surface de certains systèmes de transport influence leur vulnérabilité.** Typiquement, lorsqu'ils se réalisent, les aléas de chutes d'éléments (arbres, rochers...) ou de feuilles mortes ont des conséquences potentielles bien plus importantes sur l'exploitation de systèmes en surface que de systèmes en souterrain. De fait, la configuration souterraine offre une protection physique des systèmes ferroviaires face à certains aléas. Ainsi, pour un aléa donné, le souterrain a une influence sur le degré d'impact sur l'exploitation du système.

2.3.1.2 Besoin d'analyse systémique des risques affectant les systèmes de transport guidé

La logique systémique de la démarche méthodologique est indispensable pour plusieurs raisons.

Premièrement, dans une logique d'amélioration de la résilience des systèmes de transport guidé, c'est-à-dire de leur capacité à fonctionner malgré la perturbation de certains composants puis à les remettre en service de manière à pouvoir retrouver un fonctionnement optimal le plus rapidement possible, il est obligatoire d'**intégrer tous les aléas qui peuvent affecter le fonctionnement de ces systèmes.** Pour tous types de systèmes critiques, ces aléas peuvent notamment être institutionnels, naturels, sociaux, techniques (KRÖGER, 2008) ce qui est parfaitement applicable aux systèmes de transport guidé (Figure 2.8). Ces aléas externes aux systèmes de transport semblent d'ailleurs globalement moins étudiés que des aléas internes aux systèmes. (LEGROS, 2009) considère le facteur humain comme composante à part entière du système et l'intègre donc dans son approche pour la maîtrise des risques dans les systèmes de transport. Le risque lié aux erreurs humaines est donc inclus au sein du système et devient, de fait, un aléa dont les origines sont internes. (BEUGIN, 2006) s'intéresse à la sécurité des systèmes de transport dans le cas d'aléas qui peuvent survenir en lien avec l'exploitation ; ces travaux permettent une évaluation de l'ensemble des fonctions de sécurité du système telles que le freinage d'urgence des trains. Là encore, les événements impactant ont une origine interne au système, c'est-à-dire la défaillance de certains composants. **Il ne semble donc pas exister de méthodologies, de modèles ou encore d'outils communs qui analysent les effets d'aléas totalement extérieurs aux systèmes** tels qu'un aléa naturel, un aléa technologique ou encore un acte terroriste.

Deuxièmement, comme indiqué précédemment, l'enjeu est d'avoir une **approche globale des risques** c'est-à-dire de l'occurrence de l'aléa ayant ses caractéristiques d'intensité données, puis des impacts matériels directs sur les systèmes, puis des dommages matériels indirects c'est-à-dire ceux causés par la propagation du risque par effet domino pour enfin en déduire les conséquences fonctionnelles c'est-à-dire les possibilités, ou non, d'exploiter le système. Le but de la démarche méthodologique est donc aussi systémique dans la mesure où elle ne doit pas chercher à déterminer précisément les processus d'endommagement spécifiques à tout composant du système de transport (endommagement du rail, du matériel roulant...) mais bien les conséquences sur les possibilités de faire fonctionner le

14. Les facteurs représentés sur la figure ne sont pas exhaustifs. Il en existe sans doute d'autres. L'objet de cette figure est en fait d'illustrer la multiplicité des facteurs ayant une influence plus ou moins forte dans l'amélioration de la résilience d'un système urbain. Et donc la nécessité de les prendre tous en compte.

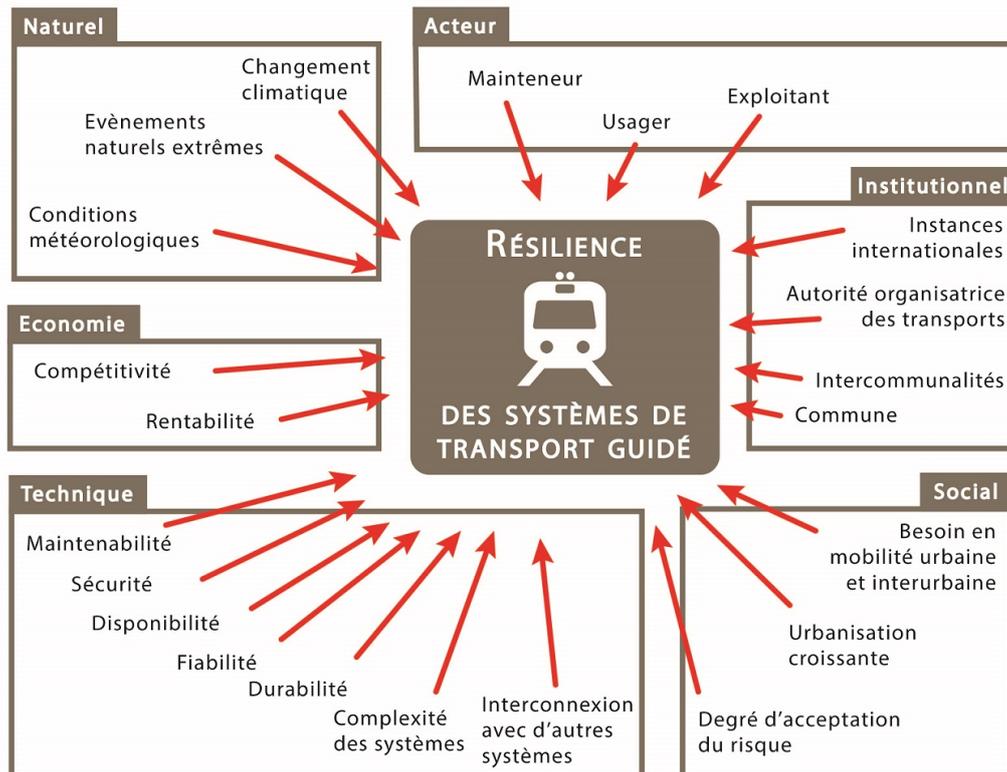


FIGURE 2.8 – Ensemble des facteurs ayant une influence sur la résilience des systèmes de transport guidé ¹⁴(source : auteur)

système suite au dysfonctionnement de tels composants.

Dès lors, la logique systémique prônée adopte le triptyque élaboré par (GLEYZE, 2005) pour exprimer les formes d'endommagement, distinctes mais souvent liées (MESCHINET DE RICHEMOND et REGHEZZA, 2010), que peut subir un système technico-fonctionnel tel qu'un système de transport guidé. La première forme d'endommagement concerne les dommages **matériels**, c'est-à-dire l'atteinte à l'intégrité physique du système ou à une partie du système qui peut aller d'une dégradation légère à une destruction complète. La deuxième forme de dommage peut être **fonctionnelle** dans la mesure où le système, ici de transport, n'est plus capable d'assurer ses fonctions de mobilité des personnes. Là aussi, l'endommagement fonctionnel est graduel et peut aller de légers dysfonctionnements à une interruption totale du service fourni. Or, (GLEYZE, 2005) met en avant le fait qu'un système endommagé fonctionnellement n'a pas nécessairement subi préalablement des dommages matériels et qu'un système même matériellement endommagé peut continuer à fonctionner. Il théorise alors un troisième type de dommage, intermédiaire aux deux autres, dans le cas des réseaux de transport : l'endommagement **structurel**. En effet, l'endommagement matériel de l'infrastructure d'un réseau peut donner naissance à une modification de sa trame, c'est-à-dire de sa structure, et dégrader ainsi son potentiel relationnel (MESCHINET DE RICHEMOND et REGHEZZA, 2010). Il démontre ainsi le rôle de la structure organisationnelle du système, c'est-à-dire son maillage composé d'interconnexions, de dépendances unilatérales ou bilatérales entre éléments, qui peut absorber ou accroître les effets de dommages matériels. Ainsi, l'endommagement structurel apparaît comme un niveau intermédiaire essentiel pour comprendre les mécanismes en jeu dans les chaînes d'endommagement induites par un aléa initial (REGHEZZA et GLEYZE, 2007).

Ce triptyque d'endommagements emboîtés, qui s'associent chacun à une forme de vulnérabilité du système (MESCHINET DE RICHEMOND et REGHEZZA, 2010), est une grille d'analyse tout à fait oppor-

tune dans l'analyse des effets du risque inondation sur les systèmes de transport guidé (Figure 2.9) et en lien avec l'enjeu de la démarche méthodologique entreprise. A partir, en effet, de dommages **matériels** de certains éléments du système de transport suite à l'occurrence d'une inondation, des modifications sont générées au sein de sa structure : indisponibilité de certains composants, propagation du risque par effet domino induisant la défaillance indirecte d'autres composants... Ces altérations organisationnelles représentent les dommages **structurels** du système, se traduisant alors par des dommages **fonctionnels** : vitesse de trains réduites, gares non desservies...

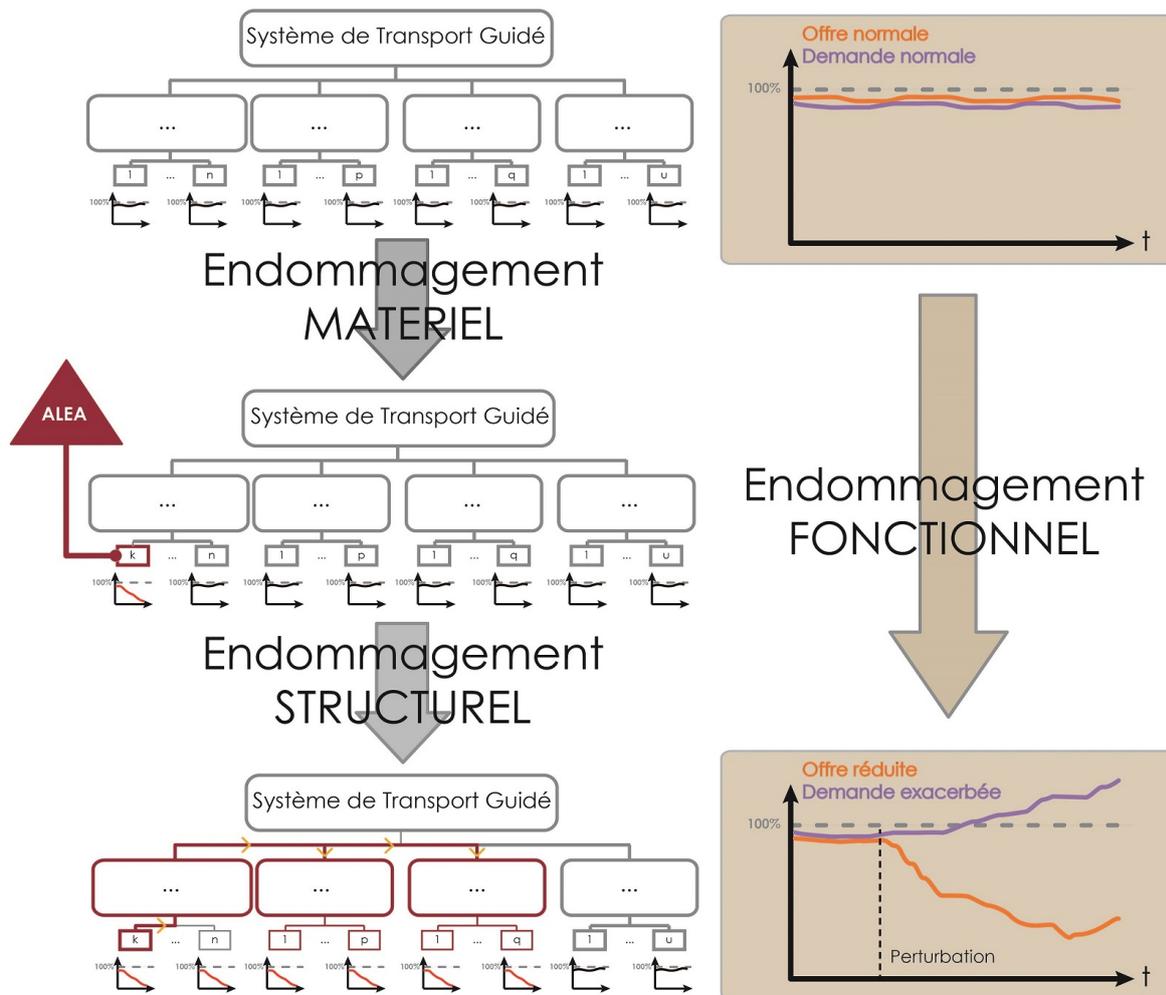


FIGURE 2.9 – Triptyque de dommages (matériel, structurel, fonctionnel) issus de (GLEYZE, 2005) appliqué à un système de transport guidé (source : auteur)

2.3.1.3 Besoin d'une démarche d'aide à la réflexion à toutes les étapes de vie d'un système de transport

Parmi les éléments de réponses que doit pouvoir fournir la démarche méthodologique en matière d'amélioration de la résilience des systèmes de transport guidé face au risque inondation, certains concernent les étapes de vie de ces systèmes.

Dans un premier temps, la démarche doit être capable d'**aider à la réflexion** sur la conception d'un système de transport exposé à un risque naturel, en particulier le risque inondation. Elle doit permettre d'orienter la conception, par le biais de raisonnements justifiés, de façon à réduire le niveau d'exposition au risque du système. **La conception doit donc intégrer les enjeux que représentent**

les aléas naturels susceptibles d'affecter les systèmes de transport par l'intermédiaire de stratégies structurelles ou organisationnelles. Par exemple, par une protection accrue de parties critiques au fonctionnement du système ou alors en incluant des redondances de certains composants cruciaux, il peut être possible d'améliorer la résilience du système global.

Dans un deuxième temps, la démarche doit pouvoir fournir des éléments d'**aide à l'exploitation** d'un système de transport guidé soumis à un risque naturel tel que le risque inondation. L'enjeu étant de pouvoir connaître l'endommagement matériel, structurel et surtout fonctionnel subi par le système afin d'en déduire son degré de fonctionnement. Plus précisément, **la méthodologie doit être apte à caractériser le fonctionnement en mode dégradé d'un système de transport guidé lorsqu'il fait face à un risque.**

Dans un troisième temps, la démarche doit permettre une **aide pour la maintenance** d'un système de transport guidé pouvant subir des risques naturels de type inondation. Là aussi, **les stratégies de maintenance doivent intégrer les enjeux que représentent les aléas naturels susceptibles d'affecter les systèmes de transport** par l'intermédiaire de mesures tant structurelles et organisationnelles. Par exemple, parmi ces stratégies envisageables, l'idée peut être de considérer les composants sensibles comme ayant une durée de vie particulièrement limitée et devant donc faire l'objet d'un remplacement plus fréquent que les autres éléments du système. Dès lors, la maintenance serait adaptée au niveau d'exposition et donc de vulnérabilité du système étudié.

2.3.2 Choix retenu comme évènement perturbant le système : le risque inondation

Premièrement, la matrice de vulnérabilité présentée précédemment (cf. 2.3.1.2) révèle que d'un point de vue global et qualitatif, le risque inondation représente un de ceux qui impactent tous les systèmes de transport guidé quelle que soit leur capacité ou vitesse d'exploitation. Tramways, métros, lignes ferroviaires classiques et à grande vitesse apparaissent tous fortement endommageables par le risque inondation, quelle que soit leur configuration d'implantation. Le risque inondation est à l'origine de nombreux incidents sur le réseau ferré français au cours des deux derniers siècles et les archives ferroviaires sont très riches en données historiques sur les événements inondations ayant impacté le réseau à la fois lors de sa construction et durant son exploitation (PAMS CAPOCCIONI *et al.*, 2013a). Parmi les événements les plus emblématiques, il est possible de citer l'épisode de mai-juin 1856 qui fut sans doute le premier à impacter gravement le jeune réseau à une échelle régionale (bassins de la Loire et du Rhône en particulier) ; les inondations de juin 1875 sur la Garonne, de l'automne 1907 dans le Sud, ou de janvier 1910 sur le bassin de la Seine et du Haut-Rhône ; puis tout au long du XX^{ème} siècle, en 1930 sur le Tarn et la Garonne, en 1940 en Roussillon, en 1955 sur le Rhône, en 1999 sur l'Aude ou encore en 2003 sur le Rhône (PAMS CAPOCCIONI *et al.*, 2013a). Le risque inondation n'a donc rien de nouveau dans le domaine du transport public et pourtant, il reste encore aujourd'hui extrêmement dommageable avec des conséquences économiques, physiques, sociales et environnementales fortes.

Deuxièmement, le risque inondation dans une approche de résilience technico-fonctionnelle des systèmes urbains et *a fortiori* de résilience urbaine a récemment fait l'objet d'un grand nombre de recherche. Que ce soit sur le service de gestion déchets (BERAUD, 2013), sur les ouvrages de protection (VUILLET, 2012; SERRE, 2005), sur les services urbains (TOUBIN, 2014), sur les quartiers (BALSELLS, 2015) ou même sur l'ensemble des réseaux urbains (LHOMME, 2012), ces études laissent raisonnablement croire que si l'approche a fonctionné avec succès sur ces systèmes urbains, elle peut être

transposable et donc applicable aux systèmes de transport guidé. Cette recherche s'inscrit ainsi dans cette même approche scientifique.

Troisièmement, dans une vision plus internationale et planétaire, le risque inondation en milieu urbain représente actuellement un défi majeur en matière de développement des villes¹⁵ (JHA *et al.*, 2012). La prédominance de ce risque est, en effet, extrêmement accrue représentant le risque le plus fréquent parmi toutes les catastrophes naturelles¹⁶ et concernant en France 13 300 communes dont 300 grandes agglomérations¹⁷. Ainsi, un habitant sur quatre et un emploi sur trois sont potentiellement exposés au risque d'inondation (MEDDE, 2012).

Synthèse

La modélisation des défaillances successives dues à des effets domino internes à un système de transport guidé soumis à des risques naturels est indispensable au vu de leurs effets systémiques. En ce sens, une démarche méthodologique d'analyse est proposée pour permettre de caractériser la vulnérabilité de plusieurs types de systèmes de transport guidé soumis à plusieurs types de risques naturels, de déterminer cette vulnérabilité de façon globale depuis les dommages matériels jusqu'aux conséquences fonctionnelles sur l'exploitation des systèmes, et d'apporter une aide à la réflexion en matière de gestion des risques tant en phase de conception, d'exploitation et de maintenance d'un système. Le risque inondation est étudié dans ce travail.

2.4 Construction d'un cas d'application pour la recherche entreprise

2.4.1 Objectifs du cas d'application

Tout comme il est nécessaire de fixer un risque auquel appliqué la démarche méthodologique et illustrer ses potentialités, le système de transport en tant qu'objet d'application de la démarche doit être déterminé. En termes de cahier des charges fonctionnel, là aussi le choix du système de transport guidé qui sert de cas d'application de la méthodologie doit respecter deux critères importants.

Premièrement, le système doit être suffisamment **générique** pour couvrir l'ensemble des systèmes de transport guidé. Cette généralité est, en effet, essentielle au vu de l'enjeu de la recherche qui est d'obtenir une approche globale des risques c'est-à-dire de l'occurrence de l'aléa, puis des impacts matériels directs et indirects par effet domino sur les composants, pour enfin en déduire les conséquences sur l'exploitation du système. Il faut donc que le système étudié dans cette recherche possède l'ensemble des composants essentiels au fonctionnement d'un système de transport guidé sans chercher à inclure des spécificités techniques propres à tout projet de transport. De plus, cette généralité de l'objet d'étude permet aussi d'étudier l'ensemble des systèmes de transport guidé qui sont chacun impacté par le risque inondation, comme l'a montré la matrice préliminaire de vulnérabilité face aux risques naturels (Figure 2.5, page 88).

Deuxièmement, le système étudié doit permettre d'apporter des éléments d'**aide à la réflexion relati-**

15. "Urban flooding is a serious and growing development challenge".

16. EM-DAT : The OFDA/CRED International Disaster Database — www.emdat.be

17. <http://www.risquesmajeurs.fr/le-risque-inondation>

vement à la configuration d'implantation des systèmes de transport guidé soumis à des conditions météorologiques afin d'intégrer ce facteur de positionnement dans leur conception. Il est, en effet, démontré que l'implantation d'un système de transport en souterrain ou en surface a un rôle sur sa propension à subir des dommages suite à l'occurrence d'un aléa naturel (Figure 2.5, page 88). Il semble donc intéressant de distinguer les systèmes selon leur configuration d'implantation dans le but de caractériser leur sensibilité propre aux aléas naturels d'une part, et de mettre en avant de quelle manière la configuration d'implantation d'un système peut être un facteur de réduction, d'intensification ou de diffusion du risque généré par l'occurrence d'aléas naturels d'autre part. Par rapport à la matrice préliminaire de vulnérabilité d'un panel de système de transport guidé face à un panel de risques naturels, les deux configurations d'implantation sont élargies à trois configurations d'implantation : les systèmes implantés en **souterrain**, en **surface** et en **aérien**. Cette distinction supplémentaire permet, en effet, de couvrir un plus grand champ de possibilités de conception de système de transport et d'être en concordance avec l'importante diversité des systèmes à travers le monde.

De surcroît, la prise en considération de cet élément d'implantation, qui est en réalité tout à fait en lien avec les questions d'aménagement de la ville, s'inscrit dans des recherches très actuelles. Parmi ces recherches, tout d'abord, est étudiée la notion d'intégration urbaine et architecturale des infrastructures aériennes de transport en prenant en compte l'ensemble des avantages et contraintes que recèlent ce type d'implantation (RICHARD *et al.*, 2016). Sont également traités les couvertures d'infrastructures routières et ferroviaires, dont le rapport à l'environnement urbain questionne les rapports complexes entre l'urbanisme souterrain et l'urbanisme de surface (FUND MAURIN, 2016). Enfin, le projet national Ville 10D-Ville d'idées¹⁸ pour « Différentes Dimensions pour un Développement urbain Durable et Désirable Décliné Dans une Dynamique « Dessus / Dessous » » s'intéresse à la contribution du sous-sol au développement urbain durable en démontrant, tant économiquement que sur l'aspect social, environnemental, juridique ou encore architectural, que la ressource sous-sol est une alternative crédible au seul aménagement de la surface.

Ainsi, l'objectif de la démarche méthodologique est aussi de fournir une **approche comparative de la résilience des systèmes de transport déclinés selon leur trois configuration d'implantation classique**, en souterrain, en surface et en aérien.

2.4.2 Caractéristiques du cas d'application : décomposition en sous-systèmes

Le cas d'application de la démarche méthodologique, ou plutôt les cas d'application, se décline en trois systèmes de transport guidé : un système aérien, de surface et souterrain.

Pour déterminer l'architecture de ces systèmes de transport qui servent de cas d'étude à la méthodologie, une analyse structurelle est réalisée pour identifier les composants du système et les éléments de son environnement. Ces derniers sont établis à partir des Spécifications Techniques d'Interopérabilité (STI), issues de directives européennes (directive 96/48/CE relative à l'interopérabilité du système ferroviaire transeuropéen à grande vitesse, directive 2001/16/CE sur l'interopérabilité du rail conventionnel et directive 2004/50/CE) relatives à l'interopérabilité du système ferroviaire européen. L'interopérabilité est définie comme la capacité de rouler indistinctement sur n'importe quelle section du réseau ferroviaire d'Europe. Cette logique est donc similaire à celle portée dans cette recherche dont le but est de déterminer les éléments essentiels au bon fonctionnement d'un système de transport guidé afin de déterminer les conséquences de l'impact d'un risque inondation. Ainsi,

18. <http://www.ville10d.fr/>

le découpage du système ferroviaire opéré dans les STI sert de base à la décomposition du système étudié, complétée par d'autres composants considérés comme nécessaires à son fonctionnement.

Le système étudié, sans distinction selon la configuration d'implantation, se divise en huit **sous-systèmes** (Figure 2.10) :

- Contrôle-commande et signalisation : permet de garantir la circulation des trains en toute sécurité ;
- Énergie : correspond à la fourniture en énergie de traction du matériel roulant ;
- Gare ;
- Infrastructure : correspond aux équipements fixes relatifs aux voies ;
- Matériel Roulant ;
- Poste de Commandement Centralisé (P.C.C.) : assure l'exploitation par une gestion en temps réel du système de transport ;
- Site de Maintenance des Infrastructures (S.M.I.) : assure la maintenance des équipements fixes relatifs aux voies, à l'énergie et au contrôle-commande et signalisation ;
- Site de Maintenance et de Remisage (S.M.R.) : assure la maintenance en atelier du matériel roulant et son remisage en période hors-exploitation.

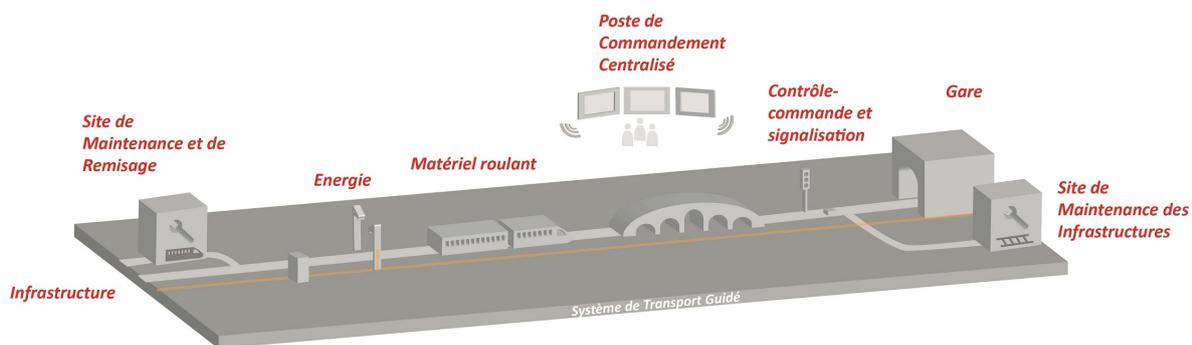


FIGURE 2.10 – Décomposition d'un système de transport guidé en sous-systèmes (GONZVA et GAUTIER, 2014)

De plus, l'environnement du système se compose des :

- Usagers : utilisent le système de transport guidé pour leurs déplacements ;
- Sous-stations électriques : assurent l'alimentation en énergie électrique d'une section de ligne.

Puis, de la même manière, les sous-systèmes sont ensuite décomposés en **composants** afin d'obtenir d'une part, une architecture plus fine des systèmes et pour d'autre part, distinguer les spécificités des systèmes selon leur configuration d'implantation. Par exemple, le sous-système « infrastructure » contient, entre autres, le composant « traverses et supports de voie » et « appareil de voie ». Cette division pourrait se poursuivre, en dissociant « traverses et supports de voie » en, entre autres, « boulons d'attache », « tire-fonds » et le composant « appareil de voie » en « coussinet », « joint isolant » et « support de contre-rail » entre autres.

Cependant, pour cette recherche ne seront traités que les trois premiers niveaux de décomposition : en système, sous-systèmes et composants. **Choisir le composant comme granularité est suffisante au vu de l'enjeu de la recherche** qui est d'obtenir une approche globale des risques c'est-à-dire de l'aléa, aux impacts matériels directs et indirects, pour en déduire les conséquences sur l'exploitation. Les mécanismes d'endommagement précis de chaque élément constitutif de chaque composant eux même constitutifs de chaque sous-système ne font donc pas l'objet de la recherche entreprise et des besoins de la démarche méthodologique.

2.4.3 Caractéristiques du cas d'application : décomposition en composants

C'est au niveau de la division des sous-systèmes en composants qu'apparaissent les différences structurelles qui permettent de distinguer un système de transport guidé implanté en souterrain, d'un système implanté en surface ou en aérien.

Certains composants se retrouvent **dans toutes les configurations d'implantation** (par exemple, le « rail »), certains sont **propres à la configuration étudiée** (par exemple, les « tunnels » dans le cas d'une configuration en souterrain), et enfin d'autres sont **positionnés identiquement quelle que soit la configuration d'implantation** (par exemple, l'hypothèse est raisonnablement faite que les sites de maintenance sont positionnés en surface pour toutes configurations d'implantation du système) (Tableau 2.3). Certains composants sont exclusifs dans la mesure où ils n'existent pas simultanément. Par exemple, dans le cas de voie dite « sur dalle » ou voie béton, le composant « ballast » n'est pas applicable. D'autres composants n'apparaissent tout simplement pas, comme le cas des pylônes supports de la caténaire qui ne sont pas inclus dans la configuration d'implantation en souterrain dans la mesure où il est considéré que la caténaire est traditionnellement fixée sur la partie intérieure du tunnel (l'intrados).

Finalement, chaque configuration d'implantation contient **8 sous-systèmes** et le modèle de **système aérien contient 25 composants**, le **système de surface contient 25 composants** et le **système souterrain contient 24 composants** (Figure 2.11).

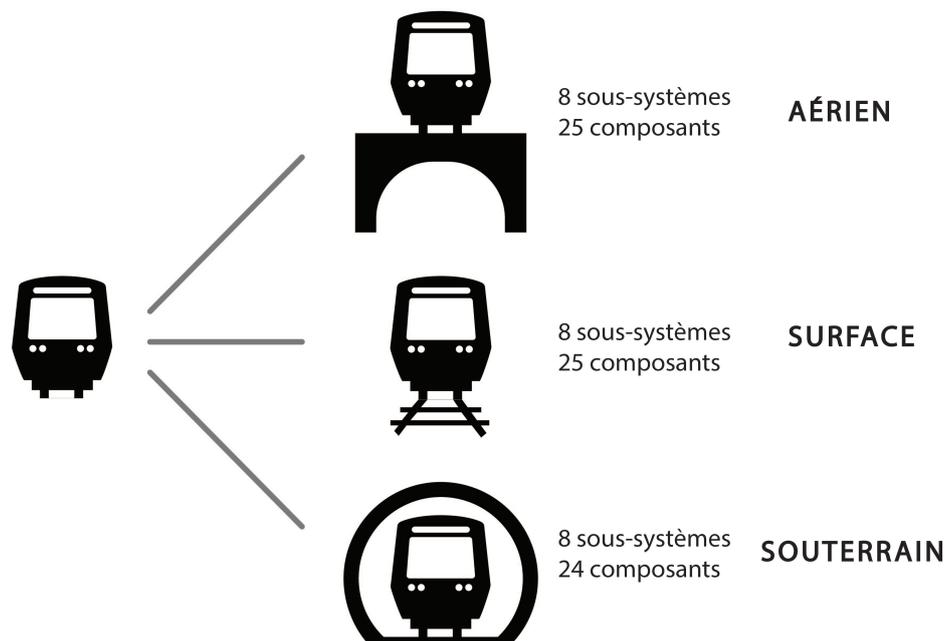


FIGURE 2.11 – Cas d'application de la démarche méthodologique dans cette recherche et distinction selon la configuration d'implantation (source : auteur)

TABLEAU 2.3 – Décomposition structurelle d'un système de transport guidé selon ces trois configurations d'implantation usuelles

Sous-système et composant	Configuration d'implantation		
	Souterrain	Surface	Aérien
Energie			
Rail conducteur latéral (troisième rail)	U	G	O
Caténaire	U	G	O
Pylône de caténaire	-	G	O
Contrôle-Commande et Signalisation			
Composants « à bord » au sein du matériel roulant	U	G	O
Composants « au sol » : détecteurs (prises d'informations, balises...)	U	G	O
Composants « au sol » : mécanismes d'appareils de voie (moteur, informations de position...)	U	G	O
Composants « au sol » : câbles de signalisation (remontées / transmission d'informations)	U	G	O
Site de Maintenance et de Remisage (S.M.R.)			
Équipements « maintenance » du matériel roulant voyageurs	G	G	G
Équipements « remisage » du matériel roulant voyageurs	G	G	G
Site de Maintenance des Infrastructures (S.M.I.)			
Équipements « maintenance » des trains de travaux / de maintenance	G	G	G
Équipements « remisage » des trains de travaux / de maintenance	G	G	G
Poste de Commandement Centralisé (P.C.C.)			
Salle d'exploitation	U	G	O
Câbles (remontées / transmission d'informations)	U	G	O
Gare			
Espaces d'accès (couloirs, zones d'échanges...)	U	G	O
Équipements électromécaniques (escaliers, ascenseurs, ventilations...)	U	G	O
Câbles (remontées / transmission d'informations)	U	G	O
Matériel roulant			
Infrastructure			
Rail	U	G	O
Traverse	U	G	O
Appareil de voie	U	G	O
Dalle ferroviaire (cas de voie sans ballast)	U	G	O
Ballast (cas de voie avec ballast)	U	G	O
Quai	U	G	O
Ouvrage de support de la voie			
Superstructure : pont, viaduc...	-	-	O
Structure : plateforme (configuration en remblai ou déblai, et sous-couches et couche de forme)	-	G	-
Infrastructure : tunnel	U	-	-
Ouvrage hydraulique			
Tuyaux de drainage	-	-	O
Ouvrage de collecte	-	G	-
Pompe d'épuisement	U	-	-

U : composant implanté en souterrain (U)
G : composant implanté en surface (G)
O : composant implanté en aérien (O)

Synthèse

Pour illustrer le travail de recherche, le risque inondation est fixé comme risque naturel d'étude. De la même façon, un système de transport guidé est défini à partir de ses sous-systèmes et composants constitutifs. Dans ce cadre, cette décomposition systémique est déclinée selon les trois configurations d'implantation classique, en souterrain, en surface et en aérien d'un système de transport guidé. Ainsi, une approche comparative pourra être proposée en matière de caractérisation de la vulnérabilité, d'une part, puis d'amélioration de la résilience, d'autre part, dans le cas du risque inondation.

2.5 Conclusion du chapitre 2

Le chapitre 2 conclut plusieurs éléments. Premièrement, les systèmes de transport guidé peuvent être considérés comme des **systèmes** au sens de la théorie des systèmes. Ce sont, en effet, des objets hautement compliqués dont les fonctions et dysfonctions émergent de manière simultanée et non linéaire. Ce sont également des objets à considérer dans leur globalité c'est-à-dire au-delà de la somme des parties qui les composent. Les systèmes de transport sont hautement organisés, avec une architecture ramifiée dans laquelle les sous-systèmes sont constitués de composants eux-mêmes constitués d'éléments également dissociables et sans lesquels aucune fonction ne saurait émerger. Enfin, les interactions du système sont extrêmement nombreuses pour mettre en relation tous ses éléments internes et les éléments de son environnement.

Deuxièmement, les interactions au sein du système ont une double face : ils sont indispensables au bon fonctionnement en créant le juste maillage fonctionnel nécessaire entre tous les éléments internes ; mais, dès lors qu'un aléa survient tel qu'une inondation, ces connexions peuvent être le support d'une propagation de défaillances de proche en proche de composants pouvant amener à une déstabilisation complète du système. Ces **effets domino** sont d'ailleurs mis en évidence dans de nombreux incidents provoqués par des aléas naturels, en particulier des inondations, sur des systèmes ferroviaires.

Troisièmement, la théorie des systèmes présente un intérêt certain dans ce contexte : elle permet la **modélisation de ces défaillances successives dues à des effets domino internes**. De cette façon, une démarche méthodologique d'analyse est proposée par le biais d'une approche systémique. Les besoins fonctionnels de cette démarche sont les suivants : caractériser la vulnérabilité de plusieurs types de systèmes de transport guidé soumis à plusieurs types de risques naturels, déterminer cette vulnérabilité de façon globale depuis les dommages physiques jusqu'aux conséquences sur l'exploitation des systèmes, apporter une aide à la réflexion en matière de gestion des risques en phase de conception, d'exploitation et de maintenance, et enfin, intégrer les trois possibilités d'implantation soit en souterrain, soit en surface ou soit en aérien des systèmes de transport car ce paramètre présente au moins empiriquement une forte influence sur la vulnérabilité.

Le chapitre suivant initie cette démarche méthodologique globale par une étape majeure : modéliser les interdépendances qui existent entre les éléments du système afin de modéliser, de fait, les séquences de défaillances par effet domino que l'existence de ces interdépendances est susceptible de provoquer en cas d'inondation.

Deuxième partie

ANALYSER LA RÉSILIENCE DES SYSTÈMES DE TRANSPORT GUIDÉ PAR UNE DÉMARCHE MÉTHODOLOGIQUE SYSTÉMIQUE



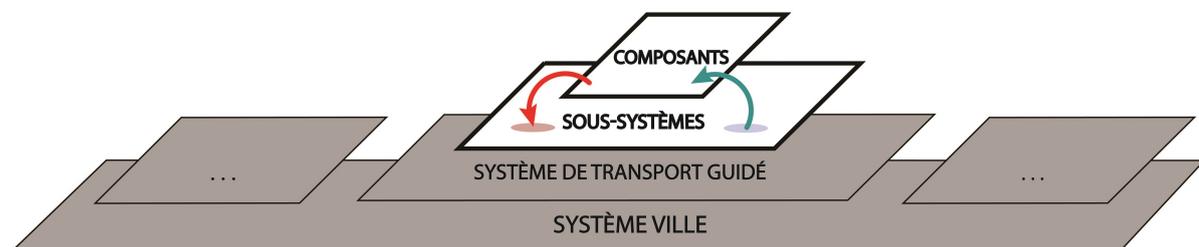
Chapitre 3

Modélisation des interdépendances entre les éléments d'un système de transport guidé

« "Being selfish today means taking care of others."

This is the irony of living in an interdependent world : if my business or the political stability of my country depends on what you are doing 5,000 miles away from me, your failure to do good catastrophic-risk management can have a major impact on me. We have to find ways to ensure that organizations and countries manage their risks prudently so that they don't affect the rest of the world within a few days. That's what I mean by being selfish ; I don't just have to worry about my own risk management, but yours as well. »

Erwann Michel-Kerjan, *Risk Management 2.0 : Reassessing Risk in an Interconnected World*, Rotman Magazine, Automne 2010.



L'enjeu de la recherche entreprise est d'élaborer une démarche méthodologique et opérationnelle capable de fournir une approche globale des risques c'est-à-dire de l'occurrence de l'aléa avec ses caractéristiques d'intensité données, puis des impacts matériels directs sur les systèmes, puis des dommages matériels indirects c'est-à-dire ceux occasionnés par la propagation du risque par effet domino jusqu'à la déduction des conséquences fonctionnelles c'est-à-dire les possibilités, ou non, d'exploiter le système selon un fonctionnement en mode dégradé. Cette approche globale s'inscrit elle-même dans une logique d'amélioration de la résilience des systèmes de transport guidé lorsqu'ils sont soumis à un risque inondation. Or, pour obtenir cette caractérisation totale du risque (aléa, dommages directs et indirects, impact sur l'exploitation) dans une optique d'accroissement de la résilience de ces systèmes, une analyse préalable de leur vulnérabilité est nécessaire.

Le [chapitre 2](#) a permis de définir structurellement le système étudié : un système de transport guidé décliné selon les trois configurations traditionnelles d'implantation à savoir en souterrain, en surface et en aérien. Chaque système présente des composants spécifiques pour une implantation donnée. L'objectif est donc, dans ce chapitre, d'initier la démarche méthodologique par une analyse de la vulnérabilité de ces systèmes. Il est essentiel de pouvoir intégrer la configuration d'implantation afin de porter en permanence une approche comparative souterrain–surface–aérien. La vulnérabilité est appréhendée par l'intermédiaire des effets domino susceptibles d'être engendrés lorsque le système fait face à une inondation car ces derniers jouent un rôle majeur dans la fragilité des systèmes vis-à-vis du risque inondation. Pour cela, les choix méthodologiques faits pour mener à bien cette analyse sont présentés ainsi que les résultats produits.

3.1 Formulation des besoins scientifiques et opérationnels du modèle et critères de choix

3.1.1 Entre vulnérabilité systémique et résilience : une démarche préalable à la réalisation de l'autre

3.1.1.1 Caractériser la vulnérabilité des systèmes de transport soumis à des aléas naturels

Derrière la notion d'endommagements¹, qu'ils soient d'ailleurs directs ou indirects c'est-à-dire engendrés par des effets domino², est associée une forme de vulnérabilité (MESCHINET DE RICHEMOND et REGHEZZA, 2010) du système de transport. Dans sa distinction, (GLEYZE, 2005) associe justement aux trois niveaux d'endommagements la notion de vulnérabilité et traite alors de la vulnérabilité matérielle, de la vulnérabilité structurelle et de la vulnérabilité fonctionnelle. C'est justement la définition la plus largement acceptée de la vulnérabilité, hautement polysémique, à savoir la propension d'un enjeu humain, matériel, environnemental, etc. à présenter une prédisposition intrinsèque à être affecté, à subir ou à faire face à un dommage en cas de manifestation d'un phénomène naturel ou anthropique (D'ERCOLE *et al.*, 1994; CARDONA, 2003; BARROCA, 2006; CUTTER, 2006; VEYRET et REGHEZZA, 2006). L'aléa apparaît donc comme central dans la compréhension de ce qui fait qu'un système quel qu'il soit est vulnérable. Initialement, l'approche prédominante dans la gestion des risques est justement celle par l'aléa, qu'il soit par exemple naturel, industriel, technologique. Le risque est en fait vu par l'intermédiaire de ce qui le cause, à savoir la survenance d'un aléa. Dès lors, la complexité du concept de risque s'est retrouvée réduite à la seule dimension physique, celle de l'aléa. Par souci de simplification, les modes de gestion des risques ont alors privilégié cette dimension physique de l'aléa (BARROCA, 2006), en se focalisant notamment sur les dommages engendrés par l'aléa sur les enjeux. Cette idée conduit à positionner le concept de vulnérabilité au centre de la réflexion sur la gestion des risques, notamment avec la définition courante du risque comme la confrontation d'un aléa avec un ou des enjeux. La vulnérabilité est donc un élément essentiel dans la compréhension des risques (CARDONA, 2005).

Or, l'expérience montre, en particulier sur les systèmes de transport guidé, que les dommages provoqués par l'occurrence d'un aléa sur ces infrastructures critiques sont, de fait, difficiles à appréhender dans la mesure où, en plus des dommages directs aux éléments impactés, des dommages indirects dus à des effets domino sont générés à cause des interdépendances. L'approche **aléa-centrée** ne suffit donc plus et doit par conséquent inévitablement s'orienter vers une approche **système-centrée** dans laquelle les conséquences de l'occurrence d'un aléa sur le système sont précisément étudiées : impacts directs sur les éléments du système situés dans la zone d'aléa, effets domino parmi les éléments du système. Dans ce contexte, l'émergence puis la mobilisation du concept de résilience depuis les années 2000, qu'il soit d'ailleurs vu comme une mutation, un bouleversement ou un simple glissement sémantique (BARROCA *et al.*, 2013) du concept de vulnérabilité, place justement le système au centre de l'approche et apparaît parfaitement opportun aux enjeux actuels de gestion des risques affectant les systèmes de transport guidé.

1. Le terme d'endommagement est utilisé dans cette thèse comme le fait de *causer des dégâts à quelqu'un ou à quelque chose* (Dictionnaire Littré, 2016). La signification prise ici de ce terme est donc différente de celle utilisée dans le domaine de la physique des matériaux.

2. Les effets domino sont définis dans cette recherche comme un événement initial qui amorce une séquence d'événements en chaîne. Les effets domino impliquent donc une propagation d'événements à partir d'un événement premier. Tous ces événements se déroulent au sein du système étudié c'est-à-dire un système de transport guidé donné

Bien que la différence entre l'approche aléa-centrée et système-centrée soit nette, les concepts de vulnérabilité et de résilience qui en sont respectivement à la base sont tant imbriqués que la frontière entre chaque n'est pas toujours claire (MATZENBERGER *et al.*, 2015) et leur articulation non plus (CUTTER *et al.*, 2008). Cette compréhension commune est, de base, complexe dans la mesure où la polysémie du terme de vulnérabilité n'a sans doute d'égale que la polysémie de la résilience (cf. chapitre 1). En effet, avec près de vingt-cinq définitions différentes, six écoles de pensée, une vingtaine de manuels et guides divers concernant son évaluation (BIRKMANN, 2006, p. 11 ; p. 40), assurément la littérature scientifique abonde lorsqu'il s'agit de définir la vulnérabilité, considérée comme un paradigme particulier car ni tout à fait nouveau ni tout à fait classique (BECERRA, 2012). Mais, ces accointances conceptuelles entre vulnérabilité et résilience ne sont absolument pas récentes et font l'objet d'études depuis plusieurs décennies telles que celles de (TIMMERMAN, 1981) et de (LIVERMAN, 1990) datant des années 1980.

La littérature scientifique est donc prolifique quand il s'agit de déterminer les liens entre les deux concepts aboutissant à un certain nombre de faits scientifiques parfois contradictoires et parfois encore fortement débattus. Parmi ces faits scientifiques, les suivants sont dominants : la résilience est considérée comme paramètre constitutif de la vulnérabilité (DAUPHINÉ et PROVITOLLO, 2007) ; au contraire, la vulnérabilité est une composante inhérente de la résilience (NELSON *et al.*, 2007) ; l'antonyme de la résilience est la vulnérabilité (FOLKE *et al.*, 2002, p. 13) ; bien que liés car analysant les mêmes objets, les deux concepts sont nettement distincts (GALLOPÍN, 2006 ; BROWN *et al.*, 2006, p. 90 ; CUTTER *et al.*, 2008) ; la résilience avec d'autres concepts comme la capacité d'adaptation sont imbriqués au sein d'une vulnérabilité englobante (GALLOPÍN, 2006 ; TURNER *et al.*, 2003) ; la vulnérabilité et la résilience forment un même continuum au sein duquel le premier concept en serait la partie positive et le second concept son pendant négatif (MANYENA, 2006). Pour résumer, les concepts de vulnérabilité et de résilience ne sont pas nécessairement opposés, aucun de ces deux concepts n'englobent l'autre et tous les deux s'appliquent aussi bien à des systèmes techniques que des systèmes sociaux (LHOMME, 2012, p. 76).

Cette recherche s'inscrit dans une perspective qui se veut **pratique et empirique** dans laquelle la résilience apparaît comme « englobant » (intégrant) la vulnérabilité (LHOMME, 2012, p. 75). En effet, dans ce positionnement, la résilience est **outil de gestion des risques** fortement brandie comme telle par de nombreuses instances gouvernementales internationales. Par exemple, le Cadre d'action de Sendai pour la réduction des risques de catastrophe 2015-2030, nouvellement signé et succédant au Cadre d'action de Hyōgo qui couvrait la décennie 2005-2015, contient de nombreuses actions érigant la résilience comme *modus operandi* pour la mise en place de stratégies et de politiques de gestion des risques (PASCHE et GEISLER, 2005 ; TOUBIN *et al.*, 2013). Le cadre d'actions contient, notamment, l'objectif de « *réduire nettement, d'ici à 2030, la perturbation des services de base et les dommages causés par les catastrophes aux infrastructures essentielles [...], notamment en renforçant leur résilience* » (action n°18), d' « *accroître, selon qu'il convient, les investissements publics et privés résilients face aux catastrophes et notamment pour cela : adopter des mesures structurelles, non structurelles et fonctionnelles de prévention et de réduction des risques de catastrophe pour les infrastructures essentielles* » (action n°30) et de « *promouvoir la résilience des infrastructures essentielles, nouvelles ou existantes, notamment de celles qui sont liées [...] aux transports [...], pour faire en sorte qu'ils restent sans danger, efficaces et opérationnels pendant et après les catastrophes, afin d'assurer les services vitaux* » (action n°33). Dans ce contexte, « *la résilience fait depuis lors espérer dans la sphère politique, onusienne en particulier, une nouvelle praxis de la réduction des risques de catastrophe* » (QUENAULT, 2015a).

Mais, si la résilience est encouragée au travers de tels objectifs pour promouvoir un certain avenir des villes, les moyens pour parvenir à ces objectifs planétaires de « *réduction substantielle des pertes et des risques liés aux catastrophes en termes de vies humaines, d'atteinte aux moyens de subsistance et à la santé des personnes, et d'atteinte aux biens économiques, physiques, sociaux, culturels et environnementaux des personnes, des entreprises, des collectivités et des pays* » ne sont guère fournis ni même suggérés par le Cadre d'action de Sendai. C'est sans doute là que réside un des plus grands défis actuels pour la résilience urbaine, à savoir celui de concilier la fin et les moyens associés, encore trop erratiques, pour y parvenir.

Ainsi, dans la vision développée dans cette recherche, **toute démarche d'amélioration de la résilience nécessite au préalable une analyse de la vulnérabilité**. Autrement dit, sans prendre le partie théorique de considérer la vulnérabilité comme dimension constitutive de la résilience, l'hypothèse consiste simplement à dire que **pour améliorer la résilience d'un système technico-fonctionnel comme celui d'un système de transport guidé face à un aléa donné, il est nécessaire mais non suffisant de connaître d'abord sa vulnérabilité face à cet aléa**. La vulnérabilité devenant, en poussant l'idée à l'extrême, le nécessaire diagnostic pour la mise en place de stratégies préventives et curatives appropriées de résilience. En l'occurrence, une fois connues les vulnérabilités d'un système de transport guidé implanté en souterrain, en surface et en aérien face au risque inondation, la réponse théorique et pratique à apporter ne consiste pas en **la résolution une à une de ces vulnérabilités prises comme des obstacles indépendants à la résilience globale** du système.

La résilience d'un système ne s'accroît pas, en effet, par la réduction voire suppression de l'ensemble de ses vulnérabilités mais revêt un aspect bien plus global qui s'illustre très bien par le fait que diminuer la vulnérabilité d'un système à un endroit donné peut créer ou accroître la vulnérabilité d'un autre système en d'autres temps ou endroit³ (NELSON *et al.*, 2007). Par exemple, il peut être pertinent de considérer que si un système de transport est exposé à un risque de vents forts sur une section donnée de son parcours, un positionnement en souterrain plutôt qu'en surface est une bonne réponse. Mais, si cette même section est exposée à un risque inondation, l'implantation en souterrain augmente potentiellement l'exposition, et donc la vulnérabilité, du système face à ce risque. Choisir alors la configuration d'implantation aérienne est également contre-productif puisqu'elle augmente potentiellement l'exposition du système de transport, en hauteur, face aux vents forts.

Par conséquent, **la démarche d'amélioration de la résilience est bien distincte de la démarche d'analyse de la vulnérabilité mais la seconde est nécessaire mais non suffisante à la première**. Ce socle préliminaire doit, qui plus est, se concentrer sur la **vulnérabilité systémique** (HELLSTRÖM, 2007) d'un système de transport guidé, infrastructure critique par excellence, dans la mesure où il convient d'adopter pour cette analyse de vulnérabilité une approche transversale permettant d'intégrer les éléments vulnérables, à savoir les composants du système, et les facteurs de vulnérabilité (BOUCHON, 2011, p. 112). La démarche d'analyse de la vulnérabilité systémique doit ainsi amener à penser le risque en termes de liaisons et d'interactions entre les éléments plutôt qu'en termes de décomposition et dissociation (PROVITOLLO, 2007). C'est le seul moyen de comprendre en totalité les phénomènes de défaillances empiriquement observées. Dans cette optique, il est donc important de savoir comment le système étudié fonctionne et, surtout, comment il dysfonctionne lorsqu'il est affecté par un risque inondation.

3. "Reducing vulnerability in one area creates or increases vulnerability in an-other area or time."

3.1.1.2 D'un modèle fonctionnel vers un modèle dysfonctionnel

Pour répondre à l'enjeu général d'amélioration de la résilience des systèmes de transport guidé soumis au risque inondation, une analyse de vulnérabilité de ces systèmes est un préalable identifié comme nécessaire. Pour parvenir à la caractérisation de la vulnérabilité de ces systèmes, l'élaboration d'un modèle doit être réalisée car c'est à partir de modélisations qu'il est possible d'analyser finement les mécanismes de fonctionnement, de dysfonctionnement et de prévoir les comportements futurs du système. Or, on peut distinguer deux types de modélisation (SERRE, 2014) :

- la modélisation **physique** qui repose sur la représentation physique des processus continus ou discrets de défaillance, dégradation ou rupture du système en prenant en compte les équations régissant les phénomènes internes (DIAB, 1992) ; elle implique alors une connaissance approfondie du système et le représente sous la forme de modèles physiques, mathématiques, ou encore de simulations numériques ;
- la modélisation **fonctionnelle** qui repose sur une étude du système sous l'angle des fonctions qu'il doit remplir et pour lesquelles il est conçu ; elle consiste à déterminer les interactions entre les composants du système et de son environnement de façon à établir de manière formelle les liens entre les défaillances des fonctions, leurs causes et leurs effets.

Le second type de modélisation apparaît opportun pour les systèmes de transport guidé soumis au risque inondation dans la mesure où la modélisation des mécanismes physiques qui engendrent la défaillance de composants n'est, pour la plupart du temps, pas connue. Et, quand bien même ces mécanismes sont connus, force est de constater que les incidents provoqués par un aléa inondation frappant un système de transport ne peuvent complètement s'expliquer si les composants défaillants sont analysés un à un. Lors d'inondations extrêmes, les dispositifs impactés du système de transport sont tout autant des ouvrages de franchissement de cours d'eau que des voies emportées, submergées ou dégradées ; cette vulnérabilité est donc globale et multiplie ainsi les points potentiels d'interruption des circulations de trains (SAINT-MARC *et al.*, 2014a). Le modèle doit donc être **systémique**, pour interroger les relations entre les composants sans doute plus que les dysfonctionnements individuels de ces derniers, ce qui incite assurément à s'orienter vers une modélisation de type fonctionnel.

La modélisation physique est possiblement décomposable aussi en deux modèles pour l'analyse des systèmes : des modèles issus de l'utilisation de méthodes **statistiques** ou de méthodes **de simulation** (NOYES et PÉRÈS, 2007). Les méthodes statistiques sont ordinairement utilisées pour décrire un échantillon de données à partir de méthodes mathématiques de régression, d'analyse de la variance, d'analyse multivariée. Les méthodes de simulation sont quant à elles utilisées lorsque le nombre de données à traiter rend le calcul analytique complexe et permettent également de prendre en compte la dynamique d'événements, en particulier grâce aux simulations dites de Monte Carlo. Or, que ce soit dans le cas des modèles issus de méthodes statistiques ou de simulation, là encore le manque de données relatifs aux épisodes d'inondation sur le réseau ferré qui ne sont pas aujourd'hui répertoriés dans une base de données (PAMS CAPOCCIONI *et al.*, 2013a) reste un obstacle à l'application de ces méthodes. Voilà pourquoi **le choix s'oriente donc vers la modélisation fonctionnelle**, pertinente pour la recherche entreprise.

Ce modèle de fonctionnement est développé avec l'objectif résultant d'en élaborer un **modèle dysfonctionnel**. Autrement dit, un modèle fonctionnel général du système permet d'en déterminer le fonctionnement en situation normale et en situation de crise, c'est-à-dire lorsque le système est impacté par un risque inondation. Le modèle, en situation *de crise*, offre donc la possibilité d'identifier

et de représenter les mécanismes de défaillances et de dysfonctionnements d'un système de transport guidé. Pour résumer, le modèle fonctionnel représente l'identification des interdépendances qui existent entre les composants afin que le système assure globalement ses fonctions en situation normale, et le modèle dysfonctionnel représente la propagation du risque par effet domino en situation de crise *via* le réseau interne d'interdépendances (Figure 3.1).

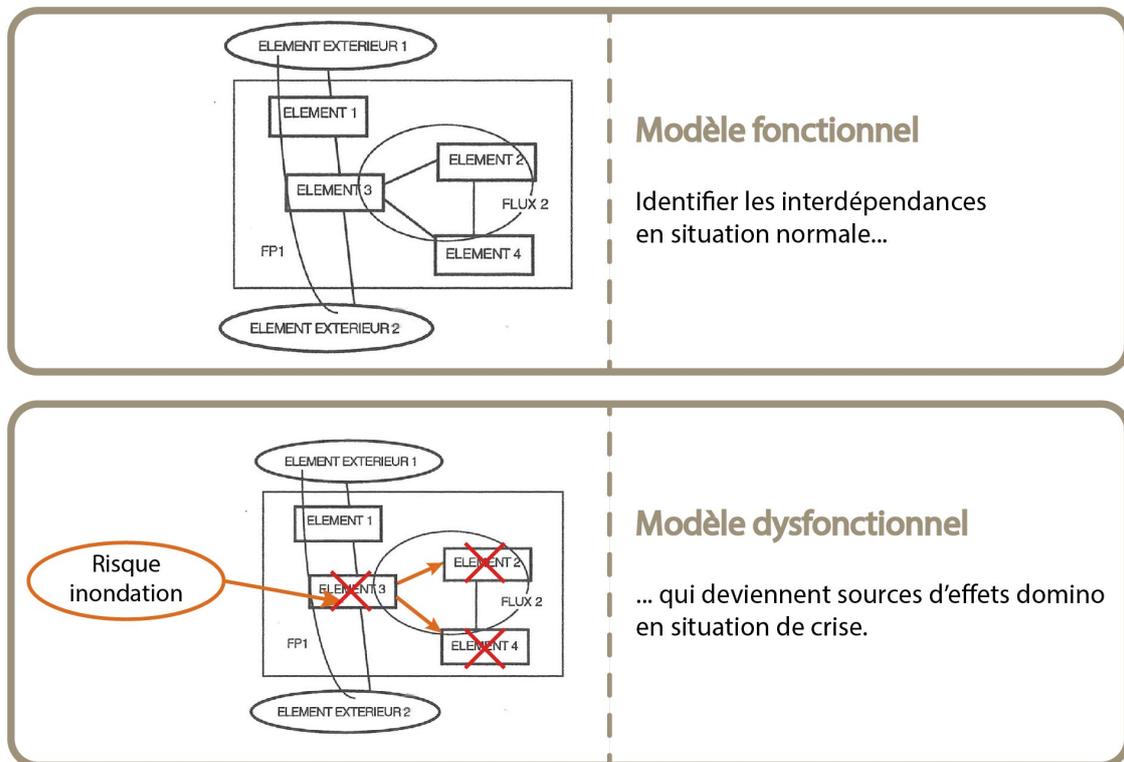


FIGURE 3.1 – Intérêts d'un modèle fonctionnel et d'un modèle dysfonctionnel de système (source : auteur)

3.1.2 Typologie de méthodes existantes pour l'analyse de risques affectant les systèmes urbains

3.1.2.1 La Sûreté de Fonctionnement comme palette de méthodes pour la maîtrise des risques

Les systèmes de transport guidé sont des systèmes présentant un haut niveau de complication, globaux, organisés et aux nombreuses interactions internes et externes. Ils sont, en effet, composés d'un grand nombre d'éléments qui interagissent entre eux de façon non linéaire (SIMON, 1991) et dans lequel les relations de cause à effet ne sont pas toujours établies scientifiquement et nécessitent alors une part d'intuitif (SERRE, 2005, 2011). Cette part d'intuitif qui semble indissociable des systèmes hautement compliqués ou hyper compliqués se retrouve pleinement dans les problèmes actuels dans le domaine ferroviaire, en particulier en mécanique. Ces problèmes font, en effet, intervenir de manière intensive des non linéarités, que ce soit dans le comportement des composants du système ou aux interfaces, et la prise en compte de l'aléatoire dans la modélisation devient incontournable tant pour les sollicitations du système que pour la variabilité de ses caractéristiques (GAUTIER, 2010). Pour minimiser cette part d'intuitif qui peut représenter un danger dans le travail de modélisation, il est possible d'avoir recours à un modèle fonctionnel du système mais aussi dysfonctionnel. Le haut degré de complication ou l'hyper complication des systèmes est donc omniprésent, qu'ils soient dans

un état fonctionnel ou dans des états dysfonctionnels.

La modélisation fonctionnelle comme moyen d'analyser les risques qui incombent aux systèmes de transport guidé apparaît donc prometteuse pour réduire le haut degré de complication d'ordre technique et organisationnel de ces systèmes car cette complication a pour conséquence de rendre la plupart des approches physiques classiques peu voire non efficaces pour comprendre le fonctionnement (ZWINGELSTEIN, 1996; VILLEMEUR, 1997) de ces systèmes. Cette situation a alors offert un regain d'intérêt pour un certain type de méthodes pour l'analyse des risques impactant les systèmes technico-fonctionnels urbains : les méthodes issues de la **Sûreté de Fonctionnement**.

La Sûreté de Fonctionnement est une riche palette de méthodes et de concepts au service de la maîtrise des risques (MORTUREUX, 2001). Elle « n'est pas un but en soi, mais un moyen ou un ensemble de moyens : des démarches, des méthodes, des outils et un vocabulaire » qui permettent d'adopter « une forme d'esprit particulière dans la considération portée aux systèmes » (MORTUREUX, 2001). Considérée même parfois comme la science des défaillances (VILLEMEUR, 1997) c'est-à-dire donc comme une discipline scientifique à part entière, la Sûreté de Fonctionnement **consiste à connaître, évaluer, prévoir, mesurer et maîtriser les défaillances de systèmes technologiques, tout comme les défaillances humaines, afin de limiter les conséquences de ces défaillances sur la santé, la sécurité des personnes, la productivité et l'environnement** (NOYES et PÉRÈS, 2007; ZWINGELSTEIN, 1999).

La Sûreté de Fonctionnement est tout à fait adaptée pour une analyse des défaillances par effet domino permises par les interdépendances entre composants, vues comme des vecteurs de propagation du risque au sein du système de transport. Elle considère justement que le comportement d'un système ne se réduit pas uniquement à la somme de ceux de ses composants, mais aussi à leurs interactions (GIRAUD, 2005). Les étapes-clés de la démarche générale d'analyse d'un système par la Sûreté de Fonctionnement est un processus pertinent pour l'enjeu de caractérisation de la vulnérabilité d'un système de transport guidé soumis au risque inondation car la démarche est orientée autour des axes fonctionnel et dysfonctionnel (NOYES et PÉRÈS, 2007) (Figure 3.2). Pour chaque étape, une palette de méthodes et outils est disponible et il convient désormais d'identifier celles et ceux les plus appropriés aux objectifs de cette recherche.

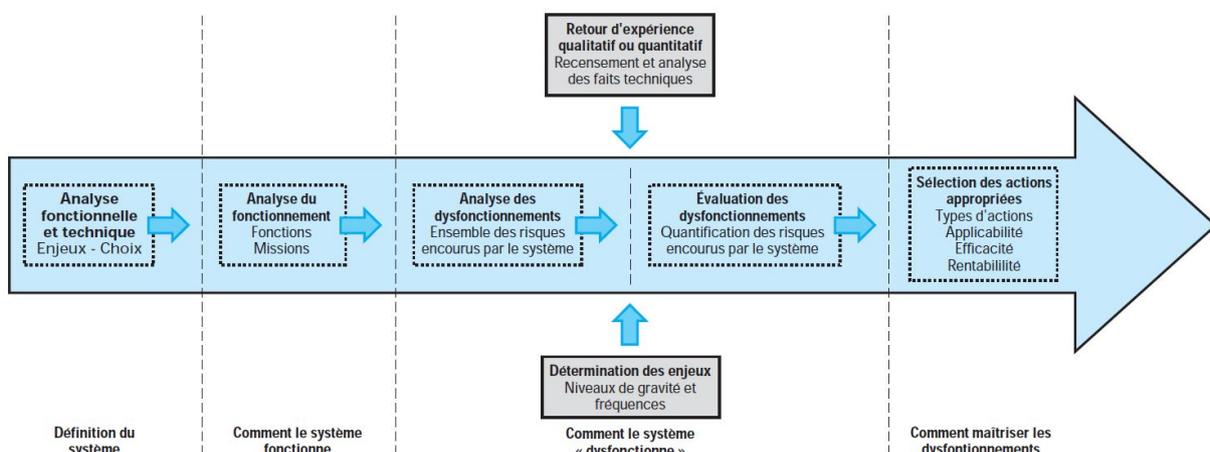


FIGURE 3.2 – Démarche d'analyse de la Sûreté de fonctionnement (NOYES et PÉRÈS, 2007)

3.1.2.2 Des méthodes qualitatives ou méthodes quantitatives : présentation et choix

La Sûreté de Fonctionnement est une discipline qui s'appuie sur un support méthodologique applicable à des systèmes tout au long de leur cycle de vie, que ce soit lors des phases préliminaires d'expression du besoin, puis de conception, d'industrialisation, de production, d'utilisation, de maintenance et voire même de retrait de service (NOYES et PÉRÈS, 2007). Dans ce cadre, toute analyse de Sûreté de Fonctionnement d'un système peut se diviser en plusieurs étapes principales (ZWINGELSTEIN, 2009) : l'analyse **structurelle** et **fonctionnelle** du système conduisant à un modèle de fonctionnement de celui-ci, l'**analyse prévisionnelle qualitative** du système et l'**analyse prévisionnelle quantitative** du système.

Pour l'analyse prévisionnelle, au sens de prévision du comportement du système, deux grandes familles se distinguent par la logique du raisonnement mené (ZWINGELSTEIN, 2009; SERRE, 2005; VUILLET, 2012; PEYRAS, 2002). Il existe, d'une part, les méthodes *inductives* qui partent des défaillances et remontent jusqu'aux conséquences que l'on souhaite éviter, et d'autre part, les méthodes *déductives* sont au contraire des méthodes descendantes où l'on part de l'évènement indésirable et sont recherchées toutes les causes susceptibles d'entraîner cet évènement. Les méthodes sont également distinguées selon qu'elles sont qualitatives ou quantitatives. Les méthodes *qualitatives* sont basées sur des principes de nomenclature des dangers et risques, de leurs origines et causes, par l'utilisation de tableaux standards permettant de classer les éléments. Les méthodes *quantitatives* sont constituées de méthodes dites « statiques », c'est-à-dire que le système est étudié à partir de sa structure et de sa logique de fonctionnement sans tenir compte de ses évolutions possibles dans le temps, et « dynamiques », c'est-à-dire que le système est étudié en tenant compte de ses évolutions au cours du temps : évolutions structurelles, fonctionnelles, etc.

Ainsi, les méthodes pratiques, puissantes et rigoureuses qui forment la Sûreté de Fonctionnement sont regroupées en trois modes de classification usuels (NOYES et PÉRÈS, 2007) : les approches **qualitatives/quantitatives**, les approches **inductives/déductives** et les approches **statiques/dynamiques**.

Dans le cadre de la recherche entreprise, à savoir mener une analyse de la résilience des systèmes de transport guidé soumis à un risque inondation en tant que démarche préliminaire à celle d'amélioration de la résilience de ces systèmes, l'Analyse Fonctionnelle pour élaborer un modèle de fonctionnement du système et l'Analyse des Modes de Défaillance et leurs Effets (AMDE) se sont avérées pertinentes et parfaitement appropriées (GONZVA *et al.*, 2016d).

Premièrement, l'**Analyse Fonctionnelle** est mobilisée dans cette recherche car elle est un préalable indispensable afin de réaliser une décomposition matérielle et fonctionnelle d'un système en cours de conception ou, dans le cas présent, en fonctionnement. L'Analyse Fonctionnelle consiste alors à recenser, caractériser, ordonner, hiérarchiser et valoriser les fonctions assurées par les composants du système (ZWINGELSTEIN, 2009).

Deux modes de représentation sont traditionnellement utilisés pour matérialiser les résultats de cette analyse : le **Bloc-diagramme Fonctionnel** (BdF) et le **Tableau d'Analyse Fonctionnelle** (TAF) (ZWINGELSTEIN, 1996, 2009). Le BdF est une représentation graphique du système qui permet la mise en évidence des interactions entre les composants du système et les éléments de son environnement extérieur, entre les composants eux-mêmes du système et la circulation de flux à travers ou à l'intérieur du système. Il représente donc schématiquement le système comme un ensemble d'éléments matériels et un ensemble de fonctions. Le TAF découle de l'analyse du BdF en rassemblant les fonctions identifiées du système. Le TAF fait apparaître en ligne, les composants du système et en colonne,

les fonctions de ces composants et sert en fait classiquement de trame pour la réalisation d'analyses de défaillances du système. C'est justement avec cet objectif ultérieur qu'il est exploité dans cette recherche.

L'Analyse Fonctionnelle sert essentiellement à l'identification exhaustive des interdépendances présentes au sein du système dans la mesure où elles rendent possible au sein du système l'émergence d'impacts négatifs souvent difficiles à prédire (GRIOT, 2010) qui sont en fait des vulnérabilités « dissimulées » (« *hidden vulnerabilities* ») du système qui se manifestent lorsqu'il fait face à un évènement (NAN *et al.*, 2012).

Deuxièmement, une autre méthode, usuellement appliquée consécutivement à l'Analyse Fonctionnelle, est l'Analyse des Modes de Défaillance et de leurs Effets (AMDE). C'est une méthode efficace pour l'analyse des modes de défaillance en permettant de structurer, sous forme de tableaux, les informations sur les dégradations : les pertes de performance, leurs causes, leurs effets (TALON *et al.*, 2009). L'ADME est inductive c'est-à-dire qu'en partant des causes des défaillances et en remontant jusqu'à leurs conséquences, elle considère un à un les composants du système et analyse leurs modes de défaillance. Elle permet, en particulier, de mieux comprendre comment ces systèmes fonctionnent avant, pendant et après une inondation (LHOMME, 2012, p. 180 ; BERAUD, 2013).

Contrairement à des idées préconçues ou des images défavorables d'études de faible qualité, les AMDE ne se résument pas à des tableaux remplis manuellement ou informatiquement. Elles servent, en effet, pendant tout le cycle de vie d'un système : conception, fabrication, exploitation, maintenance (ZWINGELSTEIN, 1996, p. 440). Dès lors il existe deux grands types d'AMDE : des AMDE *prévisionnelles* dites « produit » qui partent du cahier des charges fonctionnel afin d'identifier les points de conception susceptibles d'entraîner des problèmes lors de l'utilisation du système, et des AMDE *diagnostiques* dites « procédé » qui recherche à déterminer les points faibles de systèmes déjà en fonctionnement devant faire l'objet de mesures spécifiques. L'analyse de vulnérabilité menée dans cette recherche pour des systèmes de transport guidé soumis à des risques inondations est menée grâce à la mise en œuvre d'une AMDE de la deuxième catégorie car l'enjeu est de caractériser les points faibles du système lorsqu'il est perturbé par de tels évènements hydrologiques externes.

Enfin, pour éviter une trop grande diversité de tableaux de synthèse des résultats d'AMDE, des informations communes sont recensées dans des tableaux standardisés. L'ensemble des informations ne sont pas forcément toutes obligatoires pour mener une AMDE, c'est la raison pour laquelle certaines AMDE mises en œuvre pour une analyse focalisée sur les modes de défaillance d'un système ne fournissent pas de résultats pour des rubriques telles que « détection de la défaillance » ou « niveau de criticité » (Figure 3.3).

Système.....											
Niveau de décomposition..... ANALYSE DES MODES DE DÉFAILLANCE ET DE LEURS EFFETS											
Référence du schéma											
Mission EXEMPLE N° 1 MIL STD 1629 A											
Numéro de identification l'équipement	Fonction	Repère	Mode de défaillance	Cause	Effet de défaillance		Détection de la défaillance	Dispositifs de remplacement	Probabilité de défaillance	Niveau de criticité	Remarques
					Effet local	Effet final					
											...

FIGURE 3.3 – Exemple de trame d'AMDE utilisée en Sécurité de Fonctionnement (ZWINGELSTEIN, 2009)

Dans le cas de l'Analyse Fonctionnelle et *a fortiori* de l'AMDE qui lui fait suite, le principe de décomposition structurelle et fonctionnelle opérée est le suivant (Figure 3.4) :

- le niveau **élémentaire** du **composant** : le système est considérée comme une somme de composants en relation les uns avec les autres ;
- Le niveau **intermédiaire** du **sous-système** : le sous-système est considéré comme un système composé d'un ensemble de composants en interaction ;
- Le niveau **global** du **système** : le système de transport guidé est considérée comme une somme de sous-systèmes en relation les uns avec les autres.

Un dernier niveau non pris en compte dans cette recherche est celui, plus englobant, du système d'infrastructures ou **systèmes de systèmes**. Dans ce cas, le système est considérée comme faisant partie d'un système d'infrastructures critiques en rapport avec son environnement (KRÖGER, 2008; LHOMME, 2012, p. 114; EUSGELD *et al.*, 2011). Cette échelle de système de systèmes permet l'analyse des interdépendances entre systèmes urbains et dépasse donc le cadre de cette recherche.

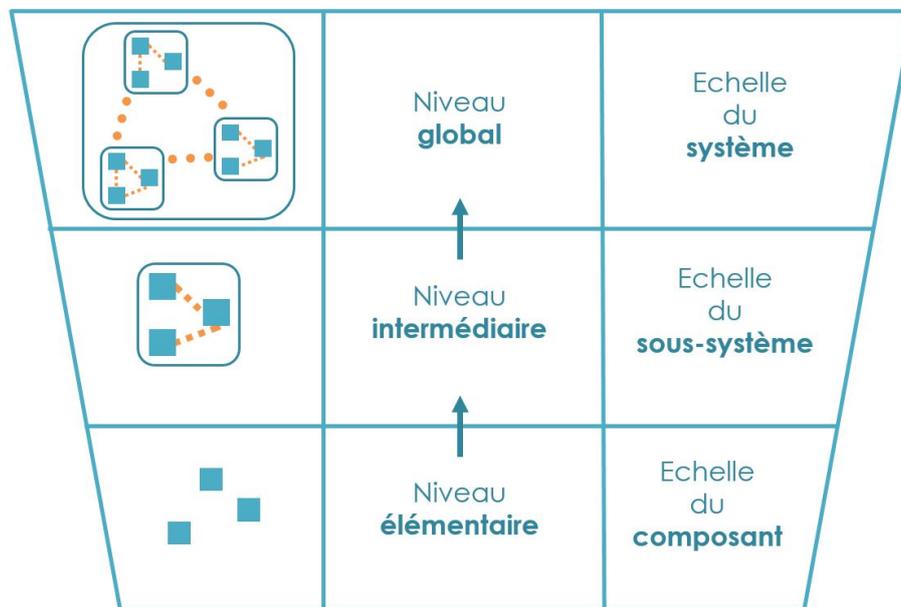


FIGURE 3.4 – Niveaux de décomposition structurelle et fonctionnelle d'un système urbain (inspiré de (LHOMME, 2012, p. 114)) (source : auteur)

D'autres modèles existent pour des travaux similaires d'analyse des défaillances des systèmes (GONZVA *et al.*, 2016d). Par exemple, l'Analyse Préliminaire des Dangers est utilisée dans les premières phases de conception d'un système et constitue un premier outil d'identification des risques potentiels (VIL-LEMEUR, 1997). Cette méthode ne présente pas d'intérêt pour les systèmes urbains tels que les systèmes de transport dans la mesure où les mécanismes de défaillance de chacun des composants sont généralement bien identifiés. L'analyse du fonctionnement de ces systèmes relève donc d'études de sûreté plus fines telles que l'AMDE (SERRE, 2011, p. 47).

Autre exemple, les EBIOS, pour « Expression des Besoins et Identification des Objectifs de Sécurité », sont utilisées pour gérer les risques portant sur un secteur d'activités, un organisme dans son intégralité, une sous-partie ou des processus particuliers de celui-ci ou encore un système informatique (ANSSI, 2010). La méthode s'emploie également pour étudier un sujet global, tel qu'un système composé de plusieurs sous-systèmes, pour ensuite se focaliser sur un sous-ensemble. Néanmoins, les EBIOS sont adaptées pour l'expression d'objectifs de sécurité et la détermination d'exigences de sé-

curité de l'objet étudié (DCSSI, 2004) tandis que les besoins méthodologiques de cette recherche abordent des objectifs de continuité fonctionnelle et des exigences de maintien de l'intégrité du système étudié dans un contexte de risques. L'AMDE semble donc plus adaptée à ces doubles exigences fonctionnelles et de conservation du système.

La méthode HAZOP pour « *HAZard and Operability studies* » présente des similitudes avec l'AMDE. Cette méthode consiste, à partir de mots-clés, à passer en revue les déviations de paramètres importants du système ou du processus étudié en mettant en évidence les causes et conséquences de leurs déviations éventuelles ainsi que les moyens de détection et actions correctrices possibles (ZWINGELSTEIN, 1996, p. 117). Or, la méthode HAZOP, contrairement à l'AMDE, n'est pas applicable lors de la phase de conception d'un projet d'ingénierie mais lors de la phase d'ingénierie de détail précédant la construction du système (ROYER, 2009). Bien que la méthode HAZOP s'inscrive également dans la sûreté de fonctionnement, elle est centrée sur l'équipement dans son ensemble à la différence de l'AMDE qui est centrée sur les composants.

Finalement, l'enjeu de caractérisation de la vulnérabilité des systèmes de transport guidé est de taille : conduire au développement de stratégies de mise en œuvre de la résilience de ces systèmes face à un risque inondation. C'est la raison pour laquelle il est primordial que cette étude préliminaire de vulnérabilité représente un socle solide pour l'élaboration de stratégies opérationnelles de résilience. Les méthodes qui composent la Sûreté de Fonctionnement sont toutes indiquées dans cette optique car éprouvées et historiquement utilisées dans les analyses de risque.

Selon (LEROY et SIGNORET, 1992), les notions qui sous-tendent ce qu'est la Sûreté de Fonctionnement, notamment celles de fiabilité ou de taux de défaillance, ont vu le jour dans l'aéronautique lors de l'entre-deux-guerres dans le domaine de l'aéronautique. Puis, la « théorie de la fiabilité » se formalise durant les décennies 1940 et 1950. Les décennies 1960 et 1970 sont marquées par l'apport des approches probabilistes aux approches uniquement déterministes jusque-là et par l'application de ces méthodes à d'autres domaines que l'aéronautique : la mécanique, l'électrique, etc. C'est, enfin, à partir des années 1980 que la Sûreté de Fonctionnement constitue une discipline très étendue et référencée pour l'analyse de risque avec le développement de normalisation, de méthodes standardisées, de logiciels de calcul.

Les dernières avancées de cette discipline sont essentiellement constituées par l'attrait qu'elle exerce pour répondre au besoin croissant de connaissances dans les domaines concernés par l'omniprésence des systèmes dits complexes : systèmes programmés, sciences humaines et sociales, etc. Parmi ces domaines qui mobilisent nouvellement la Sûreté de Fonctionnement, le génie urbain en fait partie.

3.1.2.3 Le génie urbain : un terrain d'application privilégié de la Sûreté de Fonctionnement

En prenant le recul des quinze dernières années environ, il apparaît que la Sûreté de Fonctionnement est tout à fait pertinente en tant que bagage méthodologique complémentaire pour le génie urbain là où d'autres outils et méthodologies traditionnellement utilisés se sont trouvés impuissants à expliquer certains phénomènes émergeant des systèmes urbains.

Fondamentalement, un des défis majeurs et globaux qui est posé actuellement au génie urbain en matière de résilience urbaine est sans doute la formalisation de connaissances pour l'aide à la dé-

cision et pour l'aide à la fabrication de villes résilientes face au risque inondation (EIVP, 2016)⁴. L'évaluation de la résilience urbaine vis-à-vis des risques constitue l'enjeu principal pour relever ce défi afin de bénéficier d'un socle scientifique solide. Les méthodes employées et les outils développés ont pour objectif d'informer sur le degré de résilience de la ville par rapport à des risques donnés et d'aider à prendre les décisions adéquates pour améliorer le niveau de résilience des territoires urbains (EIVP, 2016)⁴. Or, à défi global, réponse globale ; ce défi lié à la résilience urbaine face au risque inondation doit donc représenter une recherche systémique et transdisciplinaire. A l'instar de la géographie des risques, de l'aide à la décision et des sciences de l'information géographique, la Sûreté de Fonctionnement constitue un apport disciplinaire qui a fait ses preuves pour alimenter le socle scientifique indispensable au défi de la résilience urbaine.

Ce n'est donc pas un hasard si des méthodes issues de la Sûreté de Fonctionnement font l'objet, depuis une quinzaine d'années, d'applications remarquables sur des systèmes urbains offrant des résultats théoriques et opérationnels. Ces applications concernent en majeure partie l'ambition de connaissances en faveur de la résilience urbaine mais ne s'y résument pas pour autant. L'Analyse Fonctionnelle, tout d'abord, est appliquée à de nombreux systèmes urbains (GONZVA *et al.*, 2015) : produits de construction du bâtiment (LAIR, 2000; TALON, 2006), barrages (PEYRAS, 2002), routes (VALADAS, 2003), systèmes de gestion des déchets (BERAUD, 2013), systèmes et ouvrages de protection (SERRE, 2005; VUILLET, 2012), parc immobilier (ALLAIRE, 2012), etc. Cette tendance ne s'essouffle guère avec des utilisations en cours de l'Analyse Fonctionnelle dans des projets de recherche (Figure 3.5).

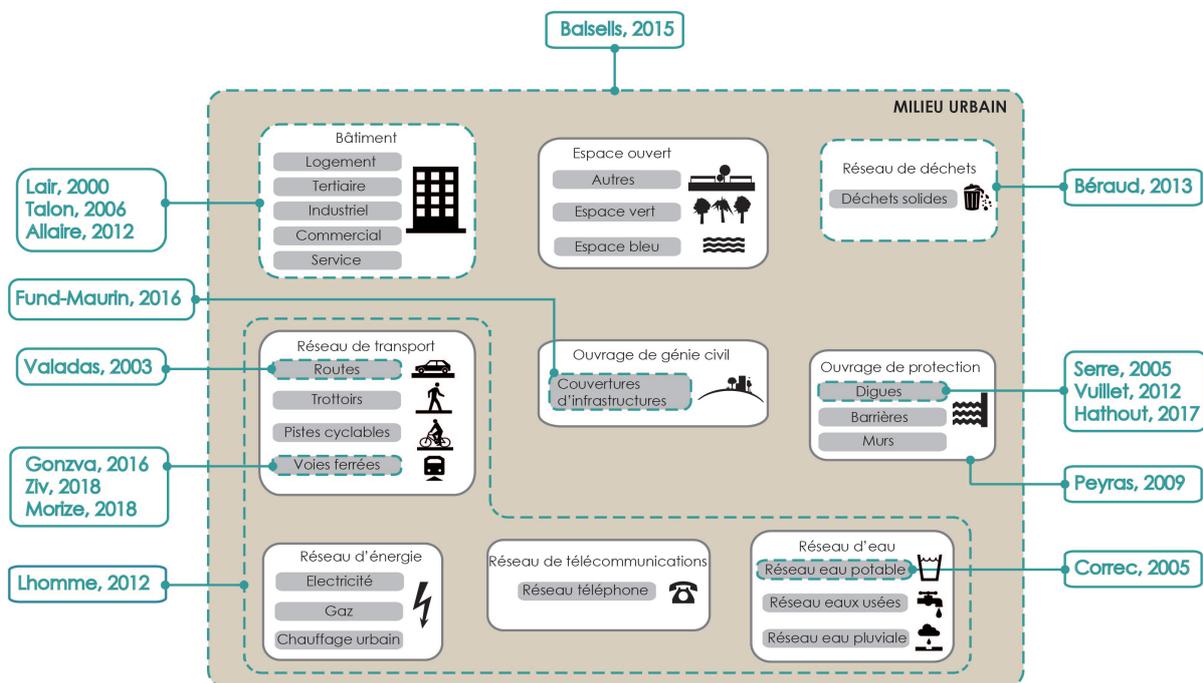


FIGURE 3.5 – Etat de l'art des applications majeures de l'analyse fonctionnelle issue de la Sûreté de Fonctionnement en génie urbain (source : auteur)

Nombre de ces auteurs ont d'ailleurs appliqué, consécutivement à l'Analyse Fonctionnelle, une AMDE : (PEYRAS, 2002), (SERRE, 2005) ou encore (LHOMME, 2012). Cette recherche s'inscrit donc dans la même veine de modèle fonctionnel et modèle dysfonctionnel.

4. http://www.eivp-paris.fr/index.php/La_recherche/Th%C3%A8me_1_-_r%C3%A9silience_urbaine__?idpage=176

La contribution principale des méthodes de Sûreté de Fonctionnement est incontestablement celle de permettre la production de connaissances nouvelles autour de l'analyse des risques affectant les systèmes urbains par un détachement d'une certaine façon de la complication ou de la complexité intrinsèque de ces systèmes. Cette prise de recul se traduit par la possibilité de réduire la complexité des systèmes urbains, en particulier sur le plan technique et sur le plan organisationnel, **en pensant d'une manière transitoire le système comme des sous-systèmes indépendants** et, à plus forte raison, les sous-systèmes comme des composants indépendants. Un travail sur les interfaces entre ces éléments temporairement indépendants dégage les relations qui existent entre eux, produisant ainsi un modèle du système qui se veut simple et progressif, car perfectible, à partir de diagrammes simples à comprendre et à partager entre parties prenantes.

En ce sens, la Sûreté de Fonctionnement fait partie de ces disciplines qui peuvent représenter un apport méthodologique important pour le génie urbain, en particulier à la lumière de son évolution récente qui amène à une certaine refonte de la recherche sur la ville selon plusieurs auteurs (BARLES, 2015; DIAB, 2012). Ces disciplines ouvrent des perspectives considérables, initiées avec un succès certain depuis une quinzaine d'années, pour s'engager vers une maîtrise de ces *risques qui nous gouvernent*, pour paraphraser Michel Marié et Michel Gariépy⁵. Décloisonnement disciplinaire, « décomplication » et « décomplexification » (ou, plus élégamment dit, simplification) des systèmes sont donc mis à l'épreuve de sciences robustes telles que la Sûreté de Fonctionnement qui représentent, comme le montrent les travaux de recherche récents et en cours, sans nul doute une solution aux défis que pose l'évolution des villes dans tous ses aspects sociétaux, économiques ou environnementaux.

3.1.3 Limites des méthodes existantes de Sûreté de Fonctionnement et axes de perfectionnement

Les méthodes issues de la Sûreté de Fonctionnement apparaissent comme d'excellentes candidates pour la démarche d'analyse et de caractérisation de la vulnérabilité des systèmes de transport guidé soumis à un risque inondation en vue d'une démarche plus globale d'amélioration de la résilience de ces systèmes face à ce risque. Pour être profitable, cette caractérisation de la vulnérabilité doit être **exhaustive**, c'est-à-dire **prolonger l'analyse de risque au-delà des défaillances directes** des éléments du système impactés par la prise en compte des défaillances **indirectes** dues aux effets domino internes. Ces effets domino qui se manifestent en situation de crise sont permis par l'existence d'interdépendances entre les parties du système, interdépendances pourtant indispensables au bon fonctionnement de celui-ci en situation normale d'exploitation.

Or, si une méthode de Sûreté de Fonctionnement telle que l'AMDE est capable d'intégrer les dépendances matérielles et fonctionnelles entre composants, elle le fait de façon limitée. L'AMDE est apte à identifier, pour chaque fonction non assurée par un composant sa cause, « *son effet local, son effet au niveau immédiatement supérieur de la décomposition* » ou encore « *son effet final sur le procédé* » c'est-à-dire le système étudié (ZWINGELSTEIN, 1996, p. 447). La notion d'effet « local » est, en effet, ambiguë car elle peut être prise au sens de proximité physique de deux composants ou bien de proximité structurelle entre deux composants faisant référence à l'architecture du système. Il n'est pas, de plus, précisé de quelle façon identifier ces effets locaux et finaux (Figure 3.3, page 112) car s'il semble aisé de les déterminer sur des systèmes dont les « rouages » techniques sont simples ou du moins assez bien connues, il en est tout autre d'infrastructures critiques dont l'apanage premier est leur

5. Marié M., Gariépy M. (1997). *Ces réseaux qui nous gouvernent ?* L'Harmattan, 467 p.

importante complication ou complexité. Dans le cas présent, il est donc très difficile de caractériser la vulnérabilité d'un système de transport subissant un risque inondation par le biais d'une AMDE ordinaire qui ne permettrait pas de saisir l'ensemble des défaillances possibles dans leur origine et dans leurs conséquences en chaîne. L'identification de ces défaillances en chaîne ou d'effet domino implique justement un aspect combinatoire au sein de tout le système que l'AMDE traditionnelle n'intègre pas car elle détermine essentiellement les effets de défaillance sur des éléments pris deux à deux.

De surcroît au fait que les méthodes de Sûreté de Fonctionnement peinent à décrire le fonctionnement et le dysfonctionnement de systèmes compliqués, hyper compliqués voire complexes⁶ comme les systèmes de transport guidé, ce type d'études ont classiquement l'image d'être longues, fastidieuses (LASNIER, 2011, p. 191) notamment parce qu'elles doivent être menées par une équipe pluridisciplinaire afin de rassembler toute la connaissance possible du système étudié (AUBRY et CHÂTELET, 2008). La nature compliquée ou complexe des systèmes urbains engendre des **effets de combinaison des défaillances** qui ne sont alors plus indépendantes ; la conséquence immédiate est donc une difficulté réelle à modéliser une grande quantité de scénarios de défaillances, travail qui devient fastidieux pour l'analyste (WEBER et SIMON, 2016) voire presque impossible vu l'importance des combinaisons possibles. Il est, néanmoins, utile de signaler l'existence de méthodes dynamiques de Sûreté de Fonctionnement tels que les graphes de Markov (GIRAULT, 1964) et les réseaux de Petri⁷ (PETRI, 1963) permettant de traiter des problématiques ardues en tenant compte de paramètres supplémentaires tels que le séquençement des pannes ou l'occurrence de plusieurs événements redoutés.

Mais, elles restent limitées pour répondre aux problématiques de cette recherche de : **(i) production** exhaustive de scénarios de défaillances extrêmement nombreux, dont l'ordre d'apparition successive est un paramètre essentiel à déterminer afin de comprendre la structure de ces effets en chaîne ; **(ii) comparaison** de plusieurs types de systèmes, déclinés selon leur configuration d'implantation sur le territoire, donnant lieu à la nécessité de pouvoir aisément intégrer des reconfigurations du système étudié ; **(iii) cohérence** de l'ensemble de l'étude à partir d'un même modèle afin que les résultats soient homogènes et la comparaison des systèmes soit rationnelle. Ainsi, les méthodes traditionnellement utilisées en Sûreté de Fonctionnement apparaissent aujourd'hui trop « manuelles », statiques, longues à mettre en œuvre et surtout peu aptes, en l'état actuel, à faire face au haut degré de complication de fonctionnement et de dysfonctionnement des systèmes urbains.

Cette ambition est d'actualité d'automatiser et de donner un aspect dynamique aux méthodes issues de la Sûreté de Fonctionnement, tout en conservant leur praticité et leur rigueur originelles, dans le but de prendre en compte la complexité devenue courante des infrastructures critiques. Par exemple, (RIERA *et al.*, 2012) proposent une nouvelle méthode de modélisation dynamique complémentaire aux traditionnels arbres de défaillance et offrent une comparaison des avantages et inconvénients de ces deux approches. (PERROT *et al.*, 2010) présentent un langage de modélisation pour la Sûreté de Fonctionnement dont le but est la génération automatisée d'arbres de défaillance et la réalisation

6. Pour rappel, un objet compliqué peut être simplifié alors que la complexité est un état fondamental qui définit l'objet considéré. Les systèmes de transport guidé sont donc des systèmes compliqués voire *hyper compliqués* plutôt que des systèmes complexes au sens de la systémique car ils ne présentent pas, par exemple, de phénomènes qui émergent de façon imprévisible. Néanmoins, le haut degré de complication ou l'**hyper complication** propre à leur fonctionnement et dysfonctionnement nécessite de s'orienter vers les approches offertes par la systémique.

7. Les réseaux de Petri sont des outils graphiques et mathématiques permettant de modéliser et de vérifier le comportement dynamique de systèmes fonctionnant sur la base d'événements discrets tels que les systèmes de télécommunications ou les réseaux de transport.

de simulations stochastiques sur ces derniers pour des systèmes hyper compliqués car hautement structurés.

La démarche méthodologique construite dans cette recherche s'inscrit donc pleinement dans cette optique d'**automatisation** de méthodes éprouvées issues de la Sûreté de Fonctionnement. L'hypothèse faite est identique à celle de (LHOMME, 2012, p. 180) selon laquelle **une combinaison de méthodes issues de la Sûreté de Fonctionnement permet l'identification et la modélisation des interdépendances, vecteurs d'effets domino, au sein de réseaux techniques tels que les systèmes de transport guidé**. Cette combinaison comprend l'Analyse Fonctionnelle, l'Analyse des Modes de Défaillance et de leurs Effets et les Arbres d'Evènements. L'automatisation de ces méthodes constitue une avancée en donnant un caractère dynamique aux analyses de risque affectant les systèmes urbains.

Synthèse

L'enjeu de la recherche est d'élaborer une démarche méthodologique de résilience capable de fournir une caractérisation globale des risques c'est-à-dire de l'occurrence de l'aléa, puis des impacts matériels directs et indirects c'est-à-dire occasionnés par la propagation de défaillance *via* des effets domino pour en déduire finalement les conséquences fonctionnelles correspondant aux modes d'exploitation possibles du système de transport. La première étape de cette démarche est orientée sur une analyse de vulnérabilité comme préalable nécessaire à une étude de résilience. Le postulat consiste en effet à considérer que pour améliorer la résilience d'un système de transport guidé, il est nécessaire de connaître d'abord sa vulnérabilité. Or, les défaillances par effet domino jouent un rôle majeur dans la vulnérabilité de ces systèmes. Pour analyser ces effets domino et ainsi la vulnérabilité du système, la Sûreté de Fonctionnement est proposée. Elle correspond à l'aptitude d'un système à assurer ses fonctions par l'étude, permise par de nombreuses méthodes existantes, des défaillances potentielles de ses composants et des liaisons entre les composants. Bien qu'elles présentent des inconvénients liés au temps de mise en œuvre manuelle et à leur aspect statique, ces méthodes sont utilisées de façon intensive en génie urbain avec des résultats théoriques et pratiques très intéressants. Cette recherche se place dans la même optique afin de développer un modèle pour identifier et représenter les mécanismes de dysfonctionnement d'un système de transport guidé soumis à un risque inondation.

3.2 Elaboration d'un modèle d'interdépendances entre les éléments d'un système de transport guidé souterrain, de surface et aérien

3.2.1 Description de la démarche méthodologique

Dans une démarche d'analyse de la vulnérabilité des systèmes de transport guidé, préliminaire nécessaire à une démarche d'amélioration de leur résilience, trois méthodes issues de la Sûreté de Fonctionnement sont mobilisées consécutivement : l'**Analyse Fonctionnelle**, l'**Analyse des Modes de Défaillance et de leurs Effets** et les **Arbres d'Evènements** (Figure 3.6). Cette troisième méthode est uti-

lisée dans cette recherche pour représenter les résultats obtenus lors de l'AMDE. Ces Arbres d'Évènements servent dans leur aspect causal c'est-à-dire à formaliser sous forme de graphes d'évènements causaux une séquence d'évènements constituée d'un évènement initiateur et d'une combinaison de défaillances successives. Ils sont donc proches, dans leur emploi dans cette thèse, aux arbres de défaillance, des causes et d'évènement (ZWINGELSTEIN, 1996) et sont dénommés dans la suite graphes d'évènements causaux ou graphes causaux.

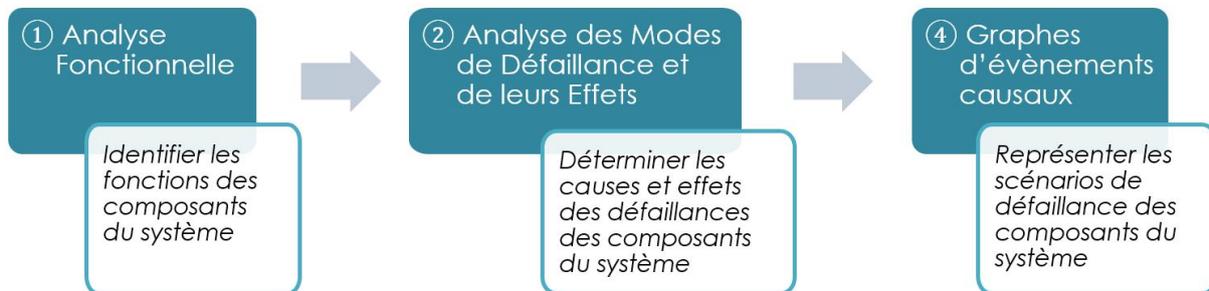


FIGURE 3.6 – Démarche méthodologique pour caractériser la vulnérabilité des systèmes de transport guidé soumis à un risque inondation (source : auteur)

3.2.1.1 Analyse Fonctionnelle

3.2.1.1.1. Application classique et résultats

L'Analyse Fonctionnelle à proprement parler se base sur l'analyse structurelle précédemment réalisée (cf. chapitre 2) qui est une étape préalable. L'Analyse Fonctionnelle est produite au niveau de l'échelle intermédiaire du sous-système, granularité jugée pertinente pour cette analyse dans la mesure où elle permet de déterminer les principaux types d'interactions présentes au sein du système.

Premièrement, des interactions de *contact* existent entre les éléments du système eux-mêmes et entre les éléments du système et les éléments de l'environnement. Ces relations traduisent l'existence d'au moins une connexion physique, matérielle entre les deux éléments (matériel roulant circulant sur l'infrastructure, etc.).

Deuxièmement, des interactions, ou en l'occurrence des flux, de *dépendance* sont mises en avant entre certains éléments du système et de son environnement. En effet, l'existence d'un flux d'un premier élément vers un second élément indique que la réalisation d'un flux d'un premier composant vers un second composant est conditionnée par le bon fonctionnement du premier composant. Pour illustration, le système est fortement dépendant et à plusieurs niveaux successifs du composant extérieur « sous-station électrique » pour assurer leur rôle, les gares sont dépendantes du passage du matériel roulant, eux-mêmes dépendants de l'énergie qui ne peut être fournie que si les sous-stations électriques fonctionnent. Ces interactions sont qualitativement catégorisées selon le degré de dépendance qui est parfois très important, moyen ou faible.

Un point essentiel à considérer est que les interactions de dépendance traduisent une relation induite de **vulnérabilité** dans la mesure où, d'une part, la réalisation d'un flux est conditionnée par le bon fonctionnement du premier élément et, d'autre part, le second élément ne peut fonctionner sans ce flux. Autrement dit, la relation de vulnérabilité entre deux éléments concerne le flux existant du premier élément vers le second élément et la capacité consécutive du second élément à assurer ses fonctions.

Troisièmement, les interactions de *vulnérabilité* du système sont étudiées au travers de cette Analyse Fonctionnelle. Dans ce troisième type d'interactions, le système est analysé en situation *de crise* contrairement aux deux précédents types d'interactions présentes même en situation *normale*. Ces interactions révèlent un niveau qualitatif de vulnérabilité de chaque élément au risque inondation, traduisant en fait l'impact spécifique qu'a l'aléa sur les éléments du système. La construction des niveaux de vulnérabilité présentés est issue de retours d'expériences sur les impacts d'inondation et donnent donc un degré empirique de vulnérabilité. Néanmoins, dans une perspective globale de démarche méthodologique d'évaluation de la vulnérabilité des systèmes de transport guidé face au risque inondation, cette première étape qu'est l'Analyse Fonctionnelle met déjà en exergue ces aspects de vulnérabilité entre éléments et aléa, comme souhaité.

Finalement, les trois grands types d'interactions au sein du système sont :

- en situation normale :
 - les relations de **contact**, traduisant l'existence d'au moins une connexion physique entre deux éléments ;
 - les flux de **dépendance**, indiquant que la réalisation d'un flux d'un premier composant vers un second composant est conditionnée par le bon fonctionnement du premier composant.
- en situation de crise (lors d'une inondation) :
 - les flux de **vulnérabilité**, révélant un niveau qualitatif de vulnérabilité de chaque composant au risque inondation.

Ces interactions sont représentées sous la forme de **Bloc-diagrammes Fonctionnels** (BdF). Ainsi, les trois configurations d'implantation sont évaluées selon les deux situations possibles. L'exemple du BdF d'un système de transport guidé de surface en situation normale, contenant les interactions de contact et dépendances, est présenté en [Figure 3.7](#) et en situation de crise, contenant les interactions de vulnérabilité, en [Figure 3.8](#). Les autres BdF sont en [Annexe](#).

A partir de ces BdF, l'ensemble des fonctions assurées par chaque sous-système sont déterminées sous forme de **Tableaux d'Analyse Fonctionnelle** (TAF), en vue d'une utilisation vers une analyse de risques portée par l'AMDE. Deux types de fonctions de base sont distinguées, des **fonctions principales** qui représentent le but de l'action du système et en sont l'expression du besoin et des **fonctions de contraintes** qui représentent les actions et/ou les réactions du système par rapport à son environnement ([ZWINGELSTEIN, 1996](#), p. 378). Ce distinguo caractérise la démarche APTE qui est une méthode d'analyse de la valeur appliquée à l'origine à l'organisation d'entreprise et s'est orientée ensuite pour l'analyse fonctionnelle d'un produit ou système existant ou à concevoir ([ZWINGELSTEIN, 1996](#), p. 376). Dans le cas d'un système de transport guidé, les fonctions principales listent donc les fonctions d'usage des sous-systèmes et les fonctions de contraintes sont celles issues de l'atteinte du sous-système par l'aléa hydrologique ou inondation en tant qu'élément de l'environnement ([Tableau 3.1](#)).

3.2.1.1.2. Application originale et résultats

Dans cette démarche d'amélioration de la résilience précédée par une indispensable étude de la vulnérabilité des systèmes de transport guidé face au risque inondation, la comparaison des configurations d'implantation en aérien, en surface et en souterrain offre naturellement l'opportunité d'avoir une vision « en **trois dimensions** » des impacts de ce risque naturel.

L'application de l'Analyse Fonctionnelle précédente peut, en effet, être représentée en 3D dans la

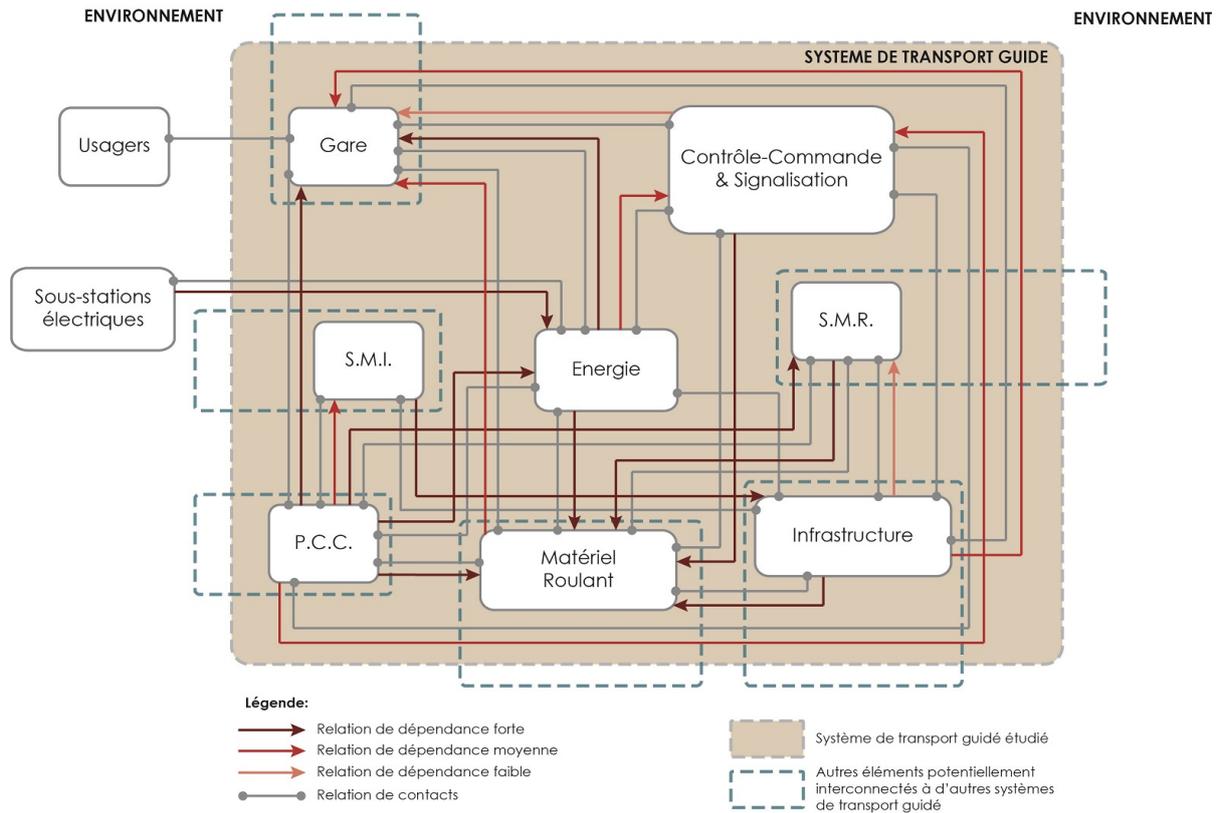


FIGURE 3.7 – Bloc-diagramme Fonctionnel d'un système de transport guidé de surface en **situation normale** (source : auteur)

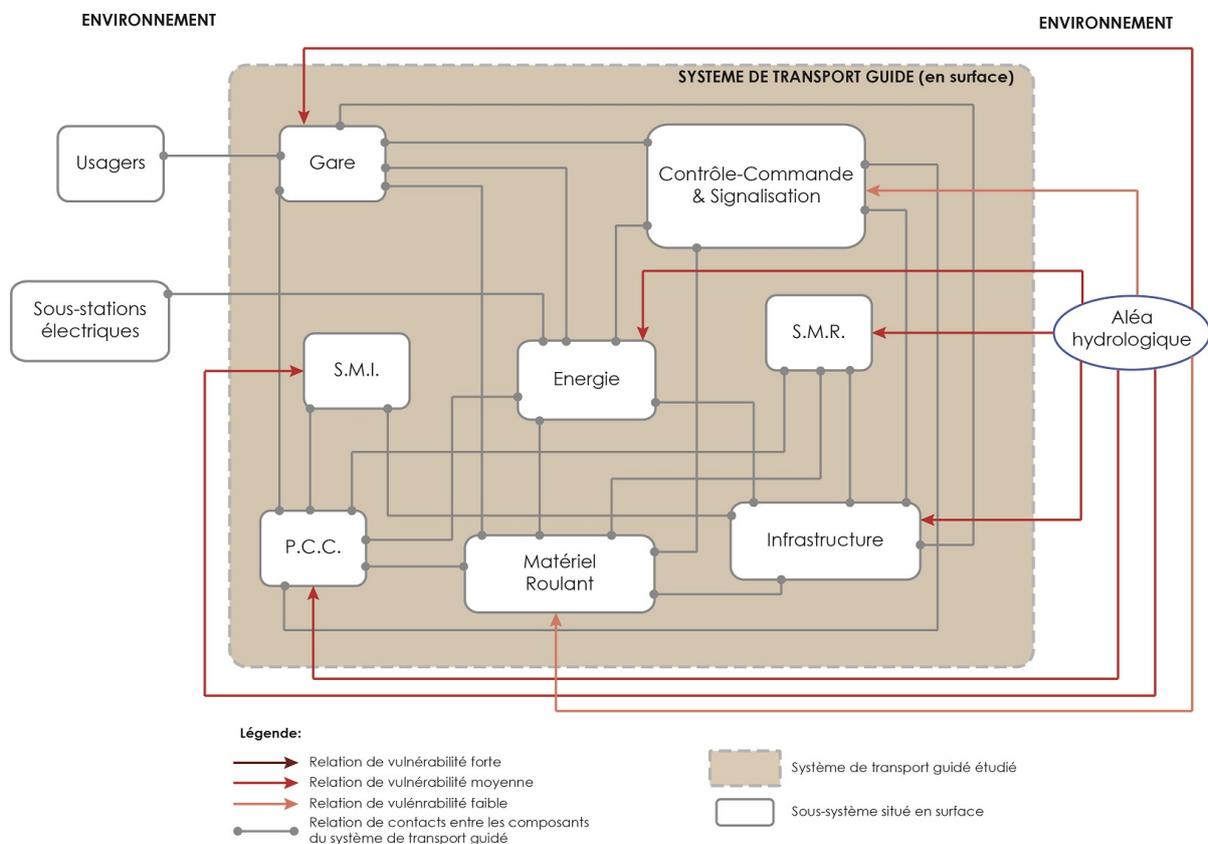


FIGURE 3.8 – Bloc-diagramme Fonctionnel d'un système de transport guidé de surface en **situation de crise** lors d'un aléa inondation (source : auteur)

TABLEAU 3.1 – Extrait du Tableau d'Analyse Fonctionnelle dans le cas du système de transport guidé aérien

Numéro	Composant	Classification de la fonction	Fonction
1	Energie	Fonctions principales	— Assurer la distribution de l'énergie électrique de traction
		Fonctions de contraintes	— Résister aux pressions hydromécaniques exercées par l'inondation — Permettre le bon fonctionnement du matériel roulant — Assurer la continuité de service
2	Ouvrage d'art (pont, viaducs...)	Fonctions principales	— Assurer le support de composants d'un système de transport guidé
		Fonctions de contraintes	— Résister aux pressions hydromécaniques exercées par l'inondation au niveau des piles des ouvrages d'art (affouillement) — Préserver les composants ferroviaires des atteintes de la crue — Assurer la continuité de service

mesure où dans le cas de systèmes en souterrain, certains composants du système et de son environnement se trouvent ordinairement positionnés en surface (cas du S.M.I., S.M.R., les usagers et sous-stations électriques). La situation inverse est également vraie : certains composants de systèmes de transport de surface peuvent être positionnés en souterrain (cas du P.C.C.). Ainsi, au sein d'un même système de transport guidé, des interactions de contact et de dépendance peuvent exister entre des composants souterrains et des composants en surface. Dans une approche globale, ce type de représentation en 3D a le mérite de mettre visuellement en évidence les interactions entre équipements urbains au sol et équipements urbains en sous-sol.

De façon identique aux BdF présentés précédemment, les interactions de dépendance entre les composants des systèmes de transport guidé de surface et en souterrain, en situation normale (Figure 3.9) et les interactions de vulnérabilité au niveau des composants de ces deux types de systèmes de transport guidé, en situation de crise (Figure 3.10), sont identifiées et représentées.

A partir de ces BdF en 3D, il est aisé de constater de façon très visuelle et synthétique un plus grand nombre de vulnérabilité « forte » (flèches marron) à l'égard des composants de la configuration souterraine, de vulnérabilité « moyenne » (flèches rouge) dans le cas des composants propres à la configuration au sol et de vulnérabilité « faible » (flèches roses) vis-à-vis des composants constitutifs d'une configuration en aérien. Par conséquent, il apparaît de façon qualitative et empirique grâce à cette représentation 3D que **les composants des systèmes de transport souterrain sont plus vulnérables au risque inondation que ceux de surface et en aérien.**

3.2.1.1.3. Conclusions

Quelques conclusions liminaires peuvent être tirées de ces diagrammes fonctionnelles en situation de crise en comparant le cas de la surface et le cas du souterrain.

Premièrement, il apparaît que le risque inondation affecte le même nombre de sous-systèmes que l'on soit dans le cas d'un système souterrain ou d'un système en surface. Deuxièmement, ces dia-

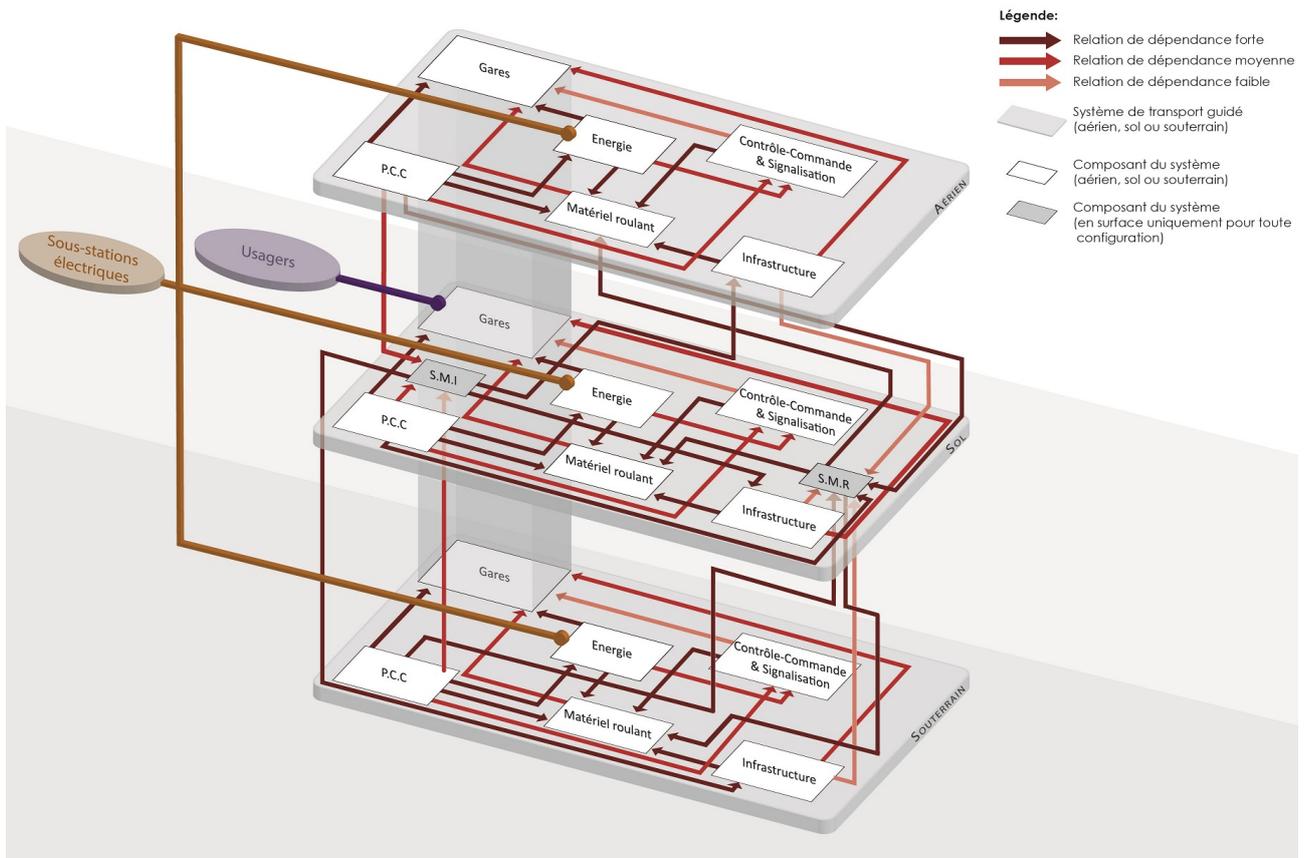


FIGURE 3.9 – Bloc-diagrammes Fonctionnels en 3 dimensions des interactions de dépendance de systèmes de transport guidé en aérien, au sol et en souterrain représentés en **situation normale** (GONZVA *et al.*, 2014a)

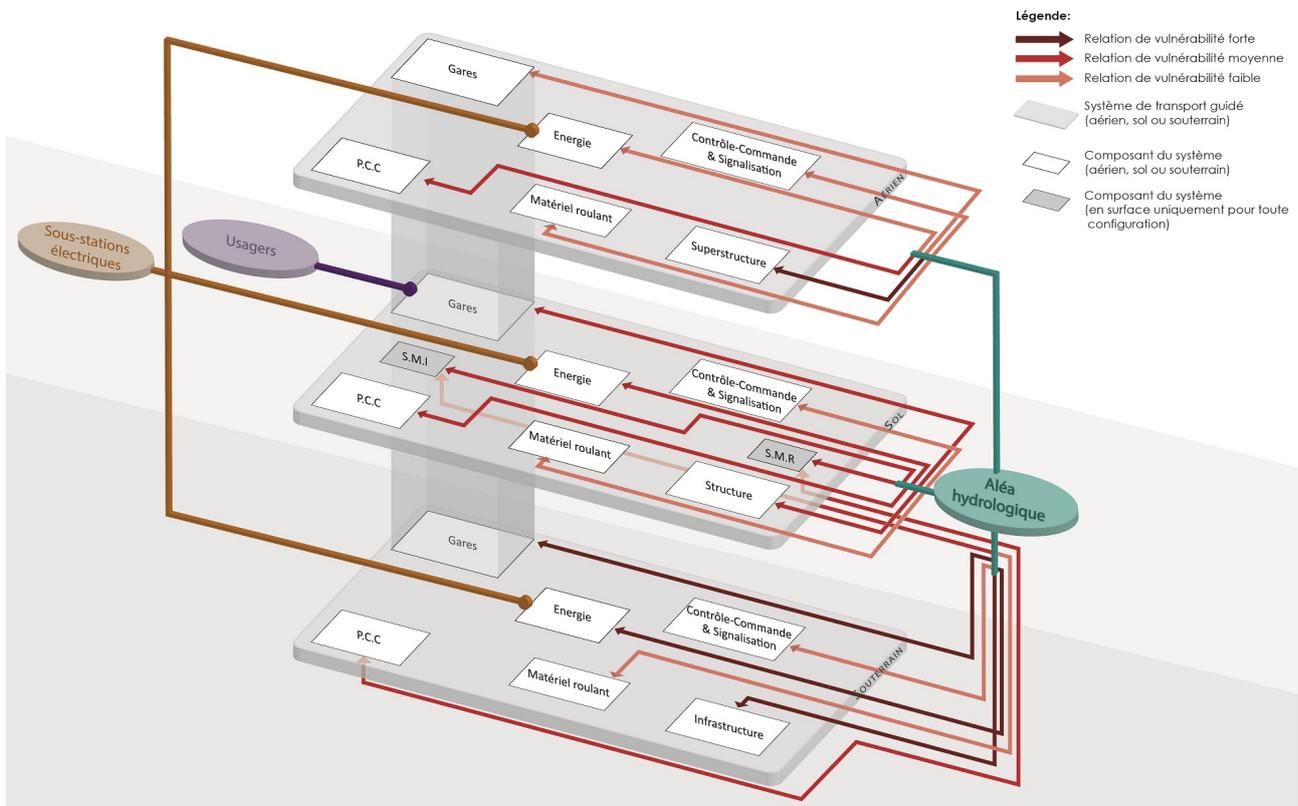


FIGURE 3.10 – Bloc-diagrammes Fonctionnels en 3 dimensions des interactions de vulnérabilité de systèmes de transport guidé en aérien, au sol et en souterrain représentés en **situation de crise** (GONZVA *et al.*, 2014a)

grammes révèlent que le risque inondation impacte plus intensément les systèmes en souterrain que les systèmes en surface. En effet, le système souterrain présente des relations de vulnérabilité « forte » et « moyenne » en plus grand nombre que dans le cas du système en surface, ce qui indique une plus grande vulnérabilité globale et empirique du système de transport. Ainsi, pour un élément donné d'un système de transport guidé, il semble plus vulnérable à un aléa inondation lorsqu'il est positionné en souterrain qu'en surface (cas des sous-systèmes : gare, contrôle-commande et signalisation, énergie, infrastructure et P.C.C.).

Cette vulnérabilité accrue des systèmes souterrains s'accorde tout à fait avec des inondations passées. Notons quelques exemples d'inondation de métros souterrains (COMPTON *et al.*, 2002) :

- octobre 1996 à Boston (Etats-Unis) : 2 à 3 km de ligne et plusieurs stations inondées ;
- mai 1998 à Séoul (Corée du Sud) : 11 stations et 11 km de lignes inondées ;
- septembre 2001 à Taipei (Taïwan) : inondation du centre de contrôle situé en souterrain de la *Taipei Main Station*, entraînant la suspension de l'exploitation de toutes les lignes souterraines.

Ainsi, à ce stade, l'Analyse Fonctionnelle est terminée. Au travers de cette analyse, étudier la vulnérabilité d'un système de transport soumis au risque inondation a permis de mettre en évidence les sous-systèmes impliqués dans les défaillances, et donc dans la vulnérabilité observée du système. Pour déterminer plus précisément les causes et les conséquences spécifiques de la défaillance d'un sous-système lors d'une inondation, l'Analyse Fonctionnelle ne suffit pas à elle seule. C'est la raison pour laquelle une autre méthode de Sûreté de Fonctionnement est employée : l'AMDE.

3.2.1.2 AMDE

L'AMDE débute dès la fin de l'Analyse Fonctionnelle. Elle prend pour données de départ les TAF en cherchant à déterminer les modes de défaillance des fonctions de contraintes identifiées, c'est-à-dire la cause qui conduit à la non réalisation d'une fonction et l'effet sur d'autres fonctions de cette fonction non réalisée.

Cependant, contrairement à l'Analyse Fonctionnelle dont la **granularité d'étude est celle du sous-système** en tant que niveau intermédiaire de décomposition structurelle, l'AMDE est appliquée au niveau du **composant** représentant le niveau élémentaire de la décomposition structurelle d'un système de transport guidé. La démarche méthodologique est donc progressive par l'application successive de méthodes à des niveaux structurels de plus en plus fins.

Trois AMDE ont été réalisées pour chacune des trois configurations d'implantation d'un système de transport guidé lorsqu'il subit une inondation. Synthétisés sous forme de tableau, les résultats de l'AMDE listent : les composants un à un, avec un identifiant, le sous-système dans lequel il est inclus, les fonctions numérotées que ce composant assure, ses modes de défaillance qui correspondent à la non réalisation de ses fonctions suite à un aléa, les événements qui ont causé la survenue de ces modes de défaillance et, enfin, les effets sur l'ensemble du système de la dysfonction de ce composant. Le [Tableau 3.2](#) fournit un extrait de l'AMDE pour le composant « ballast » dans le cas d'un système de transport guidé de surface. Les trois AMDE complètes se trouvent en [Annexe](#).

Ces AMDE sont complétées à l'aide d'experts de l'exploitation et de la maintenance de systèmes de transport guidé. Chaque composant est pris un à un et les experts ont identifié l'ensemble des dysfonctions possibles lorsqu'ils sont soumis à un risque inondation. A cette étape, l'objectif de l'étude n'est pas de déterminer les dysfonctions les plus probables de survenir mais bel et bien toutes les

TABLEAU 3.2 – Extrait de l'AMDE pour le composant « ballast » d'un système de transport guidé en surface

N° Fonct.	Fonctions	Défaillances	Causes de la défaillance de la fonction	Effets de la défaillance de la fonction
47	— Permettre la stabilité du matériel roulant en circulation	— Ne permet pas la stabilité du matériel roulant en circulation	— Dislocation de la voie ferrée	— Interruption de la circulation ferroviaire
48	— Répartir les charges sur la plateforme — Immobiliser les traverses dans leur position — Assurer le drainage des eaux zénithales	— Ne répartit pas les charges sur la plateforme — N'immobilise pas les traverses dans leur position — N'assure pas le drainage des eaux zénithales	— Emportement du ballast — Submersion du ballast	— Dislocation de la voie ferrée
49	— Résister aux pressions hydromécaniques exercées par la crue — Éviter la submersion — Éviter l'emportement	— Ne résiste pas aux pressions hydromécaniques exercées par la crue — N'évite pas la submersion — N'évite pas l'emportement	— Débit trop grand — Hauteur d'eau trop grande — Durée d'immersion trop grande — Charriage d'éléments massifs par la crue	— Emportement du ballast — Submersion du ballast
50	— Assurer le maintien physique de la plateforme durant la crue	— N'assure pas le maintien physique de la plateforme durant la crue	— Hauteur d'eau trop grande — Charriage d'éléments massifs par la crue	— Emportement du ballast — Dislocation de la voie ferrée

façons qu'ont les composants, pris un à un, de ne plus assurer leur fonction en cas d'inondation, selon une configuration donnée. Cette tendance vers l'**exhaustivité** s'avère primordiale pour caractériser précisément les défaillances directes et, surtout, celles par effet domino afin de caractériser la vulnérabilité systémique.

Finalement, l'AMDE synthétise formellement et de façon exhaustive les informations relatives aux défaillances de chacun des composants des différents sous-systèmes du système de transport guidé. Elle met en évidence les effets possibles de la défaillance sur le système et les événements qui sont la cause génératrice de cette défaillance. De cette façon, et c'est un des résultats les plus intéressants de l'AMDE, apparaissent des **scénarios de défaillances** produits par les interdépendances entre les différents composants : l'effet d'une défaillance peut être la cause d'une autre défaillance.

3.2.1.3 Graphes d'évènements causaux : exploitation des résultats de l'AMDE

Grâce à l'AMDE et en raison de son caractère exhaustif dans l'identification des modes de défaillance de chacune des fonctions assurées par chacun des composants du système, il est possible d'établir des **scénarios de défaillances**. Dans le cadre de cette recherche de caractérisation préalable de la vulnérabilité des systèmes de transport guidé soumis à un risque inondation en vue d'une démarche d'amélioration de leur résilience, l'objectif premier à ce niveau n'est pas de déterminer des scénarios plus vraisemblables que d'autres mais bien de les déterminer tous. En effet, l'intérêt est de mettre en évidence toutes les interdépendances qu'il peut exister dans le fonctionnement des composants en identifiant quelle fonction, pour être réalisée, a besoin de quelle autre. Lors d'un aléa inondation, ce sont justement ces interdépendances inhérentes aux composants du système qui conduisent à des défaillances par effet domino et, finalement, au dysfonctionnement général du système de transport. De manière successive est ainsi déterminé le scénario de défaillances qui, à partir de la défaillance d'un composant initial provoque la défaillance du système. Un exemple de scénario de défaillances est présenté en [Figure 3.11](#) par une lecture dysfonctionnelle, c'est-à-dire en mettant en évidence les fonctions qui ne sont plus assurées successivement.

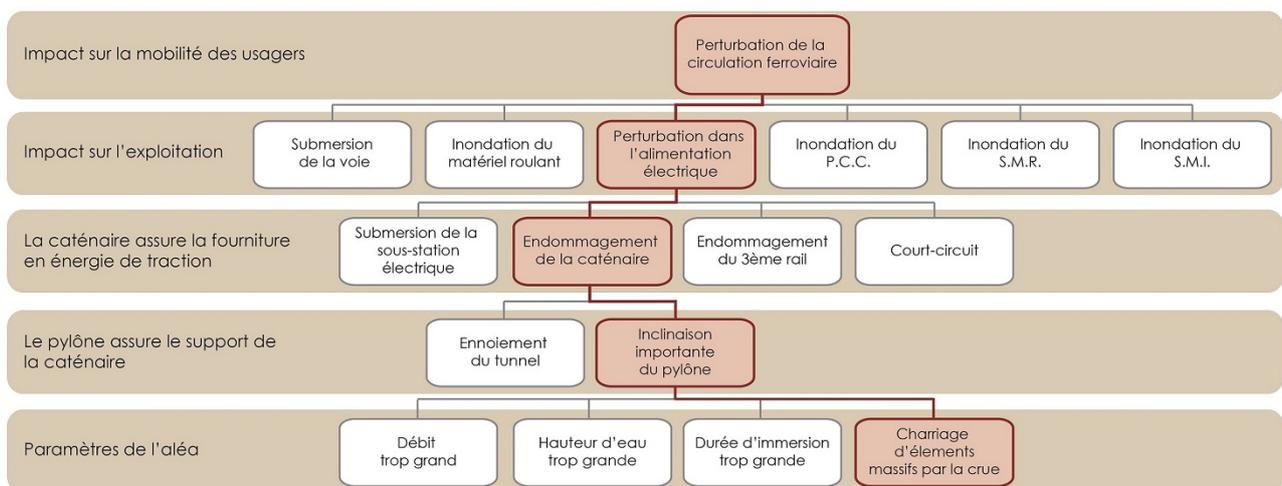


FIGURE 3.11 – Exemple de scénario de défaillances en conclusion de l'AMDE pour un système de transport guidé de surface soumis à une inondation (représentation inspirée de (LHOMME *et al.*, 2011)) (source : auteur)

L'AMDE est une méthode puissante dans la mesure où elle permet d'être exhaustif dans la déter-

mination des défaillances que peut subir chaque composant. Pour chacune des trois configurations d'implantation, plus de 80 fonctions et près de 350 couples « cause-effet » uniques (la défaillance d'une fonction pouvant être due à plusieurs causes et donc engendrer plusieurs effets) ont, en effet, été déterminés (Tableau 3.3).

TABLEAU 3.3 – Caractéristiques des AMDE réalisées pour les trois configurations d'implantation d'un système de transport guidé soumis à un risque inondation

Configuration d'implantation	Nombre de fonctions identifiées	AMDE	
		Nombre de couples cause – effet	
		totaux	uniques
Aérien	87	442	356
Surface	86	446	362
Souterrain	85	427	342

Deux questions apparaissent alors à cette étape centrée sur une démarche d'analyse de vulnérabilité :

- comment utiliser l'**exhaustivité** de la méthode d'AMDE afin d'exploiter les nombreuses informations qu'elle contient ? ;
- comment être exhaustif dans la **production** de l'ensemble des scénarios de défaillances, c'est-à-dire à la fois ceux composés des défaillances directes et ceux composés des défaillances par effet domino dues aux interdépendances ?

L'élaboration d'un modèle numérique implémenté a permis de répondre scientifiquement et techniquement à ces deux interrogations.

Synthèse

Afin d'analyser la vulnérabilité des systèmes de transport guidé, trois méthodes issues de la Sûreté de Fonctionnement sont mobilisées consécutivement : l'analyse fonctionnelle, l'Analyse des Modes de Défaillances et de leurs Effets et les graphes d'évènements causaux. Chaque méthode est appliquée pour des systèmes souterrains, de surface et aériens. L'analyse fonctionnelle identifie les relations qui s'exercent entre les sous-systèmes du système et avec les éléments de son environnement. Ces relations sont représentables sous formes de diagrammes traditionnellement en deux dimensions et, de façon innovante, en trois dimensions. L'AMDE est réalisée ensuite à l'échelle des composants et permet d'identifier composant par composant les défaillances possibles qui peuvent survenir en situation d'inondation, les causes et les effets de ces défaillances. Grâce à ce travail se forment des *scénarios de défaillances* produits par les interdépendances entre les différents composants selon le principe suivant : l'effet d'une défaillance d'un composant peut être la cause d'une défaillance d'un autre composant. Les graphes d'évènements causaux représentent graphiquement les scénarios de défaillances. Or, pour exploiter toutes les informations contenues dans l'AMDE, un travail plus approfondi d'exploitation de celle-ci apparaît nécessaire.

3.3 Principes d'implémentation d'un modèle informatique pour la production des interdépendances

3.3.1 Cahier des charges fonctionnels du modèle informatique de production des effets domino

Pour chacune des trois configurations d'implantation d'un système de transport guidé, la démarche d'analyse de vulnérabilité est initiée par une analyse fonctionnelle (formalisant un modèle fonctionnel du système) et une analyse dysfonctionnelle (formalisant un modèle dysfonctionnel du système) lors de l'occurrence d'une inondation pour ensuite être approfondie par une AMDE spécifiant l'ensemble des défaillances directes des composants dues à un tel risque.

Il est indispensable désormais, au vu de leur prépondérance dans les conséquences de risques naturels tels que le risque inondation, de **spécifier les mécanismes de défaillance par effet domino** c'est-à-dire ces **mécanismes propageant le risque au sein de l'ensemble du système de manière à générer indirectement d'autres défaillances** (Figure 3.12). Au vu de l'aspect combinatoire de ces mécanismes parmi l'ensemble des causes possibles de défaillances initiales de composants et l'ensemble des effets consécutifs, il semble opportun de s'orienter vers des moyens informatiques pour construire un modèle d'interdépendances aux propriétés d'**exhaustivité**, d'**automatisation**, de **rapidité** et de **cohérence** (Figure 3.13).

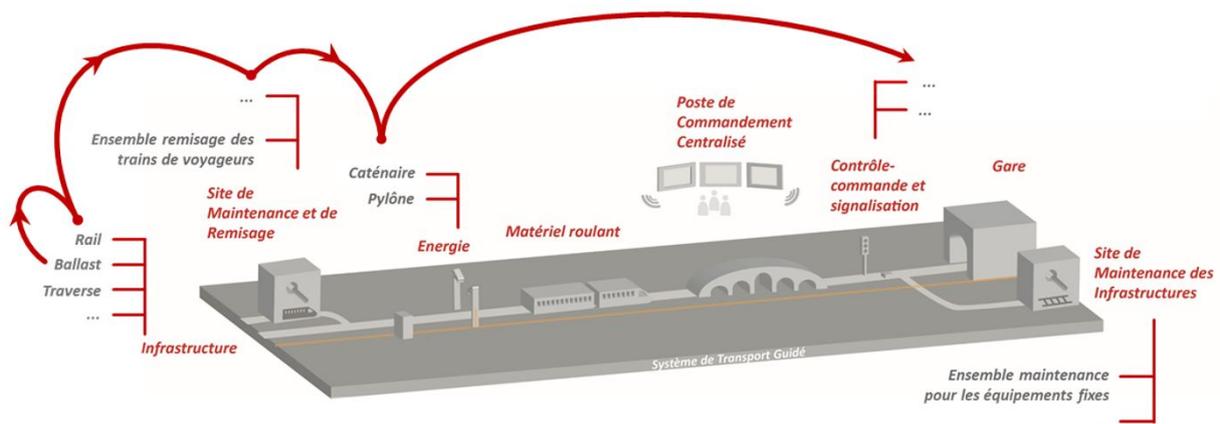


FIGURE 3.12 – Principe de propagation globale du risque par effet domino au sein de tout le système à partir d'une défaillance initiale (source : auteur)

3.3.1.1 Objectif d'exhaustivité

La démarche de caractérisation de vulnérabilité doit permettre d'identifier l'ensemble des scénarios de défaillances successives par effet domino. Pour cela, il est important de se baser sur les résultats de l'AMDE réalisée précédemment dans la mesure où elle contient, pour chaque composant, toutes les causes liées à un risque inondation qui peuvent entraîner sa défaillance et tous les effets que sa défaillance peut ensuite engendrer en matière d'autres défaillances sur d'autres composants. Il s'en suit ainsi la détermination de toutes les défaillances induites par la défaillance initiale de chaque composant pris un à un qui se diffuse alors de proche en proche (effet 1, générant un effet 2, générant...) créant des scénarios de défaillances successives.

3.3.1.2 Objectif d'automatisation

Les scénarios de défaillances successives, c'est-à-dire dues à des effets domino, sont nombreux au vu du nombre de sous-systèmes (8) et du nombre de composants (24 ou 25, selon la configuration d'implantation) d'un système de transport guidé. Les identifier tous un à un puis les représenter sous forme de graphes d'évènements causaux de façon manuelle serait donc indiscutablement une tâche très longue et compliquée dans laquelle des erreurs seraient, de surcroît, possibles par une mauvaise identification d'une relation cause-effet.

De plus, en cas de modification structurelle du système afin d'intégrer par exemple une spécificité propre à un projet, ou de regrouper certains composants au sein d'un sous-système, ou encore de dissocier un composant en plusieurs éléments constitutifs, le modèle informatique doit être en mesure de pouvoir générer à nouveau l'ensemble des scénarios de défaillances successives dans cette nouvelle architecture sans qu'un analyste n'ait à refaire manuellement tout le travail.

Il est donc important de pouvoir automatiser ce processus d'identification et de production de défaillances par itération sur l'ensemble des composants.

3.3.1.3 Objectif de rapidité

En lien avec la nécessité d'automatiser la production des scénarios de défaillances successives, il est tout aussi essentiel que cette production se fasse rapidement. Là aussi, une modification structu-

relle du système ne doit pas entraîner un temps d'exécution trop important pour déterminer les défaillances par effet domino potentielles dans le cas d'un risque inondation, remettant en cause la souplesse et la praticité souhaitées dans cette démarche de caractérisation de vulnérabilité.

Ainsi, il doit être possible d'interroger les résultats de l'analyse de risque faite par l'intermédiaire de l'AMDE pour des conceptions différentes du système afin de les comparer dans leur potentialité à engendrer des défaillances par effet domino.

3.3.1.4 Objectif de cohérence

Le modèle d'interdépendances doit être cohérent, ou plus exactement il doit produire des résultats cohérents étant donné qu'un de ces objectifs est la comparaison de la vulnérabilité d'un système de transport guidé soumis au risque inondation dans ses trois configurations d'implantation traditionnelle. Autrement dit, pour que cette comparaison soit juste, il est nécessaire que les scénarios de défaillances successives aient été constitués de façon homogène par un modèle unique. De cette façon, les conclusions qui pourront être tirées entre aérien, surface et souterrain en matière d'implantation dans le cas de potentiels risques d'inondation présenteront une unité.

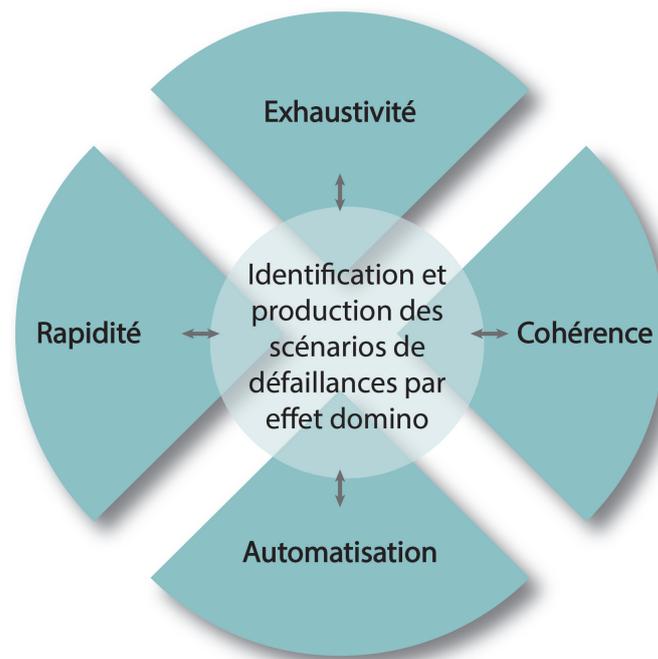


FIGURE 3.13 – Propriétés fondamentales du modèle d'identification et de production des scénarios de défaillances par effet domino au sein d'un système de transport guidé faisant face à un risque inondation (source : auteur)

3.3.2 Principes de fonctionnement du modèle d'interdépendances

L'approche choisie dans le modèle informatisé de production des défaillances successives de composants par effet domino est avant tout **dysfonctionnelle**. Le modèle fonctionne, en effet, de telle façon qu'il permet de déterminer dans un premier temps toutes les dysfonctions en chaîne qui surviennent au sein du système pour ensuite remonter, dans un second temps, aux composants défaillants associés à chaque dysfonction. De cette manière, il est possible de passer d'une chaîne de dysfonctions

successives dues à des effets domino à une chaîne de défaillances successives dues à des effets domino.

Par exemple, à partir de l'extrait d'AMDE présentée dans le [Tableau 3.2](#) (page 126), on observe que le risque inondation peut impliquer que certaines fonctions telles que « permettre la stabilité du matériel roulant en circulation » et « répartir les charges sur la plateforme » ne sont plus assurées. Le système dysfonctionne. Puis, le modèle remonte ensuite au composant ordinairement en charge d'assurer ces fonctions à savoir le composant « ballast » pour l'identifier comme un composant défaillant.

Tout l'intérêt théorique de passer des dysfonctions aux défaillances réside dans la compréhension des atteintes à l'intégrité matérielle du système en cas d'inondation. L'intérêt pratique est porté par les stratégies de conception et de maintenance à mettre en place pour ces défaillances indirectes de composants.

3.3.2.1 Données d'entrée : AMDE vers une base de données

L'approche systémique des défaillances subies par un système de transport guidé faisant face à un risque inondation se construit à partir d'une défaillance origine simulée (cause initiale). Il s'en suit la détermination de toutes les défaillances induites par la défaillance d'origine qui vont se diffuser de proche en proche.

Le principe est le suivant :

- chaque fonction de chaque composant est simulée comme n'étant pas assurée : c'est la dysfonction initiale (cause 0) ;
- cette dysfonction initiale implique un premier effet (effet 1) qui correspond à la dysfonction d'une autre fonction qui n'est plus assurée. Cette dysfonction peut concerner une autre fonction du même composant initiale car il réalise potentiellement plusieurs fonctions ou peut concerner une fonction d'un autre composant du système ; c'est la première itération par effet domino ;
- le premier effet (effet 1) peut à son tour causer (cause 1) l'interruption d'une autre fonction (effet 2), et ainsi de suite.

Ainsi, de façon simplifiée, le principe itératif pour déterminer les défaillances par effet domino est le suivant :

- cause 0 produit un effet 1 ;
- effet 1 = cause 1 ;
- cause 1 produit un effet 2 ;
- effet 2 = cause 2 ;
- etc.

Pour déterminer cette succession d'un point de vue pratique, il est donc nécessaire de pouvoir interroger l'AMDE ou plus précisément réinterroger les résultats contenus dans celle-ci. L'AMDE telle quelle permet, en effet, de déterminer l'effet 1 produit par la cause 0 par la lecture du contenu des colonnes « causes de la défaillance de la fonction » et « effets de la défaillance de la fonction » mais ne permet pas, de façon pratique, d'aller plus loin dans les dysfonctions successives.

Pour cela, une **base de données (BdD)** qui contient l'ensemble des résultats obtenus pour chacune des AMDE est construite. Trois BdD sont donc élaborées : la BdD pour un système implanté en aérien,

la BdD pour un système en surface et la BdD relative à un système souterrain. Dans chaque BdD, l'AMDE est stockée au sein d'une table.

Cet import de l'AMDE au sein d'une BdD se fait avec quelques choix. Premièrement, toutes les colonnes de l'AMDE ne sont pas conservées dans la BdD. En effet, seules les colonnes importantes pour déterminer les défaillances en chaîne sont retenues : les colonnes « causes de la défaillance de la fonction », « effets de la défaillance de la fonction » et enfin « composant ». Pour cette dernière colonne, l'information du composant impliqué est conservée afin de pouvoir remonter à celui-ci dans la succession des causes et effets de défaillance ; pour chaque composant, un identifiant lui est attribué pour être traité dans la BdD (Tableau 3.4). La Figure 3.14 illustre sur une ligne ferroviaire à quoi correspondent réellement quelques identifiants. Deuxièmement, d'un point de vue pratique, pour automatiser la création de liens de causalité au sein de la BdD entre les défaillances, une **typologie** de causes et d'effets doit être établie. Des « **libellés** » uniques de cause et d'effet sont, en effet, définis pour chaque configuration d'implantation (Tableau 3.5) de sorte que la BdD puisse, au travers d'une succession de requêtes dont le principe est expliqué ci-dessous, relier un effet d'une défaillance comme étant une cause d'une autre défaillance au sein d'une partie du système.



FIGURE 3.14 – Illustration sur une ligne de transport de quelques composants et de leurs identifiants respectifs (source : auteur)

Ainsi, grâce à la BdD, l'AMDE est prête à être interrogée (Figure 3.15) pour déterminer, en plus des défaillances directes, les défaillances indirectes successives c'est-à-dire celles générées par effet domino.

3.3.2.2 Algorithme basé sur des requêtes au sein de la BdD pour identifier les interdépendances

Une fois la typologie établie de libellés uniques de cause et d'effet pour chaque configuration d'implantation, un **algorithme** a été développé afin de déterminer par itérations successives les relations de causes à effets directes entre tous les composants.

Cet algorithme est basé sur plusieurs requêtes réalisées au sein de la BdD dont le principe est le sui-

TABLEAU 3.4 – Identifiant des composants pour déterminer les scénarios de défaillances successives par effet domino au sein d'une base de données

Sous-système	Composant	Configuration d'implantation		
		Souterrain	Surface	Aérien
Energie	Caténaire	En_SS_1	En_S_1	En_A_1
	Rail conducteur latéral (troisième rail)	En_SS_2	En_S_2	En_A_2
	Pylône et fondations	-	En_S_3	En_A_3
Contrôle- Commande et Signalisation	Composants « à bord » au sein du matériel roulant	CCS_SS_1	CCS_S_1	CCS_A_1
	Composants « au sol » : détecteurs, balises	CCS_SS_2	CCS_S_2	CCS_A_2
	Composants « au sol » : mécanismes d'appareils de voie	CCS_SS_3	CCS_S_3	CCS_A_3
	Composants « au sol » : câbles de signalisation	CCS_SS_4	CCS_S_4	CCS_A_4
S.M.R.	Equipements « remisage » du matériel roulant voyageurs	SMR_1	SMR_1	SMR_1
	Equipements « maintenance » du matériel roulant voyageurs	SMR_2	SMR_2	SMR_2
S.M.I.	Equipements « remisage » des trains de travaux	SMI_1	SMI_1	SMI_1
	Equipements « maintenance » des trains de travaux	SMI_2	SMI_2	SMI_2
P.C.C.	Salle d'exploitation	PCC_SS_1	PCC_S_1	PCC_A_1
	Câbles (remontées / transmission d'informations)	PCC_SS_2	PCC_S_2	PCC_A_2
Gare	Espaces d'accès	G_SS_1	G_S_1	G_A_1
	Equipements électromécaniques	G_SS_2	G_S_2	G_A_2
	Câbles en gare	G_SS_3	G_S_3	G_A_3
Matériel roulant		MR_SS	MR_S	MR_A
Infrastructure	Rail	I_SS_1	I_S_1	I_A_1
	Traverse	I_SS_2	I_S_2	I_A_2
	Appareil de voie	I_SS_3	I_S_3	I_A_3
	Ballast (cas de voie avec ballast)	I_SS_4	I_S_4	I_A_4
	Quai	I_SS_5	I_S_5	I_A_5
	Ouvrage de support de la voie			
	Superstructure : pont, viaduc...	-	-	I_A_6
	Structure : plateforme	-	I_S_6	-
	Infrastructure : tunnel	I_SS_6	-	-
	Ouvrage hydraulique			
	Tuyaux de drainage	-	-	I_A_7
	Ouvrage de collecte	-	I_S_7	-
	Pompe d'épuisement	I_SS_7	-	-
Dalle ferroviaire (cas de voie sans ballast)	I_SS_8	I_S_8	I_A_8	

TABLEAU 3.5 – Caractéristiques des libellés uniques de causes et d'effets de défaillances recensés au sein des AMDE réalisées

De l'AMDE vers la base de données	
Configuration d'implantation	Nombre de libellés causes et effets uniques identifiés
Aérien	63
Surface	66
Souterrain	61

ID	Num_compo	Causes	Effets
1	En_S_1	Perturbation dans l'alimentation électrique	Perturbation de la circulation ferroviaire
2	En_S_1	Interruption de l'alimentation électrique	Interruption de la circulation ferroviaire
3	En_S_1	Endommagement de la LAC	Perturbation dans l'alimentation électrique
4	En_S_1	Rupture de la LAC	Interruption de l'alimentation électrique
5	En_S_1	Court-circuit	Perturbation dans l'alimentation électrique
6	En_S_1	Court-circuit	Interruption de l'alimentation électrique
7	En_S_1	Inclinaison importante du pylône	Endommagement de la LAC
8	En_S_1	Inclinaison importante du pylône	Rupture de la LAC
9	En_S_1	Inclinaison importante du pylône	Court-circuit
10	En_S_1	Chute du pylône	Endommagement de la LAC
11	En_S_1	Chute du pylône	Rupture de la LAC
12	En_S_1	Chute du pylône	Court-circuit
13	En_S_2	Perturbation dans l'alimentation électrique	Perturbation de la circulation ferroviaire
14	En_S_2	Interruption de l'alimentation électrique	Interruption de la circulation ferroviaire
15	En_S_2	Endommagement du 3ème rail	Perturbation dans l'alimentation électrique

FIGURE 3.15 – Extrait de l'import de l'AMDE, réalisée pour la configuration d'implantation en surface, au sein d'une base de données (source : auteur)

vant : pour chaque composant pris un à un, l'algorithme compare un à un les libellés contenus dans sa colonne « effet » avec les libellés contenus dans la colonne « cause » d'un autre composant. Lorsqu'une relation peut être établie entre un libellé effet et un libellé cause, une relation d'interdépendance est constatée c'est-à-dire un potentiel effet domino. Puis, l'ensemble des effets qui se trouvent être également une cause sont stockés dans une nouvelle table dans laquelle une recherche de relation est à nouveau réalisée. L'algorithme s'arrête dès lors que, pour chacun des composants, il n'existe pas de nouvel effet (itération $n + 1$) à associer à une cause (itération n)

A chaque itération, c'est-à-dire à chaque détection d'une relation directe cause-effet entre deux composants, l'algorithme conserve les identifiants des composants défaillants et ce de proche en proche. Cette conservation de l'identifiant du composant est importante car elle permet un passage des fonctions aux composants. Ce ne sont alors plus les dysfonctions successives qui sont déterminées mais les défaillances successives. On obtient alors une **matrice des défaillances successives** pour chaque configuration d'implantation dans laquelle les lignes représentent les dysfonctions par effet domino des composants du système (Figure 3.16).

3.3.2.3 Traitement des résultats bruts générés

Les résultats obtenus grâce à l'algorithme qui vient automatiser des requêtes au sein de la base de données pour identifier les potentiels effets domino sont en très grand nombre.

Par exemple, dans la matrice associée à la configuration d'implantation en surface, l'algorithme a convergé, c'est-à-dire s'est arrêté car à une cause (itération n) il n'existe pas de nouvel effet (itération $n + 1$) à associer, après 11 itérations et 245 520 scénarios de défaillances successives (Tableau 3.6). Les itérations successives génèrent, en effet, de nouvelles lignes selon une courbe de croissance exponentielle (fonction puissance) (Figure 3.17) révélant bien l'aspect fortement combinatoire dans la propagation du risque sous la forme de défaillances par effet domino au sein d'une infrastructure critique.

Cependant, il est nécessaire de réaliser un traitement de ces centaines de milliers de lignes, c'est-à-dire de ces centaines de milliers de scénarios de défaillances, pour pouvoir les exploiter. En effet, ces

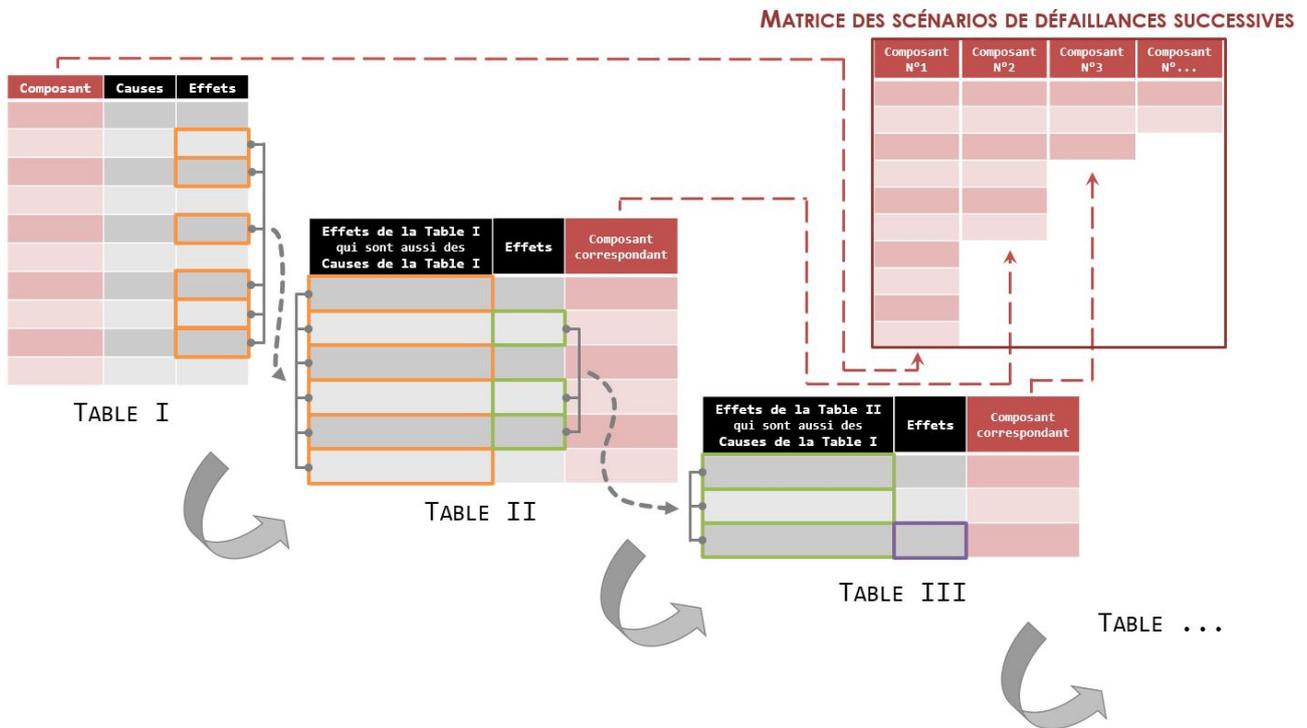


FIGURE 3.16 – Principe de fonctionnement de l’algorithme permettant l’identification des effets domino entre composants lorsque le système subit une inondation (GONZVA *et al.*, 2016b)

TABLEAU 3.6 – Nombre de scénarios de défaillances successives avant traitement des données

	Aérien	Surface	Souterrain
Itération 1	437	441	422
Itération 2	2 125	2 135	2 076
Itération 3	7 136	7 347	8 158
Itération 4	20 267	20 676	25 141
Itération 5	43 759	47 888	54 857
Itération 6	79 402	99 196	112 204
Itération 7	106 276	156 112	181 741
Itération 8	116 428	209 280	265 909
Itération 9	117 724	240 912	279 733
Itération 10	117 724	245 520	279 733
Itération 11	-	245 520	-
Itération 12	-	-	-

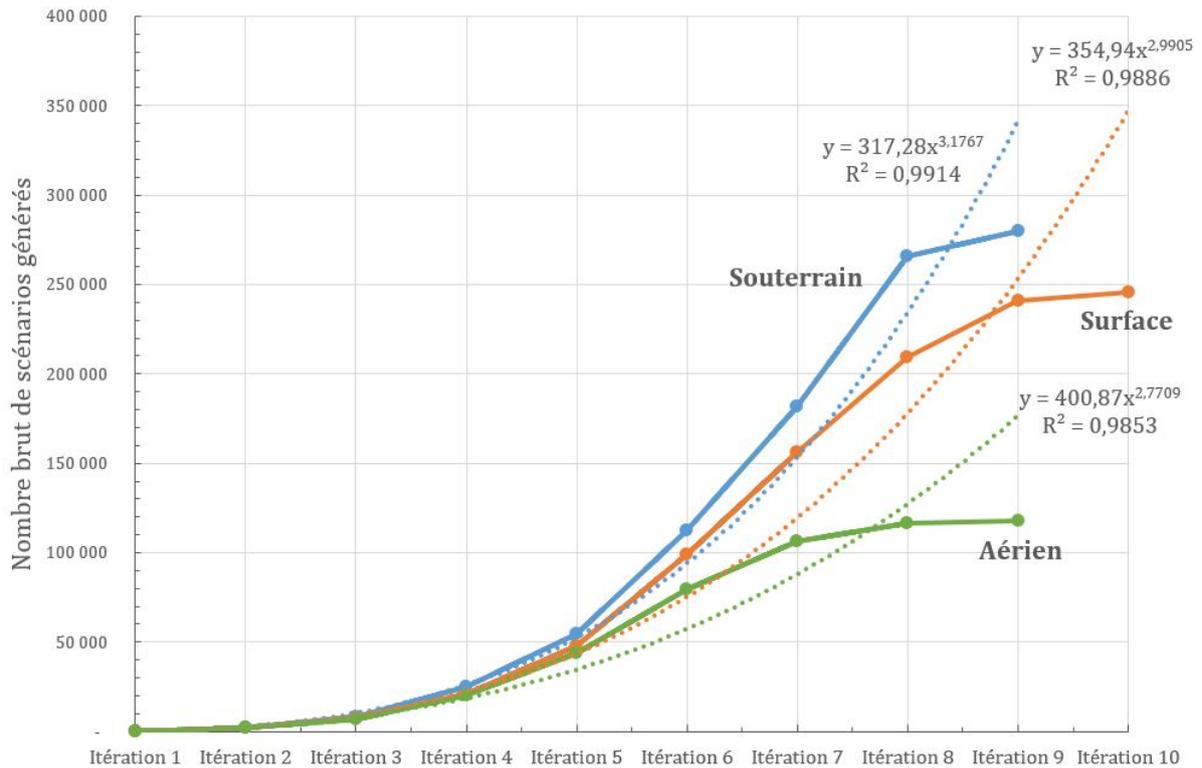


FIGURE 3.17 – Les courbes (trait plein) représentent les nombres de scénarios expérimentaux obtenus avec l’algorithme et les courbes associées (trait pointillé) représentent les courbes d’ajustement théoriques. Les courbes théoriques dont l’ajustement est le meilleur suivent une croissance exponentielle (fonction puissance) (source : auteur)

scénarios de défaillances sont « brutes », c’est-à-dire directement issus de l’algorithme et nécessitent d’être préalablement analysés avant d’en tirer des conclusions. Les traitements de données ainsi appliqués ont les objectifs suivants (Tableau 3.7) :

1. **Supprimer les lignes en doublons** : c’est-à-dire les scénarios contenant exactement le même enchaînement de composants. Cette situation est possible dans la mesure où chaque composant assure plusieurs fonctions donc plusieurs scénarios de dysfonctions successives peuvent être associés à un même scénario de défaillances successives de composants ;
2. **Supprimer les lignes où un composant apparaît plus d’une fois** : car elles n’ont pas de sens réel, un composant n’étant considéré défaillant qu’une seule fois ;
3. **Supprimer les lignes dont le contenu est inclus dans d’autres lignes** : l’objectif étant de déterminer l’étendue de la propagation du risque par défaillance par effet domino, les « sous-scénarios » inclus dans d’autres scénarios impliquant un plus grand nombre de composants sont donc exclus.

TABLEAU 3.7 – Nombre de scénarios de défaillances successives après traitement des données

Aérien	Surface	Souterrain
7 417	1 561	1 407

Finalement, les données ainsi traitées permettent d’obtenir trois matrices, correspondant aux configurations d’implantation souterrain, surface et aérien, dont les lignes contiennent l’objectif souhaité : les scénarios uniques et ayant un sens physique et interprétable des potentielles défaillances successives par effet domino survenant au sein d’un système de transport guidé soumis à un risque inon-

dation.

3.3.3 Représentation des résultats traités

Ces scénarios de défaillances successives qui mettent en avant les interdépendances fonctionnelles qui existent au sein d'un système de transport, et conduisent à sa défaillance globale lors d'une inondation, sont représentés sous la forme de **graphes d'évènements causaux**.

Ce formalisme permet de visualiser ces scénarios à l'aide d'une représentation graphique d'une séquence de défaillances constituée d'un évènement initiateur et d'une combinaison de défaillances successives jusqu'à une défaillance finale. La visualisation est donc orientée sur la mise en avant des composants défaillants et non plus sur les fonctions non assurées.

Le modèle informatique produit automatiquement les interdépendances au sein de la BdD sous une forme explicite et pratique en vue d'une exploitation ultérieure des résultats (Figure 3.18). Chaque ligne, ou *enregistrement* pour utiliser le vocabulaire lié aux bases de données, forme un scénario de défaillances dont les composants sont séparés par une double barre. En revanche, il est aussi possible de présenter visuellement ces scénarios de façon plus classique et plus claire en vue d'un partage et d'une diffusion des résultats à des acteurs différents (Figure 3.19). Par exemple, dans le cas d'une configuration d'implantation en souterrain, la Figure 3.18 et la Figure 3.19 représentent de deux façon différentes le scénario de défaillances successives dues à des effets domino suivant : un arrêt des pompes d'épuisement situées au niveau des points bas souterrains peut entraîner une accumulation des eaux de l'inondation, ce qui peut ensuite provoquer une inondation des espaces d'accès des gares souterraines, puis entraîner une inondation des quais des gares souterraines jusqu'à une inondation de la voie ferrée et de l'ensemble des composants (signalisation, rails, troisième rail s'il existe, etc.).

AuFinal				
I_SS_7	G_SS_1	I_SS_5	CCS_SS_2	CCS_SS_3
I_SS_7	G_SS_1	I_SS_5	CCS_SS_2	CCS_SS_4
I_SS_7	G_SS_1	I_SS_5	CCS_SS_2	PCC_SS_2
I_SS_7	G_SS_1	I_SS_5	CCS_SS_3	CCS_SS_4
I_SS_7	G_SS_1	I_SS_5	CCS_SS_3	PCC_SS_2
I_SS_7	G_SS_1	I_SS_5	CCS_SS_4	CCS_SS_3
I_SS_7	G_SS_1	I_SS_5	CCS_SS_4	PCC_SS_2
I_SS_7	G_SS_2	G_SS_3	CCS_SS_1	CCS_SS_3
I_SS_7	G_SS_2	G_SS_3	CCS_SS_1	CCS_SS_4
I_SS_7	G_SS_2	G_SS_3	CCS_SS_1	PCC_SS_2
I_SS_7	G_SS_2	G_SS_3	CCS_SS_2	CCS_SS_3
I_SS_7	G_SS_2	G_SS_3	CCS_SS_2	CCS_SS_4
I_SS_7	G_SS_2	G_SS_3	CCS_SS_2	PCC_SS_2
I_SS_7	G_SS_2	G_SS_3	PCC_SS_1	CCS_SS_3
I_SS_7	G_SS_2	G_SS_3	PCC_SS_1	CCS_SS_4

FIGURE 3.18 – Extrait des scénarios de défaillances successives (représentées par un fléchage rouge) pour la configuration d'implantation en souterrain, produits par le modèle automatisé d'interdépendances (source : auteur)

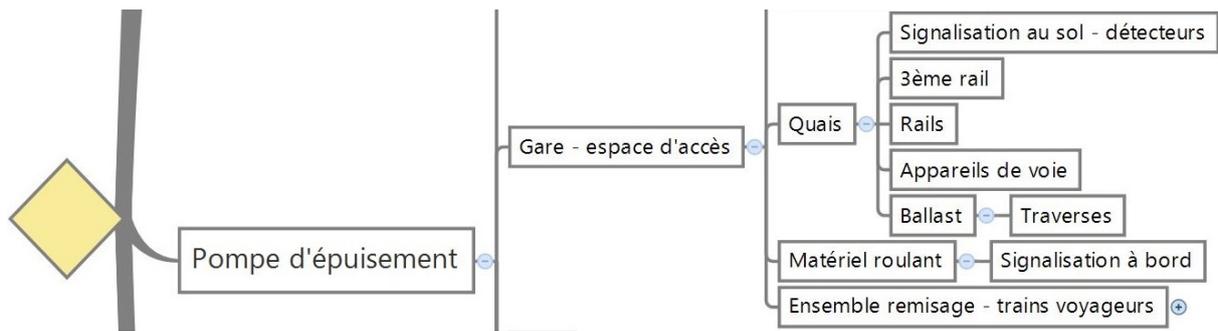


FIGURE 3.19 – Extrait d'un scénario de défaillances successives de composants représenté sous forme de graphe d'évènement causal (source : auteur)

3.3.4 Interprétation des résultats

Quelques conclusions succinctes peuvent être faites à cette étape de la démarche d'analyse de la vulnérabilité des systèmes de transport guidé.

La configuration d'implantation en souterrain se révèle être bien plus génératrice de scénarios de défaillances en chaîne que les deux autres configurations (Tableau 3.7). **L'implantation en souterrain semble donc amplifier intrinsèquement les interdépendances fonctionnelles qui existent entre les composants**, provoquant ainsi en situation d'aléa inondation des défaillances potentielles par effet domino en plus grand nombre.

Cependant, la configuration d'implantation en souterrain ne doit pas nécessairement être exclue dans un contexte territorial et météorologique particulièrement enclin aux inondations. Les résultats sont, en effet, semi-qualitatifs dans la mesure où ils mettent en évidence et ordonnent les composants selon la vulnérabilité globale du système qu'ils engendrent lorsqu'ils sont défaillants.

Ainsi, du point de vue de la portée opérationnelle qu'offrent ces résultats, ils indiquent surtout pour chaque configuration d'implantation les composants à protéger prioritairement pour réduire la vulnérabilité du système. **Les résultats obtenus pour le souterrain indiquent plutôt que la fiabilisation des composants face au risque inondation y est plus complexe** que dans la configuration d'implantation en aérien ou en surface.

Enfin, les résultats obtenus sont **spécifiques à un aléa naturel**, l'aléa **inondation**. Les scénarios de défaillances successives établissant les mécanismes de propagation du risque par effet domino ne permettent de tirer de conclusions uniquement sur la vulnérabilité des systèmes de transport guidé face à l'aléa inondation. Des connaissances en matière de vulnérabilité face à d'autres aléas naturels nécessitent de réappliquer l'ensemble de la méthodologie depuis l'Analyse Fonctionnelle, puis l'AMDE, pour enfin interroger l'AMDE par le biais de l'algorithme d'identification et production des scénarios de défaillances en chaîne (Figure 3.20).

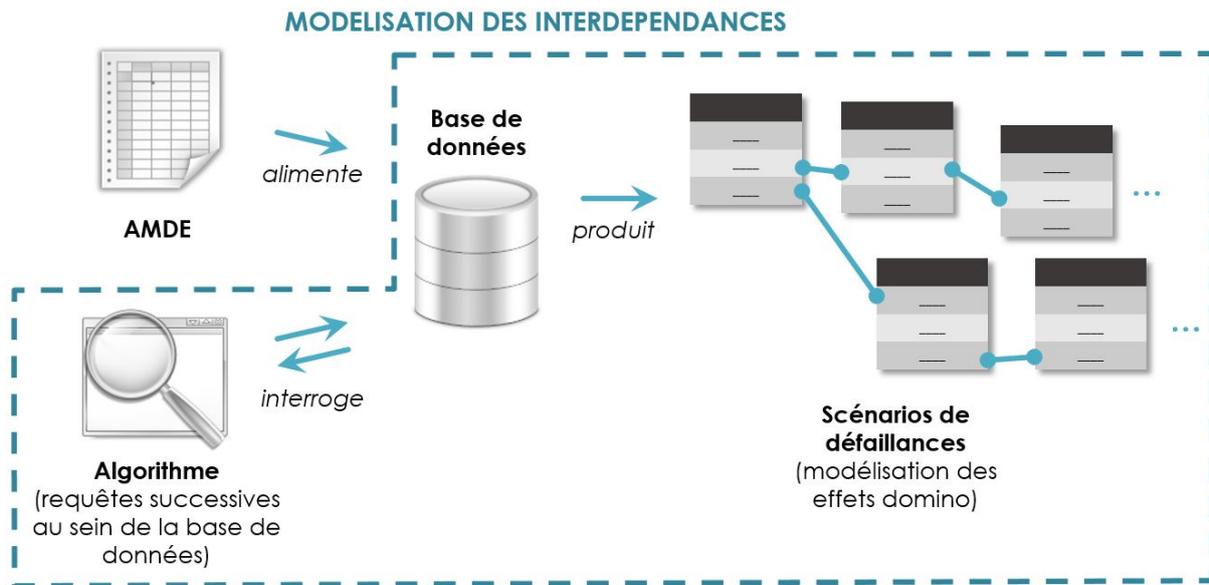


FIGURE 3.20 – Principes de détermination automatisée des interdépendances vecteurs de défaillances par effet domino (source : auteur)

Synthèse

Afin d'avoir une vision à l'échelle du système tout entier des possibilités d'émergence de scénarios de défaillances successives par effet domino, un modèle informatique est proposé afin d'identifier et produire automatiquement toutes les interdépendances fonctionnelles qui existent entre les composants. L'AMDE réalisée pour chaque type de système de transport sert de données d'entrée à ce modèle. Dans ce cadre, les besoins liés à ce modèle sont : l'exhaustivité c'est-à-dire que tous les scénarios possibles de défaillances par effet domino doivent être identifiés, l'automatisation car l'aspect combinatoire relatif aux effets domino présage un très grand nombre de scénarios de défaillances, la rapidité de sorte que la production des scénarios ne requière pas un temps d'exécution excessif de la part du modèle informatique, et la cohérence afin qu'il permette une approche comparative entre des systèmes en souterrain, en surface et en aérien soumis au risque inondation.

Ainsi, le modèle d'interdépendances informatique révèle que la configuration d'implantation en souterrain génère environ cinq fois plus de scénarios de défaillances par effet domino que les deux autres configurations en situation d'aléa inondation.

3.4 Conclusion du chapitre 3

Ainsi, la conclusion essentielle à laquelle parvient ce chapitre est la suivante : **lorsqu'un système de transport guidé est implanté en souterrain, les interdépendances fonctionnelles qui existent entre ses éléments vont avoir tendance à hautement potentialiser l'émergence de défaillances par effet domino, en situation d'inondation.** Partant du principe que la vulnérabilité d'un système de transport est directement liée à l'importance des effets domino susceptibles de se produire, cette analyse démontre que l'implantation souterraine est plus vulnérable que l'implantation de surface

ou aérienne face aux inondations. Ce résultat empiriquement constaté sur de nombreux systèmes ferroviaires trouve donc ici une démonstration rationnelle basée sur les effets domino.

Cette étape de caractérisation de la vulnérabilité permet, de plus, de valider le postulat réalisé en début de chapitre : l'utilisation d'une combinaison de méthodes provenant de la Sûreté de Fonctionnement donne la possibilité de **caractériser** et **comparer la vulnérabilité de systèmes de transport guidé face à un risque inondation selon leur configuration d'implantation**. Il est important de noter que c'est, plus précisément, l'automatisation de ces méthodes qui a permis la validation de ce postulat en allant plus loin dans les résultats produits traditionnellement par les méthodes de Sûreté de Fonctionnement. Le caractère dynamique donné aux analyses de risque menées dans ce chapitre produit des conclusions plus approfondies que les seuls résultats des analyses menées séparément.

Un point essentiel à mettre en avant est celui de la confiance qu'il est raisonnable d'accorder aux résultats issus du travail d'AMDE réalisé, qui elle-même sert de données de base à l'identification et à la production exhaustives des interdépendances. Ces AMDE sont, en effet, réalisées grâce à des référentiels techniques ferroviaires, des retours d'expérience sur des incidents passés survenus sur des systèmes ferroviaires lors de l'occurrence d'inondations et essentiellement grâce à la connaissance experte. Il est donc raisonnable d'associer une confiance élevée à ces résultats dans la mesure où ils sont issus de sources de données diverses et confrontées. Ce que met, néanmoins, en avant cette observation est que les interdépendances identifiées sont conditionnées par un travail minutieux et approfondi d'élaboration de l'AMDE à partir d'une documentation et d'une expertise de qualité. De la qualité de l'analyse de risque dépend donc la qualité de la caractérisation de la vulnérabilité du système qui en découle.

En définitive, la production de ces milliers de scénarios de défaillances successives engendrés par des effets domino ne se suffit pas à elle-même. Tout du moins, ces scénarios nécessitent d'être analysés de façon plus précise afin de les caractériser plus en détail : combien de composants impliqués, dans quel ordre, etc. De la même façon, le rôle joué par chacun des composants identifiés lors de l'analyse structurelle dans ces processus de défaillance est important afin d'identifier, par exemple, le rôle critique de certains éléments vis-à-vis de l'émergence d'effets domino ou vis-à-vis de leur fragilité spécifique à ces processus de défaillance en chaîne.

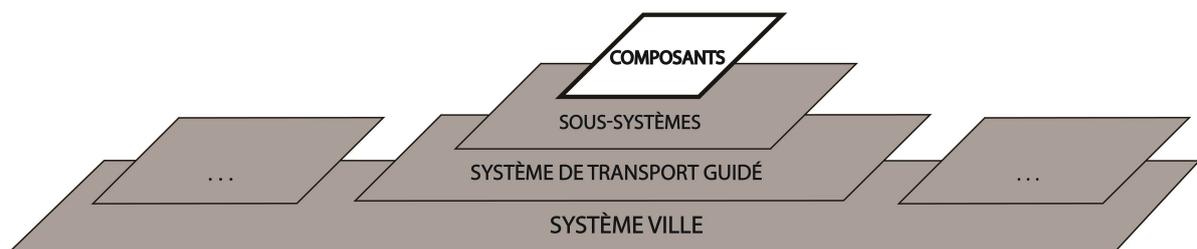


Chapitre 4

Analyse et exploitation des résultats du modèle d'interdépendances

*« La résilience, c'est savoir ne pas se perdre, même quand le pire se produit, c'est la part d'humanité qui est en nous tous. Paris n'est pas la seule métropole à avoir montré cette force : La Nouvelle-Orléans après les inondations provoquées par le cyclone Katrina, New-York après le 11 septembre 2001 ou après l'ouragan Sandy. Les métropoles ont cette capacité extraordinaire à se relever par la force du collectif. C'est cela qui fait tenir ensemble la cité, et même qui fait « cité ».
[...] Dans la résilience, il y a une forme d'optimisme qui pousse à se relever ensemble pour regarder en avant. »*

Anne Hidalgo, Maire de Paris, "La ville inclusive, c'est la réponse aux défis du XXI^{ème} siècle", *La Tribune*, 19 novembre 2016.



L'enjeu de la recherche entreprise est d'élaborer une démarche méthodologique capable de fournir une approche globale de l'analyse des risques c'est-à-dire de l'occurrence de l'aléa avec ses caractéristiques d'intensité données, puis des impacts matériels directs sur les systèmes, puis les dommages matériels indirects c'est-à-dire ceux occasionnés par la propagation du risque par l'intermédiaire d'effet domino pour enfin en déduire les conséquences fonctionnelles c'est-à-dire les modes de fonctionnement dégradé du système relatifs à son exploitation. Cette approche globale s'inscrit elle-même dans une logique d'amélioration de la résilience des systèmes de transport guidé lorsqu'ils sont soumis à un risque inondation. Or, pour obtenir cette caractérisation totale du risque (aléa, dommages directs et indirects, impact sur l'exploitation) dans une optique d'accroissement de la résilience de ces systèmes, une analyse préalable de leur vulnérabilité est nécessaire.

Le [chapitre 3](#) a permis de mettre en évidence que, pour être utile et aboutie, l'étude de la vulnérabilité des systèmes de transport guidé soumis à un risque inondation doit se concentrer sur la propagation du risque au sein du système. Au sein de ce type d'infrastructures, les défaillances générées par des mécanismes en chaîne sont, en effet, la cause de dommages globaux parfois plus importants que les défaillances causées par impact direct de l'aléa. Les effets domino, c'est-à-dire les défaillances en chaîne au sein du système, représentent donc un facteur sous-jacent majeur de la vulnérabilité des infrastructures critiques. Leur étude est donc nécessaire.

Pour identifier toutes ces défaillances successives par effet domino, plusieurs postulats scientifiques en lien avec l'apport d'une étude de la vulnérabilité au vu de l'enjeu global de la recherche sont posés et validés. Tout d'abord, le postulat selon lequel une combinaison de méthodes issues de la Sécurité de Fonctionnement permet l'identification et la modélisation des interdépendances, vecteurs d'effets domino, au sein de réseaux techniques tels que les systèmes de transport guidé. Le deuxième postulat, corollaire au précédent et validé, a permis d'établir que l'utilisation d'une combinaison de méthodes de Sécurité de Fonctionnement rend possible la comparaison de la vulnérabilité de systèmes de transport guidé face à un risque inondation selon leur configuration d'implantation sur le territoire et ce, à partir des interdépendances identifiées de façon automatisée. La prédominance des interdépendances, et donc des défaillances par effet domino qu'elles peuvent induire, dans le niveau de vulnérabilité d'un système est telle que les résultats de leur analyse peuvent ainsi être un facteur important de choix en conception.

Toutefois, l'identification et la production de ces scénarios de défaillances successives dues à des effets domino ne suffit pas. Ces milliers de scénarios nécessitent désormais d'être analysés, d'une part, pour approfondir la connaissance qu'il est possible d'en déduire en matière de vulnérabilité du système, et d'autre part, pour déterminer la portée pratique, opérationnelle, concrète d'une telle étude avec l'objectif ultime qu'elle soit un préalable nécessaire mais non suffisant à une démarche d'amélioration de la résilience.

4.1 Approfondissement et visualisation des résultats obtenus

4.1.1 Statistiques préliminaires sur les scénarios de défaillances obtenus

Grâce au modèle d'interdépendances élaboré au chapitre précédent permettant d'identifier et de produire l'ensemble des scénarios de défaillances successives causées par des mécanismes de propagation par effet domino, plusieurs milliers de scénarios existent pour la configuration d'implantation en aérien, en surface et en souterrain. Ces nombreux scénarios composés eux-mêmes de nombreux composants nécessitent alors d'être analysés afin de caractériser plus finement la vulnérabilité des systèmes de transport guidé face au risque inondation selon tout type d'implantation.

De façon préalable, un premier travail d'analyse statistique est mené sur **la population représentée par les scénarios de défaillances** afin de déterminer des **valeurs descriptives** de cet ensemble. Dans une optique qui se veut toujours comparative, les analyses statistiques dont bénéficient chacune des trois configurations d'implantation ont pour objectif le suivant : déterminer la **longueur moyenne** des scénarios, c'est-à-dire **le nombre de composants qu'ils contiennent**.

Concernant la longueur des scénarios de défaillances, le [Tableau 4.1](#) synthétise pour chaque configuration d'implantation les valeurs associées et la [Figure 4.1](#) les représente sous forme d'histogrammes.

TABLEAU 4.1 – Statistiques descriptives concernant la longueur des scénarios de défaillances successives

		Configuration d'implantation														
		Aérien					Surface					Souterrain				
		Eff.	ECC	FCC (%)	ECD	FCD (%)	Eff.	ECC	FCC (%)	ECD	FCD (%)	Eff.	ECC	FCC (%)	ECD	FCD (%)
Nombre de composants dans les scénarios de défaillances	2	16	16	1	1 407	100	19	19	1	1 561	100	18	18	0	7 417	100
	3	210	226	16	1 391	99	125	144	9	1 542	99	239	257	3	7 399	100
	4	314	540	38	1 181	84	218	362	23	1 417	91	484	741	10	7 160	97
	5	390	930	66	867	62	367	729	47	1 199	77	1 176	1 917	26	6 676	90
	6	362	1 292	92	477	34	427	1 156	74	832	53	1 995	3 912	53	5 500	74
	7	115	1 407	100	115	8	290	1 446	93	405	26	2 125	6 037	81	3 505	47
	8	-	-	-	-	-	115	1 561	100	115	7	1 380	7 417	100	1 380	19
			1 407 scénarios					1 561 scénarios					7 417 scénarios			

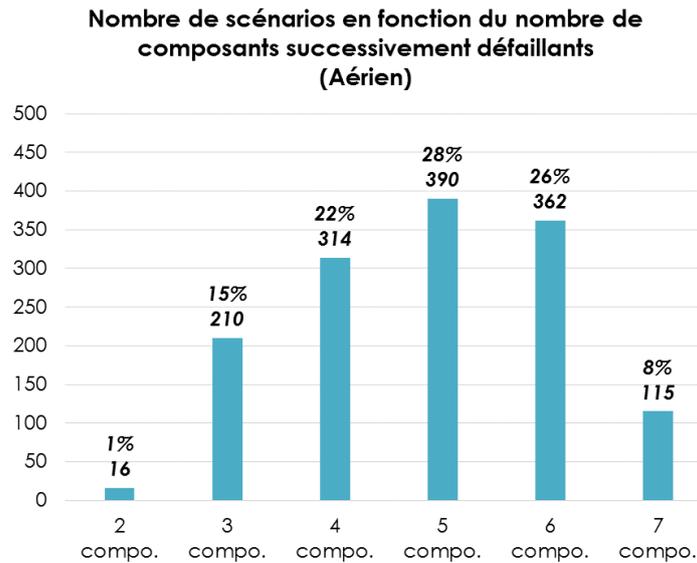
Eff. : Effectif

ECC : Effectif Cumulé Croissant

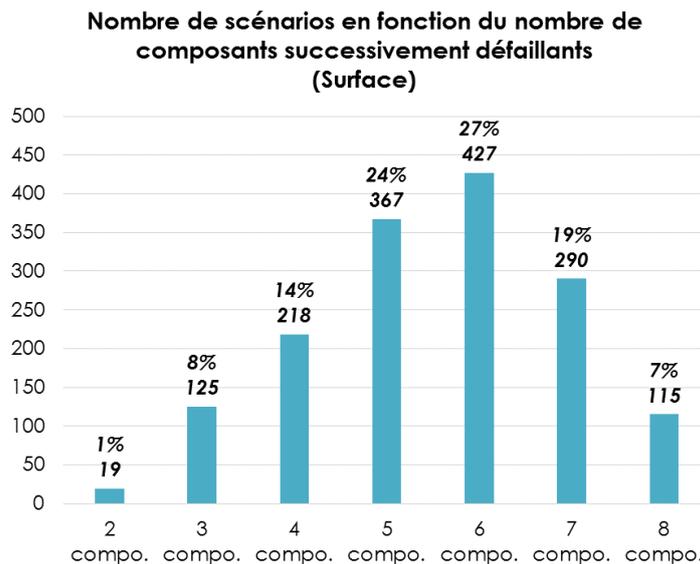
ECD : Effectif Cumulé Décroissant

FCC (%) : Fréquence Cumulée Croissante exprimée en pourcentage

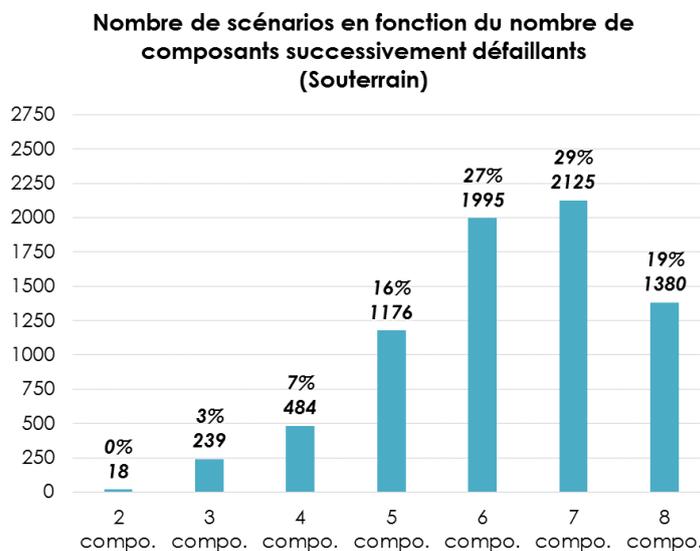
FCC (%) : Fréquence Cumulée Décroissante exprimée en pourcentage



(a) Cas de la configuration en aérien



(b) Cas de la configuration de surface



(c) Cas de la configuration en souterrain

FIGURE 4.1 – Histogrammes descriptifs des longueurs de scénarios de défaillances relatifs à chacune des trois configurations d'implantation (source : auteur)

4.1.2 Interprétation des statistiques préliminaires sur les scénarios de défaillances obtenus

Premièrement, si les configurations en aérien et en surface sont assez similaires en ce qui concerne le nombre potentiel de scénarios de défaillances de composants engendrées par effet domino, **la configuration en souterrain est génératrice d'environ cinq fois plus de scénarios**. En souterrain, il apparaît donc que les interdépendances qui existent entre les composants en situation normale ont un potentiel plus important à favoriser l'émergence d'effets domino comparativement aux deux autres configurations.

Deuxièmement, 90 % des scénarios obtenus pour la configuration souterraine contiennent entre 5 et 8 composants tandis qu'environ 90 % des scénarios obtenus pour chacune des deux autres configurations contiennent entre 4 et 8 composants (Tableau 4.1). Les histogrammes confirment ce résultat en indiquant que le « pic » du plus grand nombre de composants dans un scénario est obtenu pour les scénarios à 7 composants pour le souterrain, à 6 composants pour la surface et à 5 composants pour l'aérien (Figure 4.1). Le scénario de défaillances successives moyen est donc plus long dans la configuration souterraine que dans la configuration aérienne ou de surface.

Par conséquent, **positionner un système de transport guidé en souterrain sur un territoire soumis aux risques d'inondation semble intensifier le processus de défaillance en chaîne** qui va alors potentiellement plus loin, c'est-à-dire qu'il implique pour chaque scénario un plus grand nombre moyen de composants défaillants.

Ces conclusions issues d'une démarche méthodologique théorique d'analyse des scénarios de défaillances par effet domino lors de l'occurrence d'un aléa hydrologique peuvent d'ores et déjà être rapprochées de faits communément admis. Il est, en effet, largement connu à partir d'expériences d'inondations passées affectant des systèmes de transport que les systèmes souterrains affichent une plus grande vulnérabilité par rapport à des systèmes de surface : « *on considère désormais que les principales contributions du sous-sol [sont] [...] l'amélioration de la sécurité contre les risques de toute nature, sauf toutefois l'inondation* » (DUFFAUT, 2010). Dans la même optique, il est admis que « *la vulnérabilité du sous-sol en face des catastrophes, naturelles ou non, est très variée : la menace des inondations est bien connue [...]; au contraire les effets des secousses sismiques et des retombées volcaniques sont atténués* » (DUFFAUT et LABBÉ, 1995).

Confronter plus précisément des retours d'expériences avec les résultats issus de cette méthodologie d'identification des interdépendances, sources d'effets domino, permet de confirmer ou au contraire d'infirmer la prépondérance de la configuration d'implantation comme facteur d'accroissement ou de réduction de la vulnérabilité.

Synthèse

Une première analyse statistique est réalisée sur les milliers de scénarios de défaillances successives obtenus grâce au modèle informatisé de production des interdépendances. Cette analyse statistique consiste à déterminer la longueur moyenne des scénarios c'est-à-dire le nombre de composants qu'ils contiennent en moyenne, et ce pour chacune des trois configurations d'implantation d'un système de transport guidé. Le constat est que les systèmes souterrains impliquent en moyenne des scénarios plus longs, c'est-à-dire impliquant plus de composants qui vont être défaillants successivement, que les systèmes aériens et de surface.

4.2 Profil comportemental des éléments du système en situation de crise

Les analyses statistiques préliminaires réalisées dans le paragraphe précédent confirment par un aperçu général le rôle dominant que jouent les mécanismes d'effet domino dans les défaillances observables d'un système de transport guidé soumis au risque inondation et, en conséquence directe, le rôle qu'ils possèdent dans la vulnérabilité du système. L'analyse de ces interdépendances entre composants peut apparaître même comme un critère pour de l'**aide à la réflexion** en matière de choix entre une configuration d'implantation aérienne, de surface et souterraine dans le cas de conditions météorologiques et/ou territoriales propices à l'occurrence d'inondations.

4.2.1 Statistiques approfondies sur les scénarios de défaillances obtenus

Après la première analyse statistique qui consiste à déterminer la longueur moyenne des scénarios c'est-à-dire le nombre de composants qu'ils contiennent, une **seconde analyse** consiste à déterminer cette fois l'**ordre d'apparition moyen** de chacun des 24 (ou 25) composants au sein de ces scénarios de défaillances. L'objectif est, en effet, d'en apprendre plus sur les caractéristiques structurelles des scénarios de défaillances et surtout de relever le rôle que chaque composant y joue. Autrement dit, l'interrogation qui sous-tend cette deuxième phase d'analyse statistique est la suivante : pour un composant donné, apparaît-il en moyenne majoritairement au début des scénarios ? Au milieu des scénarios ? Ou, en fin de scénarios ? Cette analyse, comme à l'accoutumée, est réalisée pour chacune des configurations d'implantation pour approfondir la logique comparative entreprise en matière de caractérisation de la vulnérabilité.

Pour déterminer le positionnement d'un composant donné c'est-à-dire sa tendance à être plus ou moins présent dans les scénarios de défaillances successives dues à des effets domino, sont représentés sous forme d'histogrammes le nombre de scénarios de défaillances dans lesquels chaque composant apparaît selon plusieurs positionnements : en premier, en intermédiaire et en dernier ([Figure 4.2](#)).

Pour compléter ces valeurs absolues, des **proportions** ou **scores d'apparition** propres à chaque composant sont calculés de la façon suivante :

Proportion de scénarios dans lesquels le composant X est à l'**origine**

$$= \frac{\text{Nombre de fois où le composant X est en position 1}}{\text{Nombre de scénarios contenant le composant X}} \quad (4.1)$$

Proportion de scénarios dans lesquels le composant X est **intermédiaire**

$$= \frac{\text{Nombre de fois où le composant X est en position 2 et 3 et ... n-1}}{\text{Nombre de scénarios contenant le composant X}} \quad (4.2)$$

Proportion de scénarios dans lesquels le composant X est à l'**origine**

$$= \frac{\text{Nombre de fois où le composant X est en position n}}{\text{Nombre de scénarios contenant le composant X}} \quad (4.3)$$

où n représente le nombre de composants des scénarios considérés un à un.

Le [Tableau 4.2](#), spécifique à la configuration souterraine, recense ces scores d'apparition pour chaque composant. Ces résultats sont présentés sous forme de pourcentage pour mettre en avant la proportion d'apparition en tête, au milieu ou en bout de scénarios de chaque composant parmi tous les scénarios dans lesquels il apparaît. De cette façon, la somme de ces scores est toujours égale à 1 quel que soit le composant X étudié. Par exemple, le [Tableau 4.2](#) indique que le composant « rail » est à l'origine de 3,95 % des scénarios de défaillances de la configuration en souterrain. Ce score d'apparition est calculé à partir de l'équation précédente : il existe 304 scénarios de défaillances dans lesquels ce composant apparaît et parmi ces 304 scénarios il apparaît en première position dans 12 scénarios, d'où un score de $\frac{12}{304} = 3,95\%$. Sur le même principe, le score d'apparition en position intermédiaire du composant « pompe d'épuisement » est calculé ainsi : $\frac{5 + 72 + 0 + 0 + 0 + 0 + 0}{1\,096} = 7,03\%$. Ce composant apparaît, en effet, dans 1 096 scénarios de défaillances au sein desquels il est en deuxième position dans 5 cas, en troisième position dans 72 cas et dans les autres positions dans aucun cas.

Les histogrammes et tableaux de synthèse sont réalisés pour les deux autres configurations et sont présentés en [Annexe](#).

Le tableau de synthèse ainsi que les histogrammes mettent en relief les résultats statistiques suivants :

- les composants « espaces d'accès » (G_SS_1) des gares et les « pompes d'épuisement » (I_SS_7) apparaissent en moyenne majoritairement à l'origine des scénarios de défaillances. Qui plus est, dans le cas du composant « pompe d'épuisement », il assure quasiment exclusivement ce rôle d'initiateur de scénarios (dans 92,97 % des cas) parmi tous les scénarios dans lesquels il est présent ;
- les composants « câbles » du PCC (PCC_SS_2), « câbles en gare » (G_SS_3) « câbles de signalisation » (CCS_SS_4) apparaissent en moyenne majoritairement à la conclusion des scénarios de défaillances. A ces composants de câblages issus de plusieurs sous-systèmes différents s'ajoutent d'autres composants dont la position moyenne en fin de scénarios est là aussi importante : les mécanismes permettant le mouvement des appareils de voie (CCS_SS_3) et les espaces d'accès en gare (G_SS_1) ;
- nombreux sont les composants ayant un rôle intermédiaire significatif ; néanmoins, certains composant ont un rôle uniquement intermédiaire au sein des scénarios : le matériel roulant (MR_SS) et les composants liés à la signalisation à bord (CCS_SS_1), le troisième rail (En_SS_2), les appareils de voie (I_SS_3), le ballast (I_SS_4) dans le cas de voie ballastée, les quais (I_SS_5)

et enfin le tunnel (I_SS_6). Pour ce dernier, il est important de mentionner qu'en valeur absolue, le tunnel joue un rôle intermédiaire dans plus de 8 scénarios sur 10 (6 098 scénarios sur un total de 7 417 scénarios pour la configuration en souterrain).

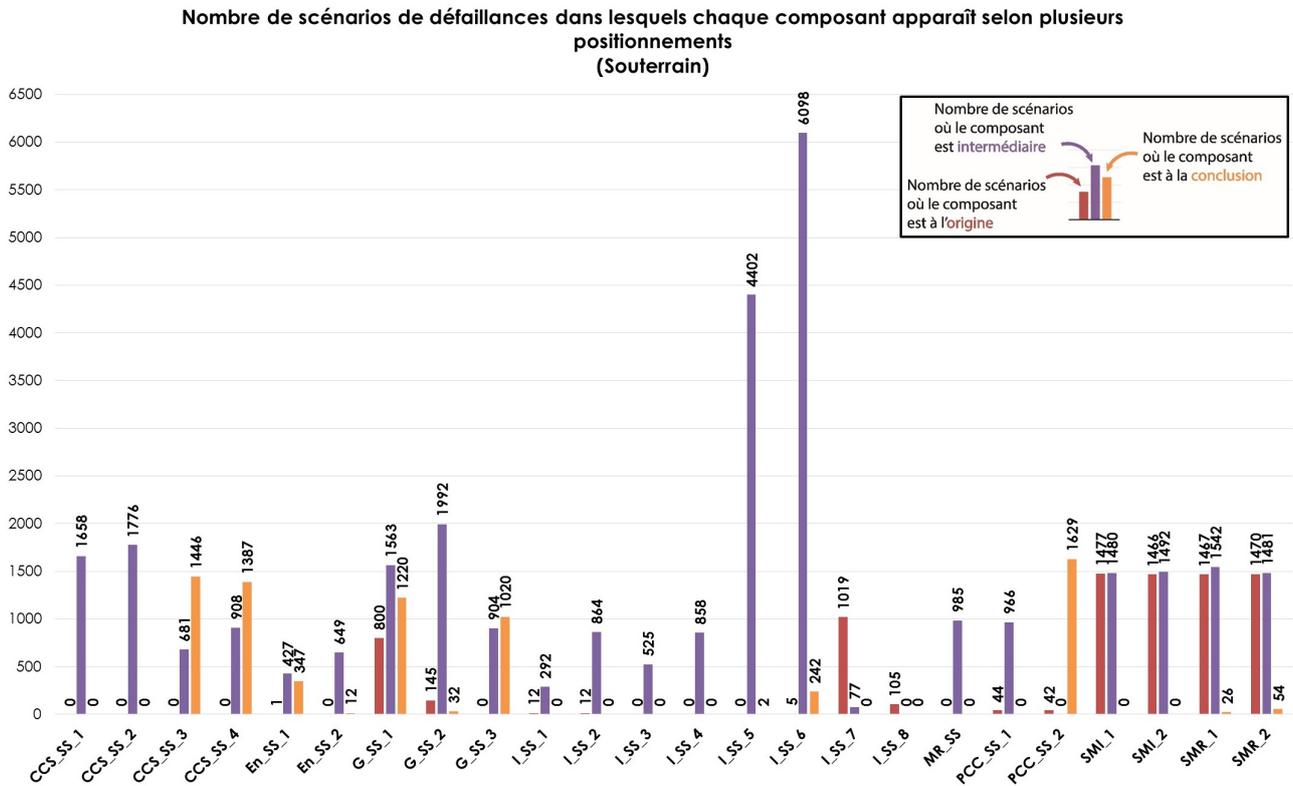


FIGURE 4.2 – Histogrammes présentant le positionnement des composants au sein des scénarios de défaillances relatifs à la configuration d’implantation en souterrain (source : auteur)

4.2.1.1 Statistiques affinées sur les composants en position intermédiaire au sein des scénarios de défaillances

L'enjeu de caractérisation fine de la vulnérabilité des systèmes de transport guidé face au risque inondation requiert un approfondissement supplémentaire à propos de la position « intermédiaire » que peuvent avoir certains composants au sein des scénarios de défaillances. En effet, dans le triptyque « à l'origine/intermédiaire/à la conclusion », un grand nombre de composants se situent dans la deuxième catégorie « intermédiaire » ne donnant donc pas beaucoup de sens à celle-ci. Or, dans une logique de compréhension des mécanismes d'effets domino, **les composants situés au centre des scénarios de défaillances sont des éléments-clés à examiner dans la mesure où ce sont eux qui propagent les défaillances** en les diffusant au sein de l'ensemble du système. Les composants positionnées majoritairement en position intermédiaire présentent donc obligatoirement un rôle de **propagation** ou de **diffusion** du risque par effet domino qu'il est indispensable d'interpréter.

Dans cette situation, une **troisième analyse statistique** est réalisée, dédiée à cette catégorie « intermédiaire » dans lesquels les composants peuvent se situer au sein d'un scénario de défaillances. Pour cela, la catégorie « intermédiaire », qui regroupe le positionnement des composants hormis les cas où ils sont en premier ou en dernier, est **divisée en sous-catégories** : une catégorie par position au sein du scénario étudié. De cette façon, dans le cas de la configuration souterraine pour laquelle les

TABLEAU 4.2 – Statistiques approfondies concernant le positionnement moyen des composants au sein des scénarios de défaillances successives de la configuration d'implantation en souterrain

Identifiant du composant	Désignation complète du composant	Proportion de scénarios dans lesquels le composant...		
		... est à l'origine	... joue un rôle « intermédiaire »	... est à la conclusion
CCS_SS_1	Composants « à bord » au sein du matériel roulant	0,00 %	100,00 %	0,00 %
CCS_SS_2	Composants au « sol » : détecteurs, balises	0,00 %	100,00 %	0,00 %
CCS_SS_3	Composants « au sol » : mécanismes d'appareils de voie	0,00 %	85,90 %	14,10 %
CCS_SS_4	Composants « au sol » : câbles de signalisation	0,00 %	87,97 %	12,03 %
En_SS_1	Ligne aérienne de contact	0,13 %	99,87 %	0,00 %
En_SS_2	Troisième rail	0,00 %	100,00 %	0,00 %
G_SS_1	Espaces d'accès	5,18 %	88,69 %	6,13 %
G_SS_2	Electromécanismes	6,69 %	93,31 %	0,00 %
G_SS_3	Câbles en gare	0,00 %	85,65 %	14,35 %
I_SS_1	Rails	3,95 %	96,05 %	0,00 %
I_SS_2	Traverses et supports de voie	1,37 %	98,63 %	0,00 %
I_SS_3	Appareils de voie	0,00 %	100,00 %	0,00 %
I_SS_4	Ballast (cas de voie ballastée)	0,00 %	100,00 %	0,00 %
I_SS_5	Quais	0,00 %	100,00 %	0,00 %
I_SS_6	Ouvrage d'art (infrastructure : tunnel)	0,08 %	99,92 %	0,00 %
I_SS_7	Pompe d'épuisement	92,97 %	7,03 %	0,00 %
I_SS_8	Radier ferroviaire (cas de voie bétonnée)	100,00 %	0,00 %	0,00 %
MR_SS	Matériel Roulant	0,00 %	100,00 %	0,00 %
PCC_SS_1	Salle d'exploitation	4,36 %	95,64 %	0,00 %
PCC_SS_2	Câbles (remontées / transmission d'informations)	2,51 %	76,66 %	20,83 %
SMI_1	Ensemble « remisage » des trains de travaux	49,95 %	50,05 %	0,00 %
SMI_2	Ensemble « maintenance » des trains de travaux	49,56 %	50,44 %	0,00 %
SMR_1	Ensemble « remisage » du matériel roulant voyageurs	48,34 %	51,66 %	0,00 %
SMR_2	Ensemble « maintenance » du matériel roulant voyageurs	48,92 %	51,08 %	0,00 %

scénarios contiennent au maximum 8 composants, 8 sous-catégories sont finalement distinguées : à l'origine ; intermédiaire d'ordre 1 ; intermédiaire d'ordre 2 ; ... ; intermédiaire d'ordre 6 ; à la conclusion. Plus l'ordre est élevé et moins le rôle de diffuseur de risque est important : un composant qui se situe en moyenne principalement en position d'intermédiaire d'ordre 2 génèrera plus de scénarios de défaillances qu'un composant en moyenne majoritairement en position d'intermédiaire d'ordre 5. En effet, le composant en moyenne majoritairement d'ordre 2 est considéré comme ayant un rôle précurseur dans la mesure où il favorise le lancement et l'accroissement des mécanismes de propagation du risque par effet domino tandis que le composant en moyenne majoritairement d'ordre 5 présente un rôle conclusif car il intervient dans le maintien et le ralentissement de ces mécanismes. Identifier les composants portant particulièrement ces rôles initiateurs et terminatifs de scénarios de défaillances est donc essentiel pour appréhender la dynamique des mécanismes de diffusion du risque par effet domino.

Cette analyse statistique affinée de la position intermédiaire est représentée sous forme d'histogrammes empilés où chacune des valeurs est calculée sous forme de scores d'apparition identiquement aux équations précédentes, de la façon suivante :

$$\begin{aligned} & \text{Proportion de scénarios dans lesquels le composant X est intermédiaire d'ordre } k \\ &= \frac{\text{Nombre de fois où le composant X est en position } k}{\text{Nombre de scénarios contenant le composant X}} \quad (4.4) \end{aligned}$$

où k représente la position d'un composant au sein d'un scénario de défaillances (k étant compris entre 2 et 6 dans le cas de la configuration d'implantation en souterrain et en surface, et entre 2 et 5 dans le cas de la configuration en aérien).

Dans le cas de la configuration en souterrain, les histogrammes empilés de la [Figure 4.3](#) permettent de manière visuelle de mettre en avant l'ordre relatif à la position intermédiaire de chaque composant : **plus la couleur de la barre de l'histogramme est claire et plus l'ordre est grand c'est-à-dire moins le rôle de diffuseur de risque est important.**

Ainsi, quelques conclusions peuvent être tirées de cette troisième phase d'analyse statistique :

- le composant « ouvrage d'art », c'est-à-dire le tunnel, est très diffuseur de risque avec un score d'apparition de 7 % en intermédiaire d'ordre 1 et surtout de 89 % en intermédiaire d'ordre 2. Il a donc statistiquement une propension forte à accroître les défaillances par effet domino dès qu'il est lui-même impacté par le risque inondation ;
- les composants « espaces d'accès » et « électromécanismes » issus du sous-système gare ont eux aussi un rôle notable de propagation du risque *via* des effets domino avec respectivement 44 % et 73 % de score d'apparition en position intermédiaire d'ordre 3. Ces proportions indiquent là aussi une tendance à amplifier ou tout du moins entretenir les mécanismes de défaillances par effet domino dès lors que ces deux composants sont impactés ;
- les ensembles remisage et maintenance des trains voyageurs et des trains de travaux présentent aussi des scores d'apparition élevés en position intermédiaire d'ordre 1 : environ 50 % pour chacun de ces 4 composants. La conclusion est donc similaire aux cas précédents : les sites de maintenance, une fois impactés par le risque inondation, accroissent potentiellement les défaillances d'autres composants du système par des effets domino. Une hypothèse pouvant être avancée est la suivante : l'inondation des ensembles de remisage peut entraîner à son tour l'inondation et donc l'indisponibilité du matériel roulant voyageurs et dédié à la maintenance

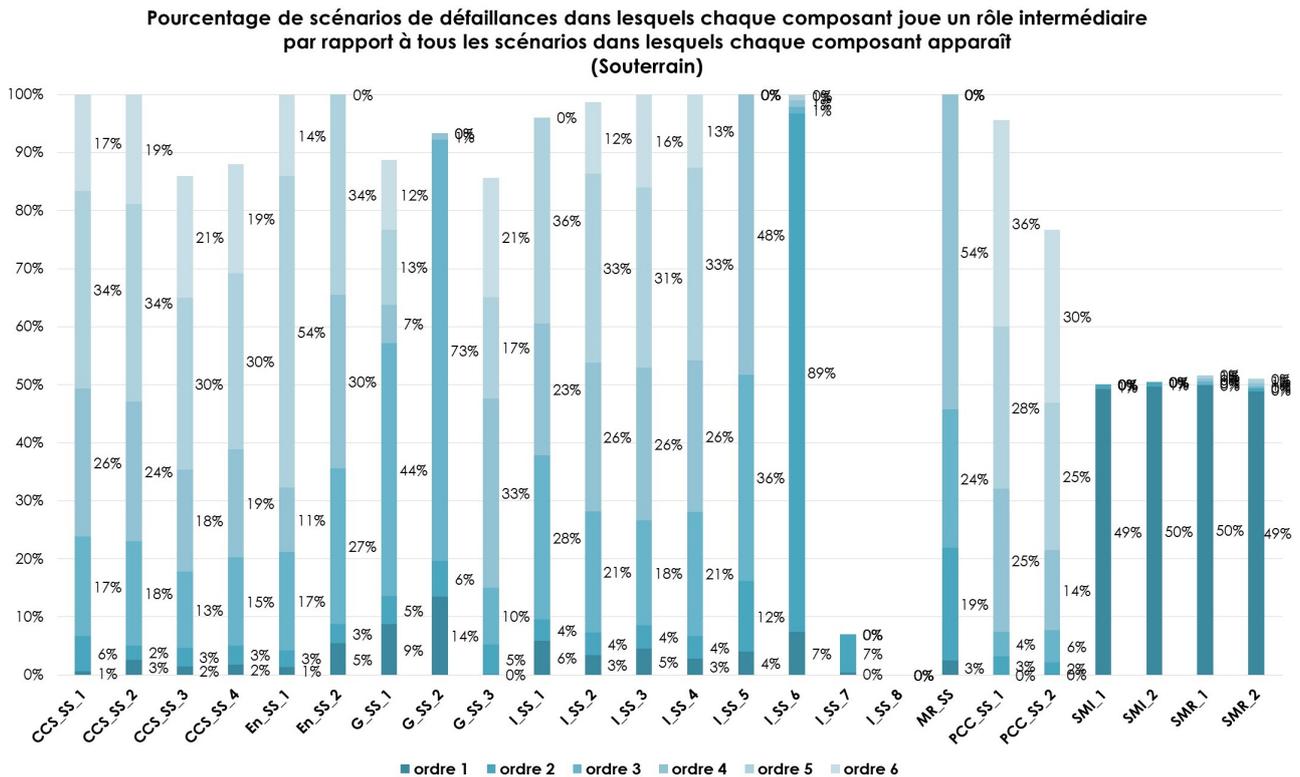


FIGURE 4.3 – Histogrammes présentant le positionnement « intermédiaire » des composants au sein des scénarios de défaillances relatifs à la configuration d’implantation en souterrain (source : auteur)

et de façon générale l’inondation des pièces de remplacement stockées.

Les résultats de cette analyse statistique affinée de la position intermédiaire est présentée en [Annexe](#) pour les deux autres configurations d’implantation.

Finalement, pour chaque configuration d’implantation, trois analyses statistiques sont appliquées de façon consécutive pour analyser les milliers de scénarios de défaillances par effet domino obtenus grâce au modèle d’identification et de production des interdépendances au sein d’un système de transport guidé. Les principaux résultats sont synthétisés dans le [Tableau 5.7](#).

4.2.1.2 Profil comportemental de composants

Après une première analyse relative au nombre de composants présents dans chaque scénario de défaillances, puis une seconde analyse visant à déterminer le positionnement moyen de chaque composant au sein de ces scénarios, une troisième et dernière analyse approfondit la position dite *intermédiaire* en la divisant en des catégories plus fines. Or, comme cela s’est dessiné grâce à la dernière analyse permettant d’identifier l’ordre d’apparition moyen de chacun des composants sur la section intermédiaire des scénarios de défaillances, les résultats peuvent permettre de déduire un **profil de composants relatif à leur comportement lorsque le système fait face à un risque inondation**. En effet, les composants apparaissant majoritairement dans la section intermédiaire des scénarios de défaillances dénotent un comportement diffuseur de risque en propageant les défaillances au sein du système tout entier *via* des effets domino et ce, à différents degrés.

De la même façon qu’il est possible d’établir un comportement pour les composants essentiellement intermédiaires, il est possible d’associer aux composants situés majoritairement en début et en fin de

TABLEAU 4.3 – Synthèse des résultats obtenus pour les trois analyses statistiques des scénarios de défaillances successives appliquées aux trois configurations d'implantation étudiées

	Objet	Objectifs	Résultats		
			Aérien	Surface	Souterrain
Analyse n°1	Tous les scénarios de défaillances contenant l'intégralité des composants	Analyser la longueur (nombre de composants) des scénarios de défaillances	<ul style="list-style-type: none"> — Nombre de scénarios équivalent à la configuration en surface — 84 % des scénarios contient entre 4 et 7 composants — Les scénarios les plus représentés sont ceux à 5 composants 	<ul style="list-style-type: none"> — Nombre de scénarios équivalent à la configuration en aérien — 91 % des scénarios contient entre 4 et 8 composants — Les scénarios les plus représentés sont ceux à 6 composants 	<ul style="list-style-type: none"> — Environ 5 fois plus de scénarios que les 2 autres configurations — 90 % des scénarios contient entre 5 et 8 composants — Les scénarios les plus représentés sont ceux à 7 composants
Analyse n°2	Tous les scénarios de défaillances contenant l'intégralité des composants	Déterminer la position moyenne de chaque composant : à l' origine , à la conclusion ou en intermédiaire	<ul style="list-style-type: none"> — « Ouvrage d'art aérien (pont, viaduc) », les « espaces d'accès » des gares et les « tuyaux de drainage » : majoritairement à l'origine des scénarios — « Câbles » du PCC, « câbles en gare » et « câbles de signalisation » et « mécanisme d'appareil de voie » : majoritairement à la conclusion des scénarios 	<ul style="list-style-type: none"> — « Plateforme » de l'infrastructure : majoritairement à l'origine des scénarios — « Câbles » du PCC, « câbles en gare » et « câbles de signalisation » et « mécanisme d'appareil de voie » : majoritairement à la conclusion des scénarios 	<ul style="list-style-type: none"> — « Espaces d'accès » des gares et « pompes d'épuisement » : majoritairement à l'origine des scénarios — « Câbles » du PCC, « câbles en gare » et « câbles de signalisation » : majoritairement à la conclusion des scénarios
Analyse n°3	Tous les scénarios de défaillances contenant la partie « intermédiaire » c'est-à-dire l'intégralité des composants exceptés le premier et le dernier	Analyser la partie « intermédiaire » des scénarios de défaillances pour comprendre le rôle des composants dans la propagation des mécanismes par effet domino	<ul style="list-style-type: none"> — « Tuyaux de drainage », « radier ferroviaire », « pylônes » supportant la caténaire, « SMR ensembles remisage / maintenance » et « SMI ensembles remisage / maintenance » : principalement propagateurs de risque 	<ul style="list-style-type: none"> — « Ouvrage hydraulique », « radier ferroviaire », « SMR ensembles remisage / maintenance » et « SMI ensembles remisage / maintenance » : principalement propagateurs de risque 	<ul style="list-style-type: none"> — « Tunnel », « espaces d'accès », « électromécanismes », « SMR ensembles remisage / maintenance » et « SMI ensembles remisage / maintenance » : principalement propagateurs de risque

scénarios des comportements spécifiques. Ces **profils comportementaux** reprennent partiellement la typologie établie par (LHOMME *et al.*, 2011), dont les travaux portent sur l'étude des effets domino entre les réseaux techniques urbains fortement interdépendants en cas d'inondation, et sont donc les suivants (GONZVA *et al.*, 2015) (Figure 4.4) :

- les composants **agressifs** concernent les éléments qui sont majoritairement situés **en première position des scénarios de défaillances**. Ils sont qualifiés de cette manière dans la mesure où leur défaillance représente un événement décisif qui amorce la dynamique de défaillance par effet domino. Ils ont ainsi un rôle d'initiateur de scénarios de défaillances par effet domino ;
- les composants **diffuseurs** concernent les éléments qui sont majoritairement situés **en position intermédiaire des scénarios de défaillances**, c'est-à-dire ni au début ni à la conclusion. Comme indiqué précédemment, ces éléments ont un rôle primordial dans les processus séquentiels de défaillances en démultipliant ces défaillances par effet domino, et par conséquent, en propageant le risque. Ce profil comportemental de diffuseur s'échelonne sur plusieurs degrés selon que l'élément soit diffuseur de premier ordre, c'est-à-dire fortement diffuseur, ou d'ordre supérieur, c'est-à-dire avec un rôle de diffusion moindre ;
- les composants **sensibles** concernent les éléments qui sont majoritairement situés **en dernière position des scénarios de défaillances**. Ce profil comportemental n'indique pas nécessairement une fragilité typique de ces éléments face au risque inondation mais plutôt que dès lors que s'amorcent des processus d'effet domino au sein du système, alors les scénarios de défaillances convergent majoritairement vers ces derniers. Leur rôle est d'ailleurs double dans la mesure où ils tendent aussi à **stopper** la diffusion du risque puisqu'il n'y a pas d'autres défaillances après la leur. Ils ont donc un rôle important d'**anti-diffusion** en étant des composants avec un rôle « **fusible** » ce qui permet de garantir l'intégrité du système et de limiter des défaillances en cascade généralisées.

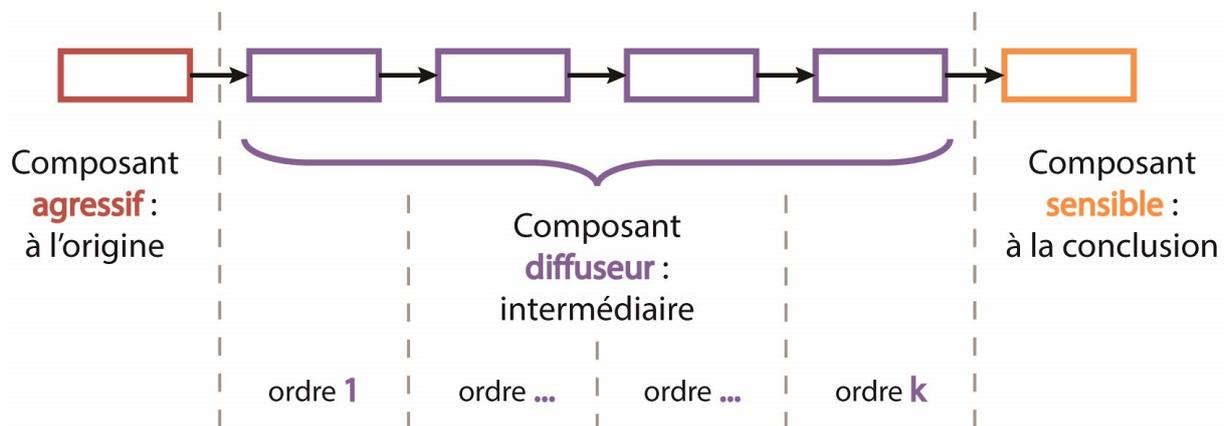


FIGURE 4.4 – Profils théoriques relatifs au comportement des composants lorsque le système fait face à un risque inondation : agressif, diffuseur ou sensible (source : auteur)

Ces profils comportementaux concrétisent la caractérisation de la vulnérabilité du système de transport dans son degré le plus précis. Cette démarche de caractérisation de la vulnérabilité est plurielle car elle requiert trois méthodes successivement appliquées et la mise en place d'un modèle informatique ; cette démarche peut donc être considérée comme un algorithme global (Figure 4.5). Le modèle informatique, constitué d'opérations successivement menées, améliore considérablement les résultats issus des méthodes classiques de la Sécurité de Fonctionnement que sont l'Analyse Fonctionnelle et l'AMDE en exploitant exhaustivement la connaissance que leurs résultats contiennent. En particu-

lier, la connaissance experte contenue dans les résultats de l'AMDE permet, lorsqu'elle est exploitée intégralement, d'établir les impacts matériels directs et indirects d'un risque naturel au sein d'un système urbain.

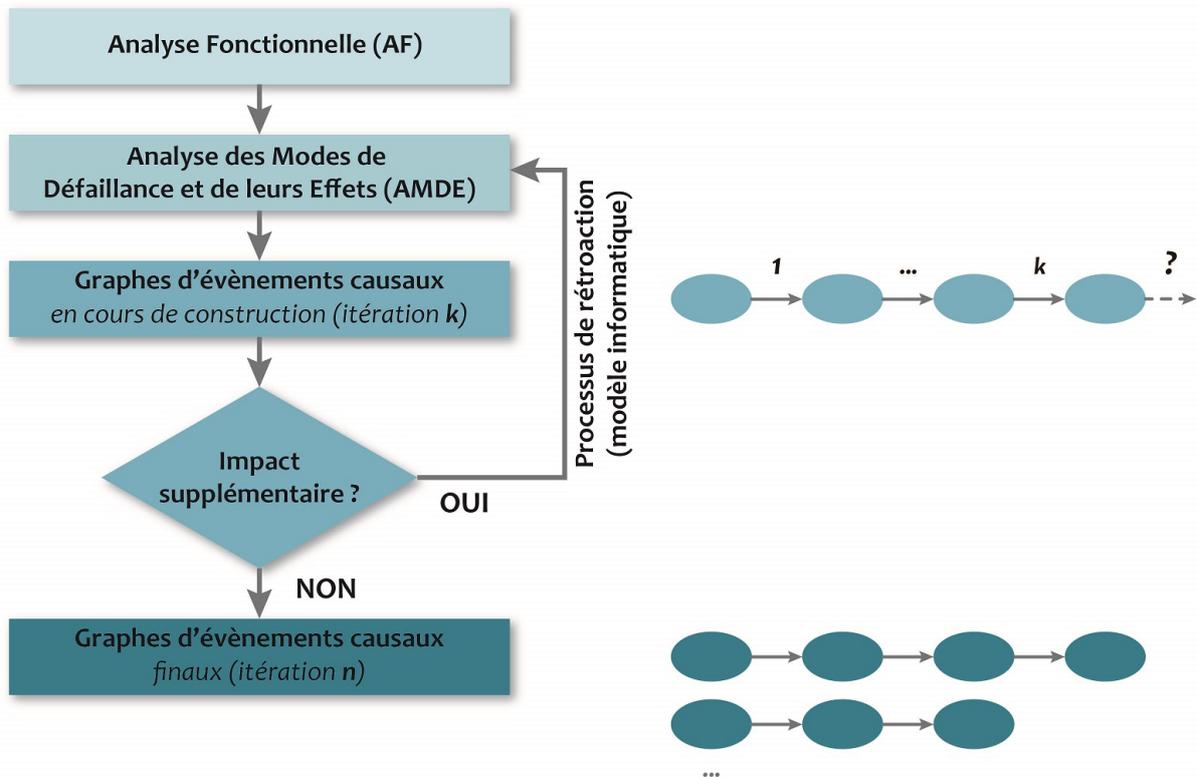


FIGURE 4.5 – Démarche méthodologique de caractérisation de la vulnérabilité d'un système de transport guidé : algorithme d'identification et de production des défaillances par effet domino (GONZVA *et al.*, 2016e)

Ainsi, à ce stade, la démarche méthodologique de caractérisation de la vulnérabilité face au risque inondation conduit à l'identification des comportements des composants. L'interrogation de rigueur désormais est celle de la portée opérationnelle de ces profils comportementaux. A quoi peuvent-ils concrètement servir? Dans quelle mesure la qualification d'un élément du système en composant agressif ou encore en composant sensible peut-elle servir de moyen d'action pour rendre le système tout entier plus résilient? Plus globalement, il est essentiel de déterminer dans quelle mesure l'ensemble de ces résultats issus d'une démarche assurément théorique se recoupe avec des retours d'expériences d'incidents provoqués par des aléas hydrologiques et avec quel niveau d'exactitude ce recoupement se fait.

Synthèse

Une deuxième analyse statistique est réalisée sur les milliers de scénarios de défaillances successives obtenus produits par le modèle d'interdépendances. Cette analyse s'intéresse aux caractéristiques structurelles des scénarios c'est-à-dire quels composants du système les forment. Pour cela, le positionnement moyen d'un composant donné est étudié par le calcul de proportions ou scores d'apparition qui lui sont spécifiques afin de déterminer si le composant a tendance à apparaître le plus fréquemment en premier, en position intermédiaire ou en dernier. Ainsi, des profils comportementaux peuvent être dressés selon ce positionnement moyen : des composants majoritairement situés en première position des scénarios de défaillances vont avoir un rôle agressif à l'égard des autres composants dès lors que le système subit une inondation, les composants majoritairement situés en dernière position des scénarios auront un profil sensible, et enfin, les composants majoritairement situés en position intermédiaire des scénarios ont un rôle de diffusion des défaillances. Ce dernier profil dit intermédiaire bénéficie d'une analyse statistique affinée afin de préciser ce rôle diffuseur. Finalement, le travail de caractérisation de la vulnérabilité se précise donc par l'identification de comportements des composants sous la contrainte d'une inondation.

4.3 Validation et discussion sur les résultats obtenus

4.3.1 Affichage de résultats selon des requêtes spécifiques de l'utilisateur

La validation des résultats théoriquement obtenus à partir du modèle d'interdépendances produisant les scénarios vraisemblables de défaillances par effet domino pour chaque configuration d'implantation nécessite une confrontation avec des incidents réels passés. Pour cela, il est indispensable de pouvoir aisément interroger la base de données car elle contient plusieurs milliers de scénarios selon les configurations et donc une très grande quantité d'informations quant aux potentialités de défaillances induites entre composants.

Pour pouvoir interroger les résultats contenus dans la base de données, le choix technique consiste à s'orienter vers l'utilisation de **formulaires**. Un formulaire est un objet d'une base de données dont le but est de créer une interface utilisateur contenant des boutons de commande pour une application dans la base de données afin d'afficher, d'entrer ou de modifier des données (NEJJARI, 2011).

Un formulaire est donc conçu avec comme besoins :

- la possibilité d'identifier l'existence, ou non, de scénarios de défaillances de composants par effet domino à partir d'une liste de composants donnés ;
- pour plus de souplesse et d'exhaustivité dans les résultats de la recherche, la liste de composants entrés par l'utilisateur n'a pas à être spécifiquement ordonnée selon un effet domino précis.

Le principe de fonctionnement du formulaire élaboré est le suivant (Figure 4.6) :

1. l'utilisateur entre les composants dont il souhaite connaître leurs potentiels liens au sein de scénarios de défaillances par effet domino à partir d'une liste déroulante ;
2. la matrice des scénarios de défaillances est interrogée afin d'identifier les scénarios contenant ces composants ajoutés, quel que soit leur ordre d'apparition dans les scénarios ;
3. le formulaire affiche les scénarios identifiés contenant les composants ajoutés par l'utilisateur.

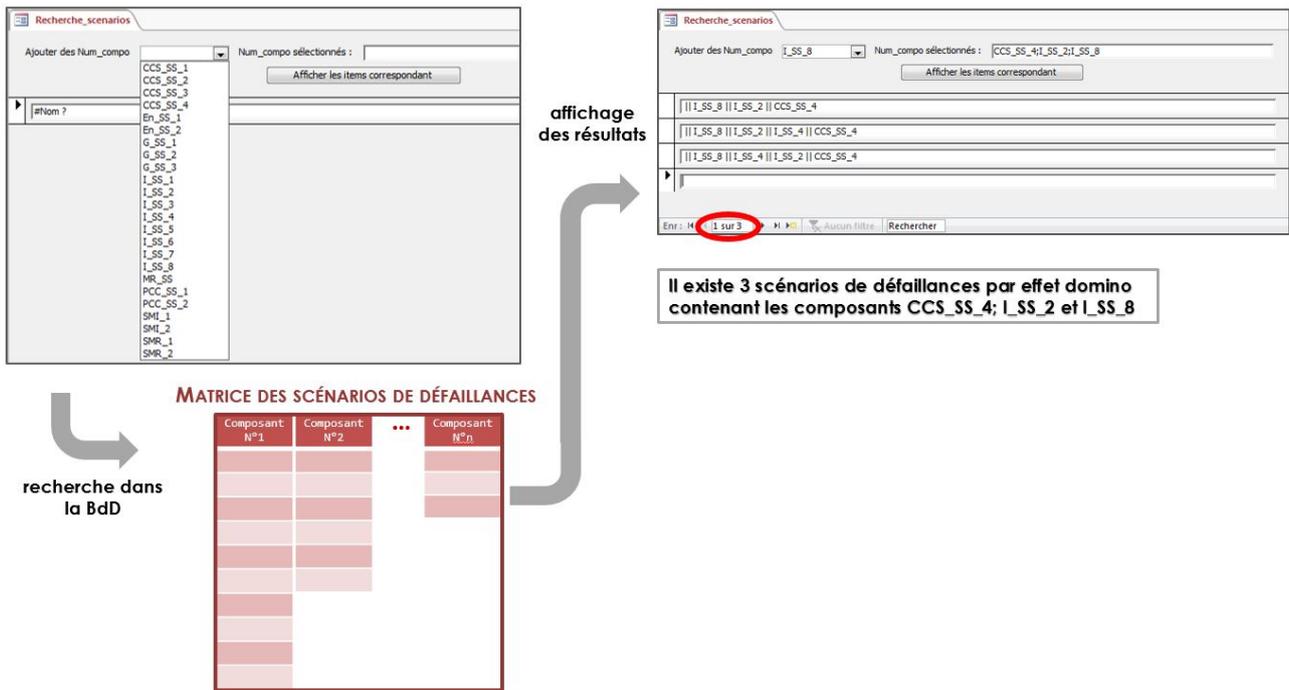


FIGURE 4.6 – Principe de fonctionnement et visuels du formulaire de recherche de scénarios à partir d'une liste de composants entrés par l'utilisateur (source : auteur)

Ce formulaire permet de rechercher si **plusieurs composants sont liés au sein de plusieurs scénarios de défaillances par effet domino** ; il permet aussi, comme conséquence directe, d'identifier s'il existe des **relations de vulnérabilité entre composants**. En sélectionnant par exemple un seul composant dans la barre de recherche, le formulaire fournit l'ensemble des scénarios dans lesquels celui-ci est inclus et de ce fait permet d'identifier tous les autres composants qui peuvent potentiellement engendrer sa défaillance. Les relations de vulnérabilité directe ou indirecte entre composants sont donc aussi mises en exergue par l'utilisation de ce formulaire.

4.3.2 Confrontation des résultats théoriques de la démarche par des retours d'expériences

4.3.2.1 Cas d'un incident touchant un système en configuration d'implantation en surface

4.3.2.1.1 Incident à Sarry en 2000

Les résultats obtenus grâce à cette démarche méthodologique théorique et à partir des analyses statistiques qui en sont faites semblent être corroborés par certains retours d'expériences d'incidents causés par des inondations sur des systèmes de transport guidé.

Décrit dans le [chapitre 2](#) (§ 2.1.), l'incident survenu près de la commune de Sarry dans l'Yonne dont l'origine est un orage bref et intense de pluie mêlée de grêle qui a causé d'importants ruissellements sur les infrastructures de la ligne à grande vitesse Sud-Est reliant Paris à Lyon (**PAMS CAPOCCIONI**

et al., 2015), peut être analysé sous l'angle des défaillances par effet domino. Ces effets domino matériels sur le système de transport sont, en effet, les suivants : dysfonction du composant assurant le drainage des eaux sur la voie, emportement du ballast impliquant de fait la dysfonction de ce composant, rails et traverses suspendus au-dessus du vide impliquant là aussi de fait la dysfonction de ces composants. Un dernier aléa d'ordre fonctionnel vient clore cet effet domino : l'interruption de la circulation au niveau de certaines gares pendant plusieurs heures (Figure 4.7). Les effets domino suivent donc, dans ce cas comme dans les autres cas d'impact de systèmes technico-fonctionnels, le schéma classique : un aléa précurseur (ici d'ordre hydrologique : un épisode pluvieux), suivi d'une séquence d'évènements locaux de défaillances matérielles d'éléments du système, pour enfin découler sur un aléa final correspondant à une perturbation fonctionnelle et globale du système.

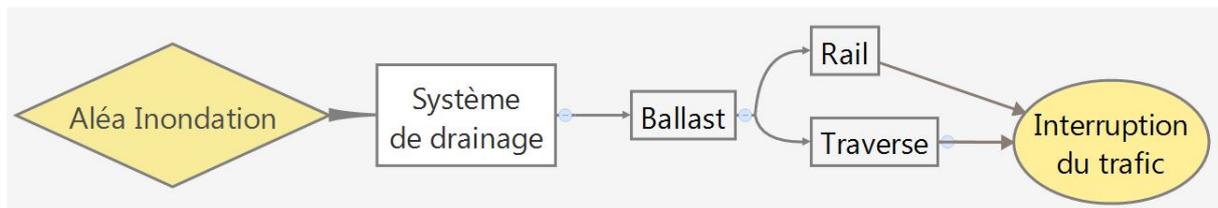


FIGURE 4.7 – Graphe causal empirique associé à l'incident survenu à Sarry en 2000 (source : auteur)

Les résultats théoriques présentés précédemment relatifs à la démarche de caractérisation de la vulnérabilité sont confortés par le risque Sarry sur deux aspects.

Premièrement, pour ce qui est de la position des composants, un examen factuel de l'incident montre que **la défaillance ayant initié la dynamique de défaillances par effet domino concerne le composant « ouvrage hydraulique »**, c'est-à-dire permettant le drainage des eaux présentes sur la voie ferrée. Or, les résultats obtenus par les trois analyses statistiques menées sur les scénarios de défaillances de la configuration d'implantation de surface (car l'incident Sarry a eu lieu sur un système positionné au sol) montrent que les scores d'apparition dominants sont :

- le composant « plateforme » (I_S_6) de l'infrastructure apparaît très majoritairement à l'origine des scénarios de défaillances (score d'apparition en position 1 de 95 %) suivi des quatre composants issus des sous-systèmes de maintenance du matériel roulant et de l'infrastructure (scores d'apparition en position 1 entre 37 % et 49 %) ;
- le rôle diffuseur est porté par plusieurs composants : le « radier ferroviaire » (I_S_8, cas de voie non ballastée) (intermédiaire d'ordre 1 à 80,09 %), les « ouvrages hydrauliques » (I_S_7) (intermédiaire d'ordre 1 à 50,05 % et d'ordre 2 à 49,95 %) suivi des quatre composants issus des sous-systèmes de maintenance du matériel roulant et de l'infrastructure (scores d'apparition en intermédiaire d'ordre 1 entre 27 % et 58 %) et enfin le composant « pylône » (En_S_3) avec un score d'apparition en intermédiaire d'ordre 2 valant 50,00 % ;
- très peu de composants ont un profil comportemental sensible dans cette configuration : composants « câbles » du PCC (PCC_S_2, score d'apparition en dernière position de 7,59 %), « câbles en gare » (G_S_3, score de 4,91 %), « câbles de signalisation » (CCS_S_4, score de 4,91 %) et « mécanisme d'appareil de voie » (CCS_S_3, score de 5,67 %) que l'on retrouve le plus grandement à la conclusion des scénarios.

La démarche théorique situe donc en moyenne **le composant « ouvrage hydraulique » comme majoritairement diffuseur d'ordre 1 et d'ordre 2**. Ce profil comportemental théorique associant à ce composant un rôle fortement diffuseur n'est pas en contradiction avec le fait que ce composant apparaît plutôt comme agressif dans le cas de l'incident Sarry. La défaillance des « ouvrages hydrauliques »

reste, en effet, un évènement qui initie statistiquement un grand nombre de scénarios de défaillances par effet domino : environ deux tiers de tous les scénarios produits dans le cas de la configuration d'implantation en surface inclut le composant « ouvrage hydraulique » en position 2 ou en position 3 (1 001 scénarios concernés sur un total de 1 561 scénarios). **L'effet domino observé lors de l'incident à Sarry est donc théoriquement corroboré par la prédominance de ce composant en tête de file des scénarios de défaillances.**

Par ailleurs, cette première validation met également en avant le fait que les profils comportementaux théoriques définis précédemment (Figure 4.4) ne sont pas, dans la pratique, des **catégories figées** mais servent plutôt à exprimer des **tendances comportementales** des composants relativement à leur rôle lorsque le système est en situation de crise : tendance à initier les défaillances par effet domino, tendance à les diffuser, tendance à les conclure (Figure 4.8).

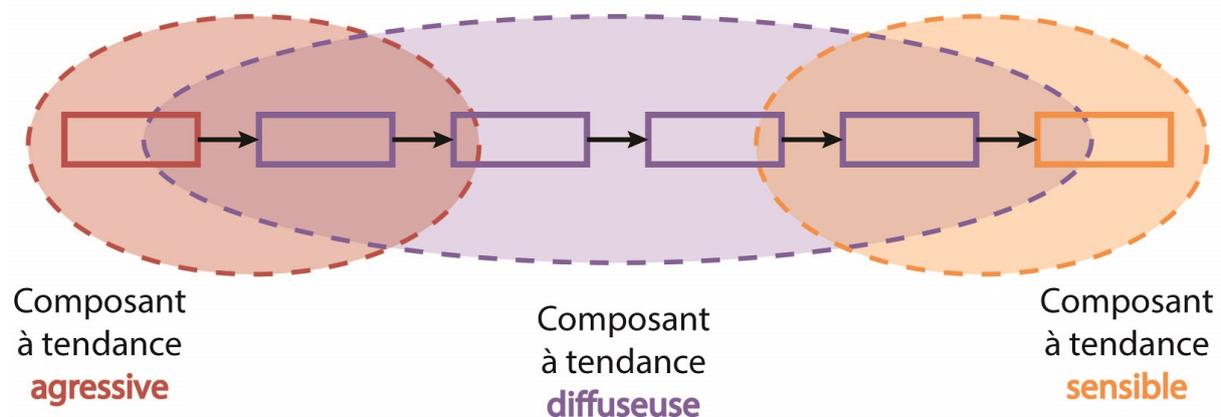


FIGURE 4.8 – Profils théoriques révisés, grâce aux retours d'expériences, relatifs au comportement des composants lorsque le système fait face à un risque inondation : tendance à un rôle agressif, diffuseur ou sensible (source : auteur)

Deuxièmement, pour ce qui est du scénario en lui-même, un autre axe de validation consiste à vérifier **dans quelle mesure le modèle d'interdépendances pour la caractérisation de la vulnérabilité identifie les effets domino** constatés lors de l'incident à Sarry. Autrement dit, rechercher parmi tous les scénarios théoriques de défaillance si le scénario de défaillances ayant eu lieu à Sarry est présent permet de confirmer que la méthodologie est apte à caractériser exhaustivement la vulnérabilité du système en anticipant toutes les défaillances potentielles par effet domino.

A l'aide du formulaire de recherche parmi les résultats de scénarios de défaillances obtenus, une recherche parmi les 1 561 scénarios générés par le modèle ne met pas en évidence de scénario contenant à la fois le composant « rail » (I_S_1), « traverses » (I_S_2), « ballast » (I_S_4) et « ouvrage hydraulique » (I_S_7) c'est-à-dire les 4 éléments principaux ayant été impliqués dans l'incident à Sarry. Quelle que soit la combinaison d'apparition de ces 4 composants dans le scénario, aucun ne ressort. Les mêmes recherches sont menées afin de vérifier s'il existe un ou des scénarios contenant 3 composants parmi les 4 composants impliqués dans l'incident, puis 2 composants parmi les 4. Les résultats de ces recherches, synthétisés dans le **Tableau 4.4**, révèlent qu'il existe 48 scénarios de défaillances successives causées par des effets domino reliant les composants « ouvrage hydraulique », « ballast » et « traverses ». Et, même si le composant « rail » est absent, il se trouve cependant lié avec les « traverses » dans 10 scénarios et avec « ouvrage hydraulique » dans 24 scénarios.

Ainsi, la totalité des scénarios produits par le modèle d'interdépendances semble être assez repré-

sentative des impacts dus à un risque inondation sur un système de transport guidé en surface, en couvrant une majeure partie des potentiels scénarios de défaillances par effet domino susceptibles de survenir.

TABLEAU 4.4 – Résultats des recherches faites au sein de l'ensemble des résultats obtenus pour la configuration d'implantation en surface en lien avec l'incident survenu à Sarry en 2000

	Composants pris en compte dans la recherche au sein des scénarios de défaillances obtenus	Résultats de la recherche (quel que soit l'ordre des composants)
4 composants parmi les 4	I_S_1; I_S_2; I_S_4; I_S_7	0 scénario trouvé
3 composants parmi les 4	I_S_1; I_S_2; I_S_4	0 scénario trouvé
	I_S_1; I_S_2; I_S_7	0 scénario trouvé
	I_S_1; I_S_4; I_S_7	0 scénario trouvé
	I_S_2; I_S_4; I_S_7	48 scénarios trouvés
2 composants parmi les 4	I_S_1; I_S_2	10 scénarios trouvés
	I_S_1; I_S_4	0 scénario trouvé
	I_S_1; I_S_7	24 scénarios trouvés
	I_S_2; I_S_4	107 scénarios trouvés
	I_S_2; I_S_7	72 scénarios trouvés
	I_S_4; I_S_7	72 scénarios trouvés

4.3.2.1.2. Incident à Coarraze en 2013

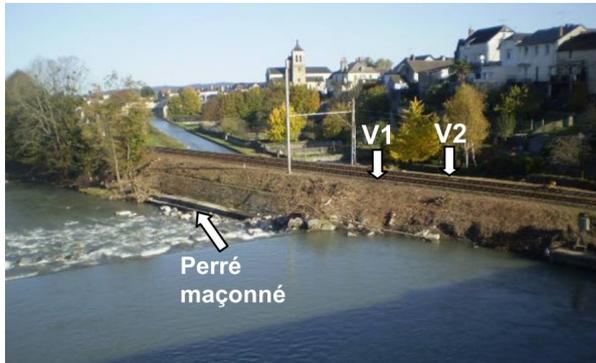
L'incident majeur qui s'est déroulé à Coarraze dans les Pyrénées-Atlantiques en juin 2013 est un intéressant retour d'expériences qui peut être lié à la démarche méthodologique de cette recherche.

Suite aux effets cumulatifs de la fonte des neiges et d'une pluie abondante ininterrompue au début de l'année 2013, le Gave de Pau entre en crue exceptionnelle entre les 18 et 20 juin 2013 au niveau de la commune de Coarraze, occasionnant d'importants dégâts sur la ligne à double voie entre Toulouse et Bayonne qui longe cette rivière dans ce secteur. Les désordres se sont localisés sur environ 300 mètres, entraînant le remblai et le ballast de la voie 1 sur environ 80 mètres ainsi qu'une caténaire, la déconsolidation du perré situé du côté de la voie 1 et un glissement du remblai du côté de la voie 2 suite à l'inondation de la plateforme (PONCHART et CHRETIEN, 2014) (Figure 4.9a et Figure 4.9b). Interrompue le 18 juin 2013, la circulation des trains a repris progressivement le 8 août 2013 avec une limitation temporaire de vitesse appliquée jusqu'au 15 août 2013. Environ deux mois auront donc été nécessaires à la remise en état matérielle et fonctionnelle de la ligne.

Le diagnostic a conclu essentiellement à la mise en cause de la configuration du site qui semble provoquer des vitesses d'écoulement importantes du Gave contre ce remblai ferroviaire. Pour preuves, ce remblai de Coarraze, situé qui plus est sur l'axe ferroviaire stratégique entre Lourdes et Pau, est un ouvrage qui a déjà connu par le passé (1966 et 2012) des réparations et désordres importants suite à des inondations (PONCHART et CHRETIEN, 2014).

Ce sont ces fortes vitesses d'écoulement du Gave qui ont emporté le remblai sous la voie 1, le 18 juin 2013, sur environ 80 mètres (rails suspendus au-dessus du vide) avec un support caténaire et son massif de fondation (Figure 4.10a). Cet affaissement de la caténaire du côté de la voie 1 a entraîné la déformation de celle du côté de la voie 2 (Figure 4.10b) (PONCHART et CHRETIEN, 2014).

Du côté de la démarche méthodologique de caractérisation de la vulnérabilité, comme indiqué précédemment dans le cas de l'incident survenu à Sarry en 2000, le composant « plateforme (remblai) » de l'infrastructure apparaît très majoritairement à l'origine des scénarios de défaillances (score d'appa-



(a) Photographie du secteur impacté prise avant le 18 juin 2013 (PONCHART et CHRETIEN, 2014)



(b) Photographie du secteur impacté prise le 18 juin 2013 (source : SNCF)

FIGURE 4.9 – Le Gave de Pau en situation normale et en situation de crue



(a) Supports caténaire affaissés suite à l'emportement du remblai ferroviaire (source : SNCF)



(b) Rails suspendus au-dessus du vide suite à l'emportement du remblai ferroviaire (source : SNCF)

FIGURE 4.10 – Le Gave de Pau en situation normale et en situation de crue

rition en position 1 de 95 %). Là aussi, cet incident majeur survenu à Coarraze en 2013 durant lequel l'emportement d'une partie du remblai a entraîné des dommages matériels et fonctionnels majeurs en chaîne se recoupe très bien avec les résultats de la démarche théorique.

4.3.2.2 Cas d'un incident touchant un système en configuration d'implantation en souterrain

Un autre retour d'expériences qui semble concorder avec les résultats obtenus grâce à la démarche méthodologique théorique est celui de l'inondation du métro de Prague en 2002 suite à la crue de la rivière *Vltava*.

Décrit dans le chapitre 2 (§ 2.1.), cette montée des eaux à Prague a eu pour conséquence l'inondation de toutes les lignes de métro sur plusieurs tronçons de plusieurs kilomètres ainsi que de nombreuses stations (CHAMRA, 2006). Analysé sous l'angle des défaillances par effet domino et en faisant l'hypothèse d'un seul composant touché initialement, cet incident majeur peut être décrit de la façon suivante : inondation initiale de stations (les 3 stations « *Nádraží Holešovice* », « *Vltavská* » et « *Florenc C* » sur la ligne C et les 4 stations « *Klížkova* », « *Invalidovna* », « *Palmovka* » et « *Florenc B* » sur la ligne B) les rendant de fait incapables d'assurer leur fonction, les électromécanismes (type escalier mécanique, ascenseur) présents dans les espaces de ces gares ont été ensuite inondés, puis les quais des stations se sont retrouvés sous les eaux, pour ensuite inonder les voies ferrées et rendre alors défaillants les composants du sous-système infrastructure (rails, traverses, appareils de voie), énergie (troisième rail) et du sous-système contrôle-commande et signalisation (détecteurs et balises, moteur d'appareils de voie, câbles de transmission). Enfin, par l'inondation des tunnels, d'autres gares ont été inondés rendant ainsi défaillants tous ces composants liés aux sous-systèmes infrastructure, contrôle-commande et signalisation et gare.

Ainsi, de façon classique, les effets domino suivent le schéma : un aléa précurseur (ici d'ordre hydrologique : une crue), suivi d'une séquence d'évènements locaux de défaillances matérielles d'éléments du système, pour enfin découler sur un aléa final correspondant à une perturbation fonctionnelle et globale du système (Figure 4.11).

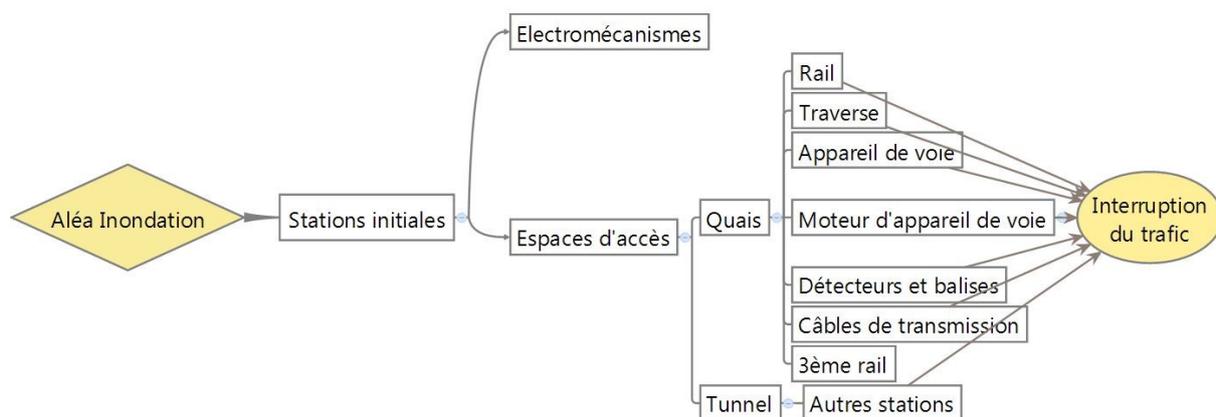


FIGURE 4.11 – Graphe causal empirique associé à l'inondation du métro de Prague en 2002 selon l'hypothèse d'un composant unique touché initialement (source : auteur)

Les résultats théoriques présentés précédemment relatifs à la démarche de caractérisation de la vulnérabilité sont appuyés par l'inondation du métro de Prague sur deux aspects.

Premièrement, pour ce qui est de la position des composants, un examen factuel de l'incident montre

que la défaillance ayant initié la dynamique de défaillances par effet domino concerne celle du composant « espace d'accès » due à l'inondation des premières stations. Or, les résultats obtenus par les trois analyses statistiques menées sur les scénarios de défaillances de la configuration d'implantation en souterrain (car le métro de Prague est un système souterrain) détaillés dans les paragraphes 4.1 et 4.2 montrent que les scores d'apparition (cf. Équation 4.1, Équation 4.2 et Équation 4.3) dominants sont :

- les composants « espaces d'accès » (G_SS_1) des gares et les « pompes d'épuisement » (I_SS_7) qui ont un profil essentiellement agressif ;
- les composants « câbles » du PCC (PCC_SS_2), « câbles en gare » (G_SS_3) « câbles de signalisation » (CCS_SS_4) et « mécanismes d'appareil de voie » permettant le mouvement des aiguillages (CCS_SS_3) qui ont un profil principalement sensible ;
- le composant « ouvrage d'art », c'est-à-dire le tunnel et « espaces d'accès » qui ont un comportement important de diffuseur de risque (ordres 1, 2 et 3).

La démarche théorique met donc en avant, en moyenne, le composant « espace d'accès » comme initiateur et propagateur de défaillances par effet domino et également le composant « tunnel » comme particulièrement propagateur. Ces résultats théoriques sont très en accord avec les défaillances observées lors de l'inondation du métro de Prague, tout comme les éléments liés à la signalisation démontrés fortement sensibles. **L'effet domino lors de cette inondation est donc théoriquement corroboré** par le positionnement de ces composants en tête, en fin et au sein des scénarios de défaillances.

Deuxièmement, une recherche est également menée au sein de tous les scénarios produits dans le cas de la configuration souterraine pour identifier si la succession de défaillances constatée à Prague est théoriquement générée. Une large recherche est réalisée avec les composants « détecteurs » (CCS_SS_2), « mécanisme d'appareil de voie » (CCS_SS_3), « câbles de signalisation » (CCS_SS_4), « troisième rail » (En_SS_2), « espaces d'accès » (G_SS_1), « électromécanismes » (G_SS_2), « câbles en gare » (G_SS_3), « rail » (I_SS_1), « traverse » (I_SS_2), « appareil de voie » (I_SS_3) et « quai » (I_SS_5). Au vu du grand nombre de composants impliqués, les éléments sont sélectionnés un à un, selon l'ordre de leurs défaillances par le processus d'effet domino représenté dans la Figure 4.11, de gauche à droite : « espaces d'accès » puis « quais » et « tunnel », etc. Les résultats de cette recherche de scénarios sont synthétisés dans le Tableau 4.5, identiquement au précédent Tableau 4.4.

Ces multiples recherches établissent qu'en sélectionnant un à un les composants impliqués successivement dans l'inondation du métro de Prague, **de nombreux scénarios théoriques de défaillances existent et ce jusqu'à 6 composants.**

Ainsi, bien qu'il soit impossible de trouver de scénarios liant les 11 types de composants vraisemblablement endommagés lors de cette inondation puisque les scénarios théoriques contiennent au plus 8 composants, **un nombre significatif de scénarios proches du cas de Prague sont produits par le modèle** dans le cas d'un système en configuration souterraine touché par une inondation.

TABLEAU 4.5 – Résultats des recherches faites au sein de l'ensemble des résultats obtenus pour la configuration d'implantation en souterrain en lien avec l'inondation du métro de Prague en 2002

	Composants pris en compte dans la recherche au sein des scénarios de défaillances obtenus	Résultats de la recherche (quel que soit l'ordre des composants)
2 composants sélectionnés	G_S_1 ; G_S_2	694 scénarios trouvés
3 composants sélectionnés	G_S_1 ; G_S_2 ; I_S_5	523 scénarios trouvés
4 composants sélectionnés	G_S_1 ; G_S_2 ; I_S_5 ; I_S_6	343 scénarios trouvés
5 composants sélectionnés	G_SS_1 ; G_SS_2 ; I_SS_5 ; I_SS_6 ; CCS_SS_1	45 scénarios trouvés
	G_SS_1 ; G_SS_2 ; I_SS_5 ; I_SS_6 ; CCS_SS_2	75 scénarios trouvés
	G_SS_1 ; G_SS_2 ; I_SS_5 ; I_SS_6 ; CCS_SS_3	45 scénarios trouvés
	G_SS_1 ; G_SS_2 ; I_SS_5 ; I_SS_6 ; CCS_SS_4	60 scénarios trouvés
	G_SS_1 ; G_SS_2 ; I_SS_5 ; I_SS_6 ; I_SS_1	15 scénarios trouvés
	G_SS_1 ; G_SS_2 ; I_SS_5 ; I_SS_6 ; I_SS_2	45 scénarios trouvés
	G_SS_1 ; G_SS_2 ; I_SS_5 ; I_SS_6 ; I_SS_3	30 scénarios trouvés
	G_SS_1 ; G_SS_2 ; I_SS_5 ; I_SS_6 ; En_SS_2	30 scénarios trouvés
6 composants sélectionnés	G_SS_1 ; G_SS_2 ; I_SS_5 ; I_SS_6 ; I_SS_1 ; I_SS_2	0 scénario trouvé
	G_SS_1 ; G_SS_2 ; I_SS_5 ; I_SS_6 ; I_SS_1 ; I_SS_3	0 scénario trouvé
	G_SS_1 ; G_SS_2 ; I_SS_5 ; I_SS_6 ; I_SS_2 ; I_SS_3	0 scénario trouvé
	G_SS_1 ; G_SS_2 ; I_SS_5 ; I_SS_6 ; CCS_SS_1 ; CCS_SS_2	15 scénarios trouvés
	G_SS_1 ; G_SS_2 ; I_SS_5 ; I_SS_6 ; CCS_SS_1 ; CCS_SS_3	0 scénario trouvé
	G_SS_1 ; G_SS_2 ; I_SS_5 ; I_SS_6 ; CCS_SS_1 ; CCS_SS_4	15 scénarios trouvés
	G_SS_1 ; G_SS_2 ; I_SS_5 ; I_SS_6 ; CCS_SS_2 ; CCS_SS_3	0 scénario trouvé
	G_SS_1 ; G_SS_2 ; I_SS_5 ; I_SS_6 ; CCS_SS_2 ; CCS_SS_4	15 scénarios trouvés
	G_SS_1 ; G_SS_2 ; I_SS_5 ; I_SS_6 ; CCS_SS_3 ; CCS_SS_4	0 scénario trouvé
7 composants sélectionnés	Tous ordres d'apparition de composants	0 scénario trouvé

Synthèse

Les analyses statistiques successivement réalisées sur les scénarios de défaillances par effet domino obtenus dans le cas de système de transport guidé souterrain, de surface et aérien ont abouti à plusieurs conclusions dont notamment les profils comportementaux des composants en situation de risque inondation. Ces conclusions d'ordre théorique ont été confrontées à des incidents passés provoqués par des inondations sur des systèmes de transport guidé implantés en souterrain et en surface. Il apparaît que les profils comportementaux sont validés avec les retours d'expériences. En particulier, ces retours d'expériences montrent que les profils correspondent plutôt à des tendances comportementales des composants qu'à des catégories fixes. De plus, le modèle d'interdépendances est complété par un module de recherche et d'affichage des résultats qui permet de déterminer si des composants donnés sont liés au sein de scénarios de défaillances par effet domino. Ce module est également validé par la pratique en démontrant que les composants endommagés lors d'incidents passés présentent des interdépendances entre eux pouvant générer les effets domino.

4.4 Conclusion du chapitre 4

Ainsi, à ce stade, la démarche méthodologique de caractérisation de la vulnérabilité face au risque inondation, réalisée préalablement à une démarche d'amélioration de la résilience face à ce même risque, est terminée dans son volet qualitatif. Il est en effet essentiel d'insister sur le fait que cette démarche est jusqu'ici de nature qualitative ou qualitative ordonnée du système face à un risque inondation.

Cette caractérisation de la vulnérabilité au travers des mécanismes de défaillance qui peuvent survenir par l'intermédiaire d'effet domino est permise par l'identification et la production de l'ensemble des interdépendances existantes entre les éléments du système. Ces interdépendances systémiques sont générées à partir du travail d'AMDE réalisée pour chacune des trois configurations possibles d'implantation d'un système de transport. Or, comme indiqué dans le chapitre précédent, de la qualité de l'analyse de risque dépend la qualité de la caractérisation de la vulnérabilité du système qui en découle. En particulier, les profils comportementaux des composants proviennent eux aussi des AMDE réalisées précédemment. Il est donc important de garder à l'esprit cette condition d'une indispensable bonne qualité de l'AMDE pour une caractérisation pertinente de la vulnérabilité du système face au risque inondation.

A propos des profils comportementaux mis en avant dans ce chapitre, quelques éléments nécessitent d'être synthétisés. Premièrement, ces profils comportementaux permettent la **caractérisation de la vulnérabilité globale du système** de transport de façon très précise **à partir des vulnérabilités individuelles** des éléments constitutifs. Deuxièmement, ce résultat théorique est à nuancer dans la pratique. Dans la pratique, ces profils expriment en fait des tendances comportementales des composants relativement à leur rôle lorsque le système est en situation de crise plutôt qu'une catégorisation immuable. Troisièmement, ces profils ou tendances de comportement de composants vis-à-vis du mécanisme d'effet domino sont **propres au risque inondation**. Ces résultats sont, en effet, issus d'un

travail fin d'analyse des scénarios de défaillances produits par le modèle d'interdépendances à partir de l'AMDE faite dans le cas d'une perturbation de type inondation. En aucun cas ces profils comportementaux ne peuvent être transposables à d'autres types de risques, naturels ou non. Bien au contraire, rien ne peut assurer qu'un composant agressif dans le cas du risque inondation ait, par exemple, un comportement sensible dans le cas d'un autre risque naturel. L'ensemble de l'étude est donc spécifique au risque inondation.

La perspective qu'il est intéressant d'aborder désormais consiste au perfectionnement de cette approche en associant à ces résultats qualitatifs des éléments quantitatifs. Ces éléments de quantification représentent une piste prometteuse pour l'évaluation des effets d'une mise en place de mesures opérationnelles en matière d'amélioration de la résilience d'un système de transport face à un risque inondation. Ils s'inscrivent dans une logique fortement partagée de quantification de la résilience par le biais de métriques, d'indicateurs ou de critères ([chapitre 1](#), § 2.2.).



Chapitre 5

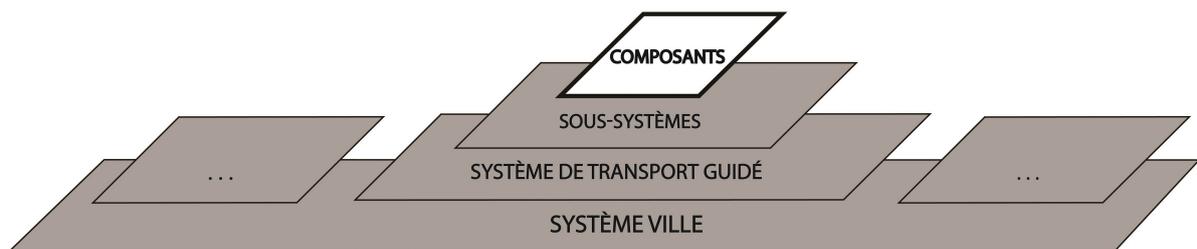
D'une approche qualitative vers une approche semi-quantitative

« One thing everybody wants to know is if they and their city are actually prepared for the next major shock, whether it's earthquakes, tornados, floods, or something more man-made.

To get to the heart of that question, we wanted to look at what risks cities are prioritizing to drive their preparation.

In other words, "does my city know what to be prepared for?" »

Joshua Woodbury, *Do You Know Your City's Natural Catastrophe Risk?*, 100
Resilience Cities, 2014.



La démarche méthodologique élaborée en vue d'une caractérisation de la vulnérabilité des systèmes de transport guidé soumis à un risque inondation, comme analyse nécessaire mais non suffisante à l'amélioration de leur résilience, conduit à l'étude des défaillances de composants par des mécanismes d'effet domino. Ces défaillances indirectes se propagent, en effet, de façon difficile à saisir parmi plusieurs sous-systèmes et plusieurs composants et ce, à partir de composants endommagés initialement. Ces processus particuliers de propagation des défaillances ont un rôle majeur dans la vulnérabilité des systèmes de transport et c'est la raison pour laquelle leur mécanisme doit faire l'objet d'une modélisation afin de comprendre leur dynamique.

Le [chapitre 3](#) a permis de mettre en œuvre un modèle d'interdépendances à cet effet, c'est-à-dire permettant d'identifier et de produire les scénarios de défaillances successives par effet domino engendrés lorsque le système est en situation de crise. Le [chapitre 4](#) s'est centré sur l'analyse de ces résultats en dégagant des **profils comportementaux** de composants. Ces profils émergent lorsque le système est en situation de crise et spécifient le comportement en matière de génération de défaillances que chacun des composants possède à l'égard du système global : un profil **agressif** pour les composants ayant tendance à amorcer la dynamique de défaillance par effet domino, un profil **sensible** relatif aux composants qui closent les processus d'effet domino, et un profil **diffuseur** lié aux éléments ayant une disposition particulière à entretenir voire accroître ces processus d'effet domino. Ces profils fondamentalement théoriques car issus d'une démarche conceptuelle se recoupent toutefois à partir de retours d'expériences sur des incidents passés de systèmes de transport atteints par une inondation.

Néanmoins, **l'ensemble de la méthodologie est à cette étape qualitative**. Que ce soit les modèles fonctionnel et dysfonctionnel du système, le modèle d'interdépendances permettant la production des scénarios de défaillances par effet domino ou encore les profils comportementaux, tous ces éléments fournissent, en effet, une caractérisation **qualitative** ou qualitative ordonnée du système face à un risque inondation. Cette relation d'ordre entre les résultats qualitatifs apparaît, notamment, par une distinction des scénarios de défaillances selon le nombre moyen de composants impliqués. Or, l'approche peut être perfectionnée en associant à ces résultats qualitatifs des éléments de **coûts** et de **délais de remise en état** d'un système touché par une inondation, toujours dans une optique comparative entre les trois configurations usuelles d'implantation. Dans ce contexte, des experts ayant une bonne connaissance de la maintenance des différents composants ferroviaires ont été mobilisés afin d'être interrogés sur ce sujet de remise en état dans le cas d'une inondation. L'objectif est d'associer des valeurs de coûts et de délais de remise en état dans le cas d'une inondation. Ainsi, ces éléments de coûts et de délais orientent globalement la démarche d'amélioration de la résilience vers du quantitatif et de l'opérationnel, en particulier en permettant d'être une aide à la réflexion pour des stratégies de conception, d'exploitation et de maintenance des systèmes vis-à-vis du risque inondation.

5.1 Evaluation des résultats par une approche « coûts-délais » de remise en état

5.1.1 Pertinence d'une approche coût/bénéfice pour l'évaluation de l'impact du risque inondation sur un système de transport guidé

Le fait de considérer qu'une démarche d'amélioration de la résilience, pour produire des résultats quantifiés, chiffrés, doit passer par une approche d'analyse coût/bénéfice est fréquemment mis en avant. Par exemple, le dimensionnement des ouvrages de prévention des inondations, dans le cadre des programmes d'actions de prévention contre les inondations (PAPI) se base sur la méthode de l'analyse coût/bénéfice actualisé (ACB). En effet, à partir d'indicateurs synthétiques de l'ACB, il est possible d'obtenir une comparaison quantifiée entre : **(i)** les coûts actuels d'une mesure de protection en fonction du niveau de sécurité recherché et **(ii)** l'espérance des dommages évités (bénéfices attendus) grâce à la mesure de protection (CEPRI, 2011b ; BACOT *et al.*, 2015, p. 19).

Plus généralement dans le cadre des mesures prises pour la gestion du risque inondation, l'analyse coût/bénéfice constitue le meilleur exemple connu dans la pratique pour l'évaluation économique de projets ou de politiques en offrant une vue globale des avantages et inconvénients sous la forme d'un bilan financier (BROUWER et VAN EK, 2004). Cette idée d'analyser et comparer les coûts et les bénéfices attendus de projets de gestion du risque inondation n'est d'ailleurs pas récente car elle est utilisée pour la première fois au début du XIX^{ème} siècle aux Etats-Unis pour être entérinée de façon obligatoire grâce à la loi du *Flood Control Act* de 1936 indiquant que les bénéfices doivent dépasser les coûts (HANLEY et SPASH, 1993, p. 4 ; 5). L'analyse coût/bénéfice est donc une méthode éprouvée qui est de surcroît systématisée.

La Directive « Inondation » 2007/60/CE relative à l'évaluation et à la gestion des risques d'inondation recommande, en effet, une application plus systématique de l'évaluation avant la mise en place des projets sans toutefois la rendre explicitement obligatoire (BRÉMOND, 2011, p. 77) : « *les plans de gestion des risques d'inondation tiennent compte d'aspects pertinents tels que les coûts et avantages* » (COMMISSION EUROPÉENNE, 2007). Par voie de conséquence, en France, cette orientation dans les projets relatifs à la gestion du risque inondation est devenue très notable, même si un travail important reste nécessaire pour définir des méthodologies stables permettant au maître d'ouvrage d'exprimer précisément ses besoins pour de telles évaluations coût/bénéfice (BRÉMOND, 2011, p. 79).

Ainsi, la démarche méthodologique présentée dans cette recherche s'inscrit dans cette logique **en associant à des potentielles défaillances des composants des systèmes de transport guidé lorsqu'ils font face à un risque inondation des coûts et des délais de remise en état des systèmes**. L'objectif essentiel derrière cette logique est en fait celui de pouvoir évaluer les coûts et les bénéfices de mesures structurelles et/ou organisationnelles pour la fiabilisation des éléments du système : la protection de composants critiques, choix d'une configuration d'implantation plus adaptée au vue des niveaux de risque encouru, etc.

5.1.2 Interrogations sous-jacentes à l'ordonnement des scénarios de défaillances selon des indicateurs quantitatifs

5.1.2.1 Problématique générale du chapitre

La problématique posée est la suivante : **de quelle manière et dans quel but associer des coûts et des délais de remise en état des composants du système qui sont défaillants suite aux impacts directs et indirects, c'est-à-dire par effet domino, provoqués par une inondation ?**

L'objectif est de pouvoir hiérarchiser les scénarios de défaillances identifiés, produits exhaustivement et analysés statistiquement dans les parties précédentes selon ces deux indicateurs quantitatifs (Figure 5.1). La réponse à cette problématique se base donc sur les milliers de scénarios de défaillances existant pour chacune des configurations d'implantation et recouvre d'autres interrogations telles que :

- parmi l'ensemble des scénarios de défaillances relatifs à une configuration d'implantation donnée, par quel(s) composant(s) les coûts et délais de remise en état sont-ils globalement **portés** ?
- pour chaque configuration d'implantation, quelle est la corrélation entre la **longueur** des scénarios de défaillances, c'est-à-dire le nombre de composants qu'ils impliquent, et l'**importance des coûts et délais** de remise en état calculés ?

L'introduction dans la démarche d'analyse d'indicateurs de type coût et délai de remise en état représente un premier pas vers la mise en place d'une logique d'analyse coût/bénéfice, encore trop absente des stratégies de gestion du risque inondation vis-à-vis des systèmes de transport guidé. La logique qui semble primer actuellement est, en effet, celle de la reconstruction au plus vite pour une remise en service des systèmes impactés.

La Figure 5.1 illustre cette logique d'analyse coût/bénéfice dans le cadre des scénarios de défaillances produits. Un ordonnancement préliminaire conduit à classer les scénarios selon le nombre de composants défaillants impliqués ; cet ordonnancement reste assez qualitatif. Pour proposer un autre mode d'ordonnement, sont associés à chaque scénario un coût et un délai de remise en état basés sur des hypothèses détaillées dans ce chapitre ; il devient alors ensuite possible de classer ces scénarios non plus par leur longueur mais par des caractéristiques quantitatives précises.

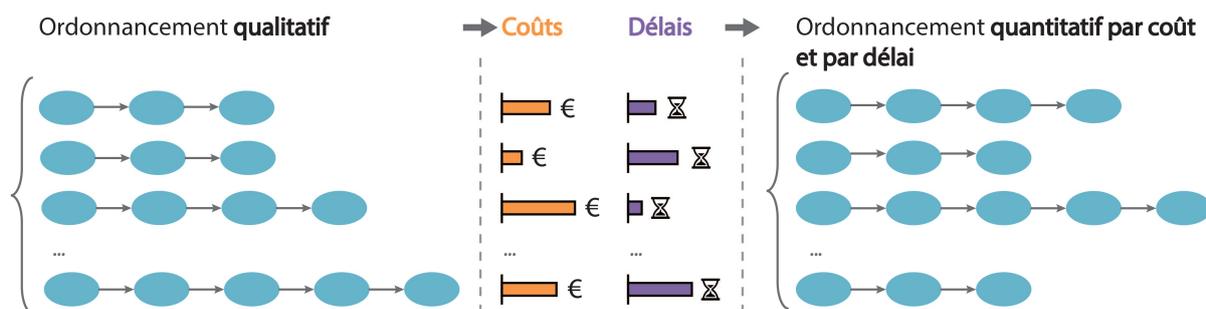


FIGURE 5.1 – Principe d'ordonnement des scénarios de défaillances par effet domino du qualitatif vers le quantitatif par l'ajout d'indicateurs de coûts et de délais de remise en état (source : auteur)

5.1.2.2 Notion de « remise en état » : fonction du type d'inondation

Il est essentiel de questionner la notion de « **remise en état** » d'un système de transport guidé ayant fait face à un risque inondation. La notion est entendue comme un processus de *recovery* en désignant la reconstruction du système c'est-à-dire la remise en état du matériel (REGHEZZA-ZITT, 2014). Dans un contexte de résilience vue comme une reconstruction c'est-à-dire une restauration matérielle, la remise en état est établie comme un **état** (par rapport à un état de référence, lorsque le système est en situation de fonctionnement normal) ou un **processus**. Cette reconstruction dépend de la vulnérabilité du système, d'où la nécessité d'une démarche de caractérisation de la vulnérabilité préalablement à une démarche d'amélioration de la résilience. En revanche, cette reconstruction n'est pas entièrement déterminée par cette vulnérabilité : il est possible d'être matériellement très vulnérable et se reconstruire très vite (REGHEZZA-ZITT, 2014) et inversement, d'être peu vulnérable mais de nécessiter un temps important de reconstruction. Par exemple, les mécanismes des appareils de voie permettant le passage d'une position en voie directe à une position en voie déviée sont fortement vulnérables car ce sont des dispositifs complexes ; cependant, le temps de changement du moteur en lui-même puis le contrôle de son bon fonctionnement est une opération de maintenance de l'ordre de quelques heures à quelques jours au maximum. A l'inverse, les quais au niveau des stations sont classiquement réalisés en béton et sont donc peu sensibles à l'eau ; néanmoins, en cas de quais fortement endommagés suite à des chocs dus à des embâcles transportés par une inondation, la reconstruction de nouveaux quais est une opération qui peut prendre plusieurs semaines.

Il apparaît donc important d'indiquer que les composants n'endurent pas de la même manière une inondation. Par exemple, dans le cas d'une crue **lente** c'est-à-dire avec une lente variation des cotes de niveau et des débits en un point donné et une lente propagation de l'onde de crue, des vitesses d'écoulements faibles ou modérés (< 1 m/s) et alimentées par des perturbations d'intensité modérée mais longue (plusieurs jours), les dommages résultent ordinairement de la **submersion des enjeux** (ROCHE *et al.*, 2012, p. 101) ce qui correspond notamment à un ennoisement partiel ou total des voies ferrées. Dans ce cas, les dégâts peuvent essentiellement conduire à du nettoyage des composants et du remplacement ponctuelle de certains. A l'opposée, dans le cas d'une crue **torrentielle** c'est-à-dire avec une forte variation des cotes de niveau en un point donné et une importante croissance des débits en seulement quelques heures comme c'est le cas pour la sous-catégorie des crues **rapides** dont les vitesses d'écoulements peuvent atteindre 3 à 5 m/s, les dommages fréquemment observés sur les enjeux sont **majeurs** dus à la **force d'arrachement** de ce type de crue (ROCHE *et al.*, 2012, p. 102). Dans ce cas, les dommages conduisent majoritairement en du remplacement de composants voire en de la reconstruction complète de sous-systèmes en entier.

Ainsi, selon une grande multiplicité de paramètres tels que l'intensité de l'aléa, le type de système de transport guidé, le contexte territorial dans lequel il est inséré, le système subit des dommages qui peuvent être de degrés croissants :

- **nettoyage de composants** suite au passage de l'inondation, nécessitant également un **contrôle de leur bon fonctionnement** ;
- **remplacement à l'identique de composants** propres à différents sous-systèmes détectés comme défectueux suite à l'inondation, nécessitant également un contrôle de leur bon fonctionnement ;
- **reconstruction complète de l'ensemble des composants** constitutifs de sous-systèmes donnés car ces derniers sont totalement endommagés.

Les dommages étant d'ampleur différente, les coûts et les délais de remise en état associés le sont aussi. Par conséquent, les coûts de remise en état et les délais de remise en état sont fonction de l'intensité de l'aléa.

Dans ce contexte, des distinctions **graduelles** sont faites de façon qualitative concernant l'aléa. L'objectif n'est pas de prendre un ou plusieurs scénarios de référence d'aléa inondation avec des périodes de retour données (décennale, cinquantennale, centennale, etc.) pour en déterminer les éventuelles évolutions ainsi que les conséquences physiques sur le système et sur sa performance. L'objectif est celui d'**identifier le degré d'intensité de l'aléa tel que le système de transport guidé devient inopérant** c'est-à-dire que ses fonctions ne sont plus assurées à un niveau acceptable. Cette approche s'oppose alors à l'approche classique de gestion des risques, entre aléa et conséquences matérielles, et s'oriente vers une logique plus proactive dans laquelle le système, tant dans ses éléments physiques que dans ses aspects organisationnels, est évalué dans sa baisse de performance suite à l'occurrence d'un aléa et dans sa capacité à maintenir un niveau de service même dégradé.

Trois **niveaux graduels d'aléa** sont donc définis qualitativement et les trois niveaux de « remise en état » correspondants sont établis (GONZVA *et al.*, 2016c) (Tableau 5.1).

TABLEAU 5.1 – Scénarios d'aléas graduels pris en compte et leurs conséquences

	Scénarios d'aléa graduel	Caractéristiques générales	Effets graduels provoqués par l'aléa
N°1	Inondation lente	Débits, vitesses d'écoulement faibles avec des hauteurs d'eau croissant puis décroissant lentement	→ Nettoyage et contrôle des composants
N°2	Inondation intermédiaire	Débits, vitesses d'écoulement moyennes avec des hauteurs d'eau croissant puis décroissant lentement	→ Remplacement de composants à l'identique
N°3	Inondation rapide	Débits, vitesses d'écoulement importants avec des hauteurs d'eau croissant puis décroissant rapidement	→ Reconstruction de sous-systèmes à l'identique

Les trois scénarios graduels ne sont pas nécessairement applicables à tous les éléments du système. Par exemple, les composants du sous-système « contrôle-commande et signalisation » (composants essentiellement électriques) ne font pas l'objet d'un nettoyage et d'un contrôle en cas d'inondation (scénario N°1) mais sont, quelle que soit l'inondation, remplacés ponctuellement à l'identique ou font l'objet d'une reconstruction globale du sous-système (scénario N°2 ou N°3).

Synthèse

L'objectif est d'approfondir la démarche méthodologique en associant aux scénarios de défaillances des coûts et des délais de remise en état. Cela permet d'apporter à la démarche une dimension quantitative basée sur une évaluation économique de l'endommagement potentiel si une inondation survient. Dans la mesure où l'endommagement des composants est fonction de l'intensité de l'inondation, il est nécessaire de distinguer plusieurs types d'inondation selon le niveau d'impact. Trois types d'inondation d'intensité graduelle sont définies : une inondation impliquant du nettoyage et contrôle de composants du système, une inondation impliquant du remplacement de composants à l'identique et une inondation impliquant de la reconstruction complète de sous-systèmes à l'identique.

5.2 Construction d'un modèle d'évaluation coûts-délais

L'évaluation coûts-délais des scénarios de défaillances se fait au sein de la base de données qui a été développée dans le cadre du modèle d'interdépendances. Plus précisément, l'évaluation coûts-délais constitue une modification du modèle d'interdépendances par l'ajout de cette fonctionnalité dont l'objectif est l'estimation des coûts et des délais de remise en état de chaque scénario. Ainsi, le modèle d'interdépendances devient aussi un modèle d'évaluation coûts-délais.

5.2.1 Détermination de valeurs de coûts et de délais de remise en état

5.2.1.1 Données relatives aux coûts

Pour alimenter le modèle d'évaluation coûts-délais, la première étape consiste à déterminer le coût associé à la remise en état d'un des 24 (ou 25) composants d'un système de transport guidé positionné en aérien, en surface ou en souterrain. Ces données sont nécessaires pour évaluer le coût des scénarios d'inondation graduels 1, 2 et 3 (Tableau 5.1).

5.2.1.1.1 Scénario d'aléa graduel N°1

Le scénario graduel N°1 consiste en du **nettoyage** et du **contrôle du bon fonctionnement des éléments du système de transport** et regroupe alors les activités de remise en état suivantes : nettoyage des embâcles sur la voie, vérification du fonctionnement des balises et détecteurs, contrôle des câbles et de la pertinence des informations transmises en fonction de la réalité, etc.

Ces opérations de nettoyage et contrôle mobilisent des ressources humaines c'est-à-dire du personnel de maintenance relatif aux différents types de sous-systèmes ferroviaires. Il est donc nécessaire pour évaluer le coût de ce type de scénario d'inondation d'identifier le nombre d'agents de maintenance nécessaires selon les opérations à réaliser et leur coût : la part individuelle (rémunération des agents), la part logistique (temps de trajet aller et retour sur site) et la part du coût relatif à la gestion de ces équipes (encadrement, matériel, etc.).

Ces équipes d'agents de maintenance et les coûts qui leur sont associés sont déterminés grâce à l'expertise de professionnels issus de la maintenance des systèmes ferroviaires en France. En particu-

lier, des experts de chez SYSTRA ont été interrogés. Ces coûts sont regroupés dans le [Tableau 5.2](#) et concernent les systèmes de transport guidé des trois configurations d'implantation. Deux cas de figures sont dissociés dans ce scénario de nettoyage et contrôle selon que l'on se situe à proximité d'une gare (« système en gare ») ou en pleine voie (« système courant ») car il est apparu lors des entretiens avec les experts que les ressources humaines à mobiliser varient.

TABLEAU 5.2 – Hypothèses de coûts et délais relatifs au scénario graduel N°1 pour les trois configurations d'implantation

	Système courant (pour 1 km)	Système en gare (pour 1 km)
Ressources humaines mobilisées	<ul style="list-style-type: none"> — 2 agents « maintenance de la voie » pendant 4h ; — 2 agents « maintenance de la signalisation » pendant 8h ; — 2 agents « maintenance de la caténaire » pendant 4h ; — 4h de management. 	<ul style="list-style-type: none"> — 2 agents « maintenance de la voie » pendant 6h ; — 2 agents « maintenance de la signalisation » pendant 8h ; — 2 agents « maintenance de la caténaire » pendant 6h ; — 2 agents « services gare » (électromécanismes, billettique...) pendant 8h ; — 1 équipe de nettoyage (quais...) : 6 agents pendant 8h ; — 40h de management.
Coût horaire forfaitaire	100 €	100 €

5.2.1.1.2. Scénarios d'aléa graduel N°2 et N°3

Les scénarios graduels N°2 et N°3 consistent en du **remplacement de composants** voire de la **re-construction complète de sous-systèmes**. Les coûts identifiés relatifs aux composants présentent les caractéristiques suivantes :

- chaque coût couvre le prix d'achat de l'élément considéré et sa mise en place sur site ;
- l'unité des coûts est de deux types : en **euros par mètre** pour des composants linéaires (rail, caténaire, etc.) et en **euros par pièce** pour des composants ponctuels (pylône de support de la caténaire, appareil de voie, etc.) ;
- les coûts se réfèrent à un type de système de transport guidé donné car ils diffèrent selon la configuration d'implantation en aérien, en surface et en souterrain et selon que le système étudié soit un tramway, un métro, une ligne ferroviaire classique ou une ligne à grande vitesse. Dans chacun des cas, les coûts des composants varient ;
- les coûts sont identifiés sous forme d'**intervalles** plutôt que sous forme de **valeurs absolues**. Ceci s'explique par le fait qu'il est complexe de déterminer un coût absolu à un composant donné dans la mesure où ce coût dépend d'une multitude de paramètres très variables selon les projets et qu'il serait complexe d'évaluer tels que la variabilité du coût selon la quantité achetée, l'accessibilité du site, etc. ;
- les coûts sous forme d'intervalles sont pertinents dans la démarche entreprise puisqu'elle vise à apprécier l'**ampleur** économique du risque inondation sur un système de transport dans une optique comparative des scénarios de défaillances, et plus globalement, des configurations d'implantation.

Ainsi, dans ce cadre, les coûts associés à la remise en état de chacun des 24 (ou 25) composants sont évalués parmi **les cinq catégories suivantes** :

- de 0 à plusieurs centaines d'euros ;
- de plusieurs centaines à plusieurs milliers d'euros ;
- de plusieurs milliers à plusieurs dizaines de milliers d'euros ;
- de plusieurs dizaines de milliers à plusieurs centaines de milliers d'euros ;
- de 1 à plusieurs millions d'euros.

Les coûts associés à la remise en état sont déterminés à partir de l'**interrogation de professionnels issus de la maintenance** des systèmes ferroviaires. Dans le cas d'un système de transport guidé implanté en surface, ces coûts sont regroupés dans le [Tableau 5.3](#).

Les coûts associés à la configuration d'implantation en aérien et en souterrain sont présentés en [Annexe](#).

5.2.1.2 Données relatives aux délais

Pour alimenter le modèle d'évaluation coûts-délais, la seconde étape consiste à déterminer le délai associé à la remise en état d'un des 24 (ou 25) composants d'un système de transport guidé positionné en aérien, en surface ou en souterrain. Ces données sont nécessaires pour évaluer le délai des scénarios d'inondation graduels 1, 2 et 3 ([Tableau 5.1](#)).

5.2.1.2.1. Scénario d'aléa graduel N°1

Dans le cas du scénario graduel N°1 qui comprend des opérations de nettoyage et de contrôle du bon fonctionnement des éléments du système de transport, les délais associés correspondent aux temps des équipes de maintenance à réaliser ces tâches. Ces délais sont regroupés dans le [Tableau 5.2](#) (page précédente) avec les ressources humaines mobilisées.

5.2.1.2.2. Scénarios d'aléa graduel N°2 et N°3

Les scénarios graduels N°2 et N°3 consistent en du remplacement de composants jusqu'à de la reconstruction complète de sous-systèmes. Les délais identifiés avec l'aide d'experts de chez SYSTRA relatifs à la remise en état des composants présentent les caractéristiques suivantes :

- chaque délai pris en compte est une valeur globale incluant le temps acheminement sur site (des engins de chantier, des matériaux, des ressources humaines), le temps de travaux à proprement parler (remplacement des composants) et le temps d'essais et de contrôle (bon fonctionnement du composant) ;
- les valeurs de délais sont dépendantes de l'accessibilité au site de chantier : un site accessible c'est-à-dire desservi par des voies routières et piétonnes implique des délais de remise en état moins importants qu'un site enclavé c'est-à-dire accessible uniquement *via* la voie ferrée par des trains de travaux ;
- de la même façon que les coûts de remise en état, les délais sont identifiés sous forme d'**intervalles** plutôt que sous forme de **valeurs absolues**. Il est aussi, en effet, complexe de déterminer un délai de remise en état absolu d'un composant donné dans la mesure où ce délai est fonction d'une multitude de paramètres très variables ;
- les délais sous forme d'intervalles sont appropriés dans la démarche puisqu'elle vise à estimer l'**ampleur** de la reconstruction suite à un risque inondation sur un système de transport dans

TABLEAU 5.3 – Coûts de remise en état associés aux composants d'un système de transport guidé en configuration d'implantation de surface pour les scénarios d'aléa graduel N°2 et N°3

Identifiant du composant	Désignation complète du composant	Coûts		
		Intervalles (en euros) *	Valeur BdD	Unité
CCS_S_1	Composants « à bord » au sein du matériel roulant	pls. milliers à pls. diz. de milliers	10 ⁴	€/pièce
CCS_S_2	Composants au « sol » : détecteurs, balises	pls. centaines à pls. milliers	10 ³	€/m
CCS_S_3	Composants « au sol » : mécanismes d'appareils de voie	pls. centaines à pls. milliers	10 ³	€/pièce
CCS_S_4	Composants « au sol » : câbles de signalisation	0 à pls. centaines	10 ²	€/m
En_S_1	Ligne aérienne de contact	0 à pls. centaines	10 ²	€/m
En_S_2	Troisième rail	pls. centaines à pls. milliers	10 ³	€/m
En_S_3	Pylônes et fondations	pls. centaines à pls. milliers	10 ³	€/pièce
G_S_1	Espaces d'accès	1 à pls. millions	10 ⁶	€/pièce
G_S_2	Electromécanismes	pls. diz de milliers à pls. centaines de milliers	10 ⁵	€/pièce
G_S_3	Câbles en gare	0 à pls. centaines	10 ²	€/m
I_S_1	Rails	0 à pls. centaines	10 ²	€/m
I_S_2	Traverses et supports de voie	0 à pls. centaines	10 ²	€/m
I_S_3	Appareils de voie	pls. milliers à pls. diz. de milliers	10 ⁴	€/pièce
I_S_4	Ballast (cas de voie ballastée)	0 à pls. centaines	10 ²	€/m
I_S_5	Quais	pls. milliers à pls. diz. de milliers	10 ⁴	€/pièce
I_S_6	Ouvrage hydraulique	pls. centaines à pls. milliers	10 ³	€/pièce
I_S_7	Radier ferroviaire (cas de voie bétonnée)	pls. centaines à pls. milliers	10 ³	€/m
I_S_8	Plateforme	pls. centaines à pls. milliers	10 ³	€/m
MR_S	Matériel Roulant	1 à pls. millions	10 ⁶	€/pièce
PCC_S_1	Salle d'exploitation	1 à pls. millions	10 ⁶	€/pièce
PCC_S_2	Câbles (remontées / transmission d'informations)	0 à pls. centaines	10 ²	€/m
SMI_1	Ensemble « remisage » des trains de travaux	1 à pls. millions	10 ⁶	€/pièce
SMI_2	Ensemble « maintenance » des trains de travaux	1 à pls. millions	10 ⁶	€/pièce
SMR_1	Ensemble « remisage » du matériel roulant voyageurs	1 à pls. millions	10 ⁶	€/pièce
SMR_2	Ensemble « maintenance » du matériel roulant voyageurs	1 à pls. millions	10 ⁶	€/pièce

* Note :

0 à pls. centaines : 0 à plusieurs centaines d'euros

pls. centaines à pls. milliers : de plusieurs centaines à plusieurs milliers d'euros ;

pls. milliers à pls. diz. de milliers : de plusieurs milliers à plusieurs dizaines de milliers d'euros ;

pls. diz de milliers à pls. centaines de milliers : de plusieurs dizaines de milliers à plusieurs centaines de milliers d'euros ;

1 à pls. millions : 1 à plusieurs millions d'euros.

une optique comparative des scénarios de défaillances, et plus globalement, des configurations d'implantation.

Ainsi, dans ce cadre, les délais associés à la remise en état de chacun des 24 (ou 25) composants sont évalués parmi **les cinq catégories suivantes** :

- de 0 à plusieurs heures ;
- de plusieurs heures à plusieurs jours ;
- de plusieurs jours à plusieurs semaines ;
- de plusieurs semaines à plusieurs mois ;
- de 1 à plusieurs années.

Les délais associés à la remise en état sont déterminés à partir de l'**interrogation de professionnels de la maintenance des systèmes ferroviaires au sein de chez SYSTRA**. Dans le cas d'un système de transport guidé implanté en surface, ces délais sont regroupés dans le [Tableau 5.4](#).

Les délais associés à la configuration d'implantation en aérien et en souterrain sont présentés en [Annexe](#).

5.2.2 Principes de fonctionnement du modèle d'évaluation coûts-délais

Une fois que sont recensés les coûts et les délais de remise en état individuels de l'ensemble des éléments constitutifs d'un système de transport guidé souterrain, de surface et aérien, la troisième étape consiste à évaluer les coûts et délais associés à chaque des milliers de scénarios de défaillances.

5.2.2.1 Coût d'un scénario de défaillances

Le **coût global ou total** d'un scénario de défaillances est estimé **en sommant le coût individuel de chaque composant constitutif**. Il est, en effet, considéré qu'additionner les coûts individuels, et indépendants, des composants permet de donner une estimation correcte du coût global d'un scénario de défaillances de composants par effet domino.

Pour permettre ce calcul dans la base de données précédemment développée dans le cadre du modèle d'interdépendances, il convient de convertir les intervalles de coûts sous forme de libellés textuels (« de plusieurs centaines à plusieurs milliers d'euros », etc.) vers une forme numérique. Dans ce cadre, le choix est fait de transformer les libellés sous forme de puissance de 10 pour permettre à la base de données d'effectuer les sommes.

Le choix des puissances de 10 est cohérent avec la représentation des coûts sous forme d'intervalles dans la mesure où ce coût global vise à apprécier l'ampleur économique des scénarios de défaillances engendrés par un risque inondation.

Ainsi concernant les intervalles de coûts, l'équivalence entre les libellés textuels et les puissances de 10 est synthétisée dans le [Tableau 5.5](#).

Ces équivalences entre libellés textuels et valeurs numériques sous forme de puissance de 10 sont synthétisées dans le [Tableau 5.3](#) pour l'ensemble des coûts de remise en état des composants d'un système de transport guidé positionné en surface.

TABLEAU 5.4 – Délais de remise en état associés aux composants d'un système de transport guidé en configuration d'implantation de surface pour les scénarios d'aléa graduel N°2 et N°3

Identifiant du composant	Désignation complète du composant	Délais *	
		Scénario d'aléa graduel N°2	Scénario d'aléa graduel N°3
CCS_S_1	Composants « à bord » au sein du matériel roulant	1 à pls. années	1 à pls. années
CCS_S_2	Composants au « sol » : détecteurs, balises	pls. jours à pls. semaines	pls. jours à pls. semaines
CCS_S_3	Composants « au sol » : mécanismes d'appareils de voie	pls. heures à pls. jours	pls. heures à pls. jours
CCS_S_4	Composants « au sol » : câbles de signalisation	pls. jours à pls. semaines	pls. jours à pls. semaines
En_S_1	Ligne aérienne de contact	pls. heures à pls. jours	pls. semaines à pls. mois
En_S_2	Troisième rail	0 à pls. heures	0 à pls. heures
En_S_3	Pylônes et fondations	pls. heures à pls. jours	pls. semaines à pls. mois
G_S_1	Espaces d'accès	pls. heures à pls. jours	pls. heures à pls. jours
G_S_2	Electromécanismes	pls. jours à pls. semaines	pls. jours à pls. semaines
G_S_3	Câbles en gare	pls. heures à pls. jours	pls. heures à pls. jours
I_S_1	Rails	0 à pls. heures	0 à pls. heures
I_S_2	Traverses et supports de voie	0 à pls. heures	0 à pls. heures
I_S_3	Appareils de voie	0 à pls. heures	0 à pls. heures
I_S_4	Ballast (cas de voie ballastée)	pls. heures à pls. jours	pls. semaines à pls. mois
I_S_5	Quais	pls. jours à pls. semaines	pls. jours à pls. semaines
I_S_6	Ouvrage hydraulique	0 à pls. heures	0 à pls. heures
I_S_7	Radier ferroviaire (cas de voie bétonnée)	0 à pls. heures	0 à pls. heures
I_S_8	Plateforme	pls. heures à pls. jours	pls. semaines à pls. mois
MR_S	Matériel Roulant	1 à pls. années	1 à pls. années
PCC_S_1	Salle d'exploitation	1 à pls. années	1 à pls. années
PCC_S_2	Câbles (remontées / transmission d'informations)	pls. heures à pls. jours	pls. heures à pls. jours
SMI_1	Ensemble « remisage » des trains de travaux	0 à pls. heures	pls. semaines à pls. mois
SMI_2	Ensemble « maintenance » des trains de travaux	0 à pls. heures	1 à pls. années
SMR_1	Ensemble « remisage » du matériel roulant voyageurs	0 à pls. heures	pls. semaines à pls. mois
SMR_2	Ensemble « maintenance » du matériel roulant voyageurs	0 à pls. heures	1 à pls. années

* Note :

0 à pls. heures : 0 à plusieurs heures ;

pls. heures à pls. jours : de plusieurs heures à plusieurs jours ;

pls. jours à pls. semaines : de plusieurs jours à plusieurs semaines

pls. semaines à pls. mois : de plusieurs semaines à plusieurs mois ;

1 à pls. années : de 1 à plusieurs années.

TABLEAU 5.5 – Délais de remise en état associés aux composants d'un système de transport guidé en configuration d'implantation de surface pour les scénarios d'aléa graduel N°2 et N°3

Intervalles de coûts (libellés textuels)	Puissances de 10 (valeurs BdD)
0 à plusieurs centaines d'euros	↔ 10 ²
de plusieurs centaines à plusieurs milliers d'euros	↔ 10 ³
de plusieurs milliers à plusieurs dizaines de milliers d'euros	↔ 10 ⁴
de plusieurs dizaines de milliers à plusieurs centaines de milliers d'euros	↔ 10 ⁵
1 à plusieurs millions d'euros	↔ 10 ⁶

Ainsi, une table est créée au sein de la BdD contenant les coûts des composants sous forme de puissance de 10. Une succession de requêtes sont ensuite réalisées au sein de la table contenant tous les scénarios de défaillances afin d'associer à chacun des composants inclus leur coût individuel puis de les sommer pour en déduire le coût total de remise en état de chacun des scénarios de défaillances (Figure 5.2).

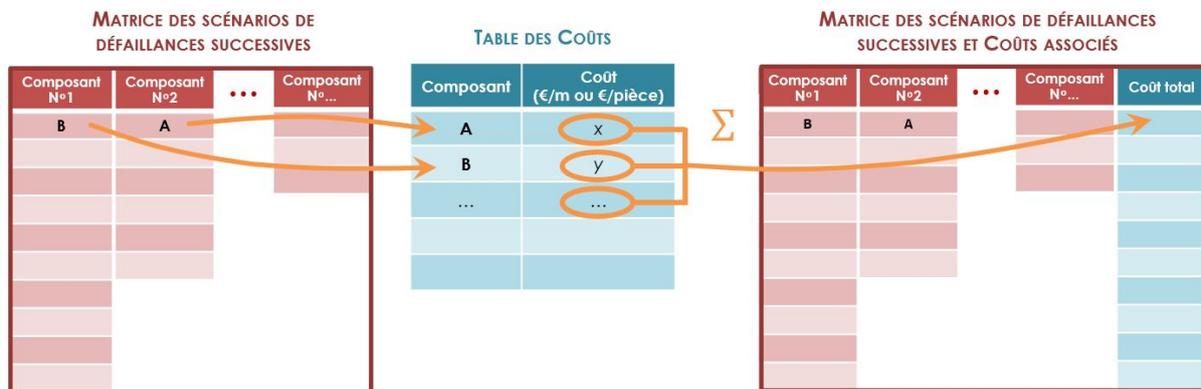


FIGURE 5.2 – Principe d'estimation du coût total d'un scénario de défaillances successives par effet domino réalisée au sein du modèle d'évaluation coûts-délais (source : auteur)

Le **coût total** obtenu pour un scénario donné de défaillances en chaîne est donc **exprimé sous forme numérique en étant la somme de plusieurs puissances de 10**. Cette valeur numérique est, enfin, mise **sous format de libellé textuel afin de revenir à une expression sous forme d'intervalles** de coûts. L'utilisation des équivalences formulées dans le [Tableau 5.5](#) est apparue trop restrictive c'est-à-dire que les coûts se répartissent majoritairement dans les catégories extrêmes (« 1 à plusieurs millions d'euros » notamment). C'est la raison pour laquelle le passage de valeurs numériques à libellés textuels pour le coût global se fait avec les intervalles définis dans le [Tableau 5.6](#). Les bornes des intervalles sont discutables ; néanmoins, elles sont fixées de façon à avoir une répartition réaliste des coûts globaux selon les cinq intervalles définis. Elles peuvent être aisément modifiées par l'utilisateur.

Il est important de mentionner l'**unité** de ces coûts totaux. En effet, en tant que somme de coûts individuels s'exprimant soit en euros par mètre (composants linéaires) ou soit en euros par pièce (composants ponctuels), le coût total correspond donc à une valeur exprimée en euros par mètre et par pièce. Bien que ces valeurs calculées de coût total ne soient pas réellement représentatives, elles permettent néanmoins de comparer de façon cohérente les scénarios entre eux et d'apporter des éléments de réponses aux interrogations formulées précédemment :

- parmi l'ensemble des scénarios de défaillances relatifs à une configuration d'implantation donnée, par quel(s) composant(s) les coûts et délais de remise en état sont-ils globalement portés ?
- pour chaque configuration d'implantation, quelle est la corrélation entre la longueur des scé-

TABLEAU 5.6 – Valeurs de coûts globaux de remise en état associés vers une équivalence en intervalles dans le modèle d'évaluation coûts-délais

Valeurs obtenues du coût global sous forme de puissances de 10 (valeurs BdD)	Intervalles de coûts correspondants (libellés textuels)
de 0 à 500	↔ 0 à plusieurs centaines d'euros
de 501 à 5 000	↔ de plusieurs centaines à plusieurs milliers d'euros
de 5 001 à 50 000	↔ de plusieurs milliers à plusieurs dizaines de milliers d'euros
de 50 001 à 999 999	↔ de plusieurs dizaines de milliers à plusieurs centaines de milliers d'euros
supérieures à 1 000 000	↔ 1 à plusieurs millions d'euros

narios de défaillances, c'est-à-dire le nombre de composants qu'ils impliquent, et l'importance des coûts et délais de remise en état calculés ?

Ces valeurs de coût global de remise en état sont donc bien à interpréter relativement et ne permettent donc en aucun cas une lecture absolue.

5.2.2.2 Délai d'un scénario de défaillances

Le **délai global ou total** d'un scénario de défaillances est estimé **en prenant le maximum des délais individuels de chaque composant constitutif**. Il est, en effet, considéré que c'est le délai le plus grand parmi ceux de tous les composants impliqués dans le scénario de défaillances qui **major**e le délai global de remise en état. Sommer les délais individuels n'est raisonnablement pas une estimation fiable du délai total étant donné que les reconstructions de composants sur une section d'un système de transport guidé endommagée par une inondation peuvent se faire le plus souvent en parallèle (par exemple, la remise en état de composants de contrôle-commande et signalisation peut se réaliser simultanément à la remise en état de moteur d'appareil de voie, etc.). L'indicateur de maximum semble donc plus opportun qu'un indicateur additionnel.

En parallèle à l'élaboration de la table des coûts individuels, une table est créée au sein de la BdD contenant les délais des composants dans le cas du scénario graduel d'aléa N°2 et N°3. Une succession de requêtes sont ensuite réalisées au sein de la table contenant tous les scénarios de défaillances afin d'associer à chacun des composants inclus leur délai individuel, selon le scénario graduel d'aléa à estimer, puis de prendre le maximum de ces délais pour en déduire le délai total de remise en état de chaque scénario de défaillances (Figure 5.3).

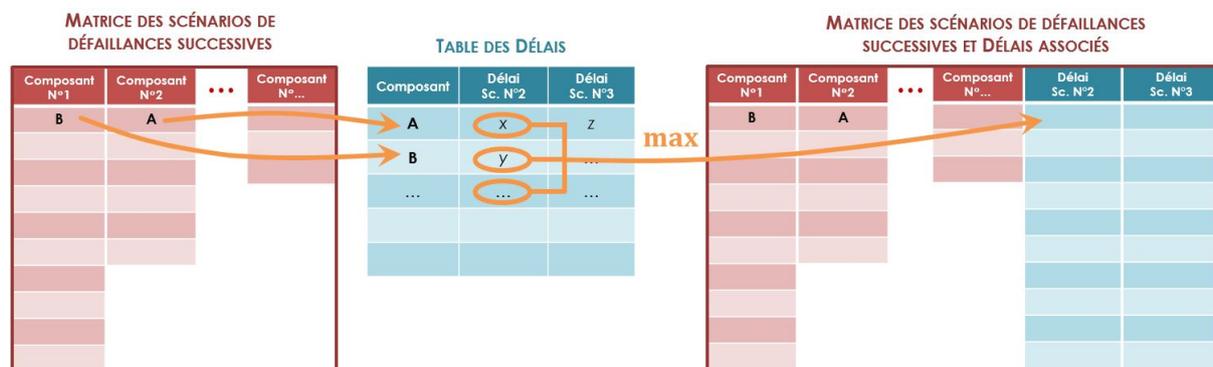


FIGURE 5.3 – Principe d'estimation du délai total d'un scénario de défaillances successives par effet domino réalisée au sein du modèle d'évaluation coûts-délais (source : auteur)

5.2.3 Interface et utilisations du modèle d'évaluation coûts-délais

5.2.3.1 Application aux scénarios de défaillances et analyses statistiques des résultats

Suite à l'implémentation de ces principes de fonctionnement au sein du modèle d'évaluation coûts-délais, il est finalement possible d'estimer les coûts (Figure 5.4) et les délais (Figure 5.5) de remise en état pour chacun des milliers de scénarios obtenus par le modèle d'interdépendances de la configuration d'implantation souterraine, de surface et aérienne.

Par exemple, la Figure 5.4 relative un système de transport en souterrain indique à la première ligne le scénario de défaillances suivant : un endommagement du tunnel (composant I_SS_6) peut impliquer une défaillance des pompes d'épuisement (composant I_SS_7) présentes dans celui-ci qui peuvent entraîner alors l'inondation des espaces d'accès des gares souterraines (composant G_SS_1). En sommant les coûts individuels (sous forme de puissance de 10) de remplacement de ces composants, le coût global pour ce scénario est de 2 100 000 euros. Cette valeur absolue ayant peu de signification réaliste, elle est indiquée sous forme d'intervalle de coût : « de 1 à plusieurs millions d'euros ». Pour ce même scénario, la figure Figure 5.5 indique un délai global de remise en état de « 1 à plusieurs années », si le système est touché par un aléa inondation d'intensité N°3. En effet, le délai de remise en état pour le tunnel est évalué à « 1 à plusieurs années », pour une pompe d'épuisement à « zéro à plusieurs heures » et pour les espaces d'accès des gares à « plusieurs heures à plusieurs jours ». La valeur maximale de ces délais individuels de remise en état étant « 1 à plusieurs années », c'est celle-ci qui majore le délai global de remise en état et qui est donc associée à ce scénario de défaillances.

AuFinal	cout_tot_10puissance	cout_tot_interv
I_SS_6 I_SS_7 G_SS_1	2100000	de 1 à plusieurs millions d'euros
I_SS_6 I_SS_7 G_SS_3	1100100	de 1 à plusieurs millions d'euros
I_SS_7 G_SS_1 G_SS_2	1200000	de 1 à plusieurs millions d'euros
I_SS_7 I_SS_1 G_SS_1	1100100	de 1 à plusieurs millions d'euros
I_SS_7 I_SS_1 G_SS_3	100200	de plusieurs dizaines de milliers d'euros à plusieurs centaines de milliers d'euros
I_SS_7 I_SS_1 I_SS_6	1100100	de 1 à plusieurs millions d'euros
I_SS_7 I_SS_2 G_SS_1	1100100	de 1 à plusieurs millions d'euros
I_SS_7 I_SS_2 G_SS_3	100200	de plusieurs dizaines de milliers d'euros à plusieurs centaines de milliers d'euros
I_SS_7 I_SS_2 I_SS_6	1100100	de 1 à plusieurs millions d'euros
I_SS_7 I_SS_3 G_SS_1	1110000	de 1 à plusieurs millions d'euros
I_SS_7 I_SS_3 G_SS_3	110100	de plusieurs dizaines de milliers d'euros à plusieurs centaines de milliers d'euros
I_SS_7 I_SS_3 I_SS_6	1110000	de 1 à plusieurs millions d'euros
I_SS_7 I_SS_4 G_SS_1	1100100	de 1 à plusieurs millions d'euros
I_SS_7 I_SS_4 G_SS_3	100200	de plusieurs dizaines de milliers d'euros à plusieurs centaines de milliers d'euros
I_SS_7 I_SS_4 I_SS_6	1100100	de 1 à plusieurs millions d'euros

FIGURE 5.4 – Extrait de l'estimation du coût global des scénarios de défaillances exprimé sous forme d'une somme de puissances de 10 puis sous forme d'intervalles, au sein du modèle construit dans une base de données (source : auteur)

Ensuite, des **analyses statistiques** sont effectuées sur les coûts et délais de remise en état des scénarios de défaillances issus du modèle d'évaluation coûts-délais.

5.2.3.1.1. Statistiques sur le nombre de scénarios en fonction du coût total

Une première analyse statistique qu'il est intéressant de réaliser sur l'ensemble des scénarios de défaillances avec le **coût de remise en état** associé consiste à **déterminer leur répartition selon les cinq intervalles de coûts** formulés dans le Tableau 5.6. Le but est d'**identifier les tendances en matière de coût de remise en état que représentent les défaillances engendrées par des effets domino, pour chaque configuration d'implantation**. Autrement dit, les effets domino pour une configuration

AuFinal	MaxDelai_violente
I_SS_6 I_SS_7 G_SS_1	1 à plusieurs années
I_SS_6 I_SS_7 G_SS_3	1 à plusieurs années
I_SS_7 G_SS_1 G_SS_2	qq jours à qq semaines
I_SS_7 I_SS_1 G_SS_1	qq heures à qq jours
I_SS_7 I_SS_1 G_SS_3	qq heures à qq jours
I_SS_7 I_SS_1 I_SS_6	0 à qq heures
I_SS_7 I_SS_2 G_SS_1	qq heures à qq jours
I_SS_7 I_SS_2 G_SS_3	qq heures à qq jours
I_SS_7 I_SS_2 I_SS_6	0 à qq heures
I_SS_7 I_SS_3 G_SS_1	qq heures à qq jours
I_SS_7 I_SS_3 G_SS_3	qq heures à qq jours
I_SS_7 I_SS_3 I_SS_6	0 à qq heures
I_SS_7 I_SS_4 G_SS_1	qq semaines à qq mois
I_SS_7 I_SS_4 G_SS_3	qq semaines à qq mois
I_SS_7 I_SS_4 I_SS_6	qq semaines à qq mois

FIGURE 5.5 – Extrait de l'estimation du délai global (scénario d'aléa graduel N°3) des scénarios de défaillances exprimé sous forme d'intervalles, au sein du modèle construit dans une base de données (source : auteur)

d'implantation donnée impliquent-ils majoritairement des coûts importants (de plusieurs dizaines de milliers à plusieurs centaines de milliers d'euros) de remise en état ? Des coûts faibles (de plusieurs centaines à plusieurs milliers d'euros) de remise en état ?

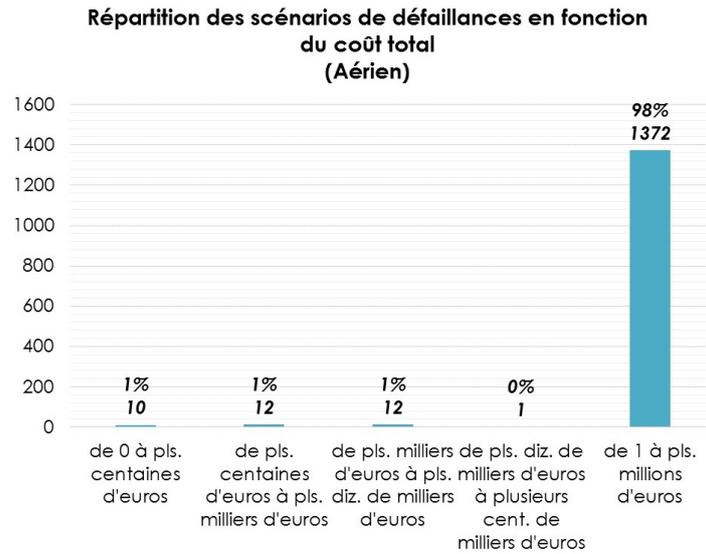
Par exemple, dans le cas des coûts globaux relatifs aux scénarios de défaillances de la configuration aérienne (Figure 5.6a), 1 372 scénarios sur les 1 407 sont estimés avec un coût global de remise en état dans l'intervalle de « 1 à plusieurs millions d'euros », soit une proportion d'environ 98 %.

Plusieurs observations peuvent être faites des résultats de ces analyses statistiques sur le coût total associé à chacun des scénarios de défaillances concernant les trois configurations d'implantation étudiées (Figure 5.6).

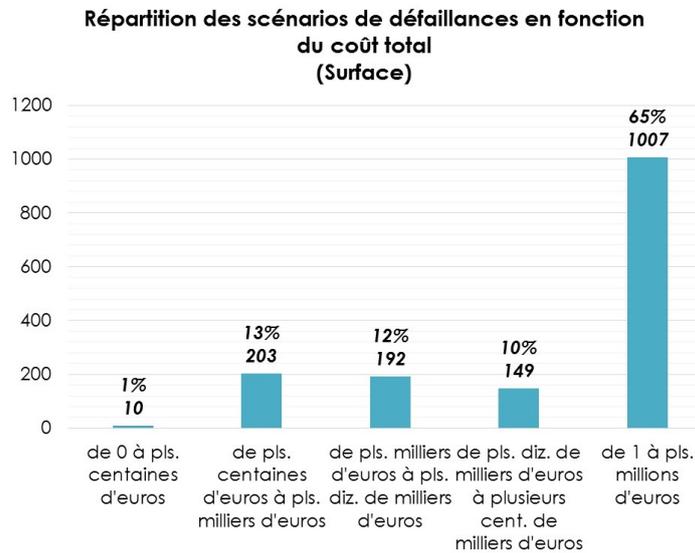
Dans le cas de systèmes de transport guidé positionnés en **souterrain** et en **aérien**, respectivement 96 % et 98 % des scénarios de défaillances atteignent **la catégorie la plus élevée** en matière de coût total, à savoir celle de l'ordre de « 1 à plusieurs millions d'euros ». La configuration d'implantation en **surface** fait apparaître une **répartition plus étendue** avec environ deux tiers des scénarios de l'ordre de « 1 à plusieurs millions d'euros », et, un tiers réparti de façon quasi homogène entre « plusieurs centaines à plusieurs milliers d'euros », « plusieurs milliers à plusieurs dizaines de milliers d'euros » et « plusieurs dizaines de milliers à plusieurs centaines de milliers d'euros ». Il semble donc **qu'en proportion, les potentielles défaillances d'éléments du système provoquées par les mécanismes singuliers que sont les effets domino engendrent des coûts de remise en état globalement plus élevés dans le cas d'une implantation en aérien et en souterrain par rapport à une implantation de surface.**

5.2.3.1.2. Statistiques sur le coût total en fonction du nombre de composants contenus dans les scénarios

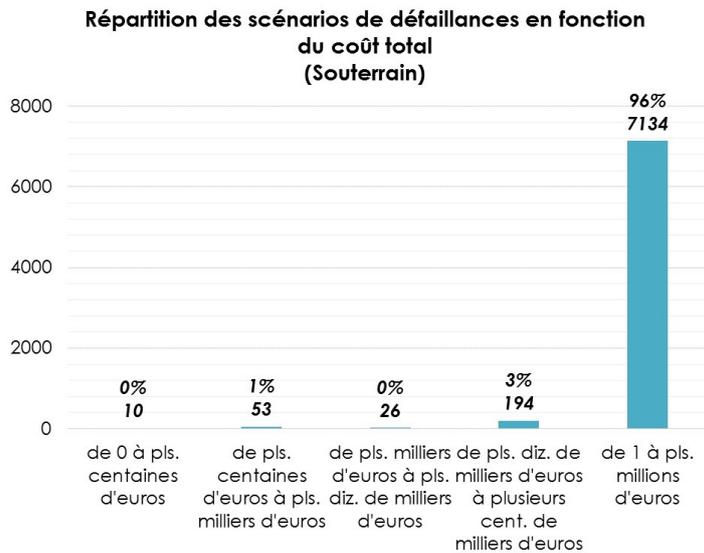
Pour préciser ces statistiques, il est intéressant d'**identifier grâce à une seconde analyse les liens qui peuvent exister entre coût total et nombre de composants impliqués successivement dans les scénarios**. Cette analyse statistique permet ainsi de présenter, sous forme d'histogrammes, pour chaque longueur de scénarios (de 2 à 8 composants) la distribution des coûts totaux parmi les 5 catégories définies. Cette analyse consiste en fait à filtrer les coûts globaux, calculés par somme des coûts indivi-



(a) Cas de la configuration en aérien



(b) Cas de la configuration de surface



(c) Cas de la configuration en souterrain

FIGURE 5.6 – Histogrammes descriptifs du nombre de scénarios en fonction des intervalles définis de coût global pour les scénarios d'aléa graduel N°2 et N°3 (source : auteur)

duels des composants endommagés, avec la valeur du nombre de composants contenus dans chaque scénario.

Les résultats de cette analyse sont présentés en [Figure 5.7](#) pour la configuration d'implantation en surface et sont présentés en [Annexe](#) pour les deux autres configurations ; **le gradient de couleurs des barres d'histogrammes, du plus clair au plus foncé, met en relief la valeur du coût total, de la plus faible à la plus élevée.**

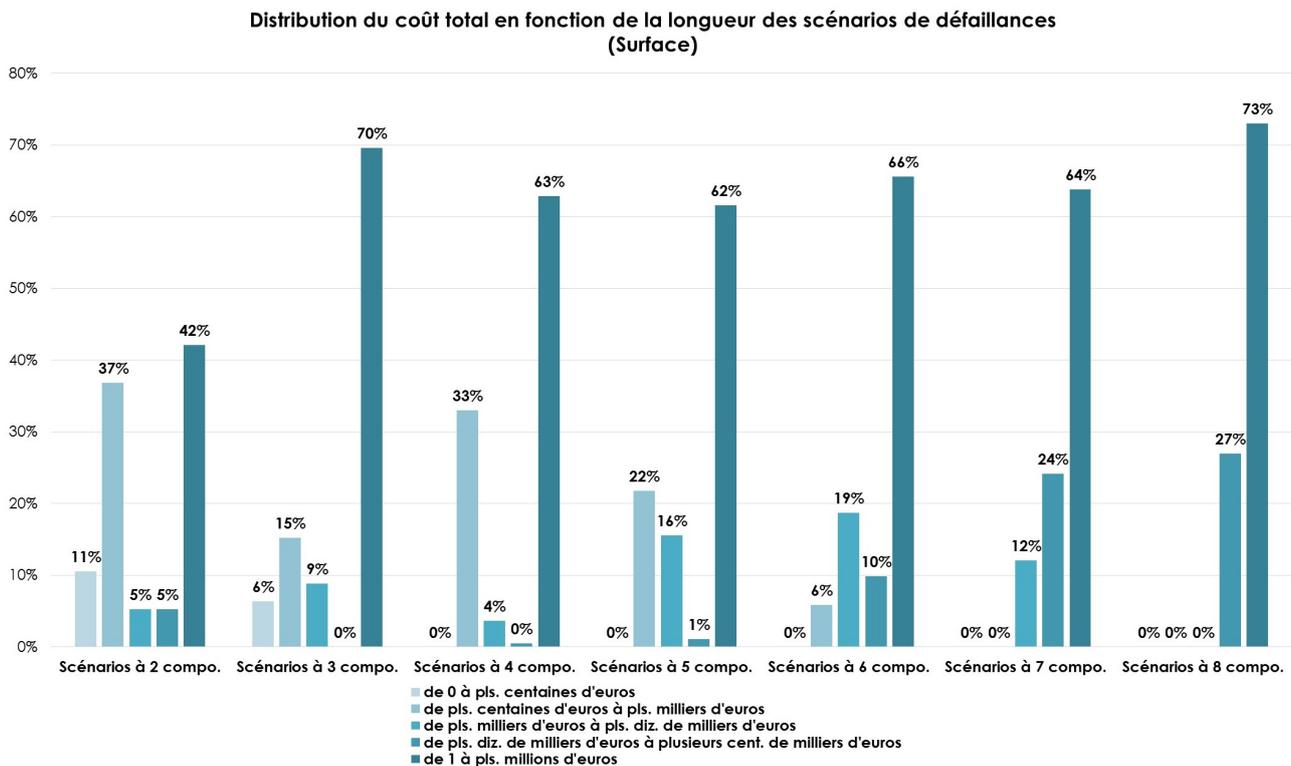


FIGURE 5.7 – Histogramme présentant la distribution du **coût total** parmi les cinq catégories définies en fonction de la **longueur** des scénarios de défaillances relatifs à la configuration d'implantation de **surface** (source : auteur)

Les principaux résultats de ces deux analyses statistiques successives sur l'étude des coûts de remise en état engendrés par un risque inondation sont synthétisés dans le [Tableau 5.7](#) pour les trois configurations d'implantation. Ces analyses valorisent ainsi les éléments de sortie du modèle d'évaluation coûts-délais.

Ces deux analyses mettent en relief les informations suivantes dans une logique comparative des trois configurations d'implantation :

- les coûts deviennent **très importants** dans la configuration en **aérien** à partir de **courts effets domino** comparativement au **souterrain** et à la **surface**. Cette convergence vers la catégorie de coût total la plus élevée est encore plus rapide dans le cas de l'aérien (dès des longueurs de 4 composants) par rapport au cas du souterrain (dès des longueurs de 6 composants) ;
- même pour les scénarios **les plus longs** (constitués de 8 composants) dans la configuration en **surface**, 27 % des scénarios présentent un coût total de « plusieurs dizaines de milliers d'euros à plusieurs centaines de milliers d'euros », en deçà donc de la catégorie de coût total la plus extrême.

Une hypothèse explicative à ces résultats comparatifs peut être avancée. Dès lors que la configura-

tion d'implantation d'un système de transport guidé présente une **structure support** (infrastructure de type tunnel ou superstructure de type viaduc) de l'ensemble des éléments, **les coûts de reconstruction potentiels en cas d'occurrence d'un aléa inondation semblent être plus importants**. Ces structures supports étant des ouvrages d'art de grande ampleur, leur coût de (re)construction sont classiquement élevés : renforcement de piles de ponts ou viaducs, consolidation géotechnique des sols, etc.

Finalement, en ce qui concerne les mécanismes de défaillance par effet domino, ceux-ci n'impliquent pas nécessairement des coûts de remise en état qui croissent démesurément. Si ces types de défaillances présentent un mode de propagation ordinairement accru au vu de l'aspect combinatoire qu'elles impliquent, les coûts qui leur sont associés semblent quant à eux stables.

TABLEAU 5.7 – Synthèse des résultats obtenus pour les trois analyses statistiques des scénarios de défaillances successives relativement au coût total de remise en état, et appliquées aux trois configurations d'implantation étudiées

	Objet	Objectifs	Résultats		
			Aérien	Surface	Souterrain
Analyse n°1	Tous les scénarios de défaillances contenant l'intégralité des composants	Déterminer la répartition des scénarios de défaillances selon le coût total	— 98 % des scénarios de défaillances sont de l'ordre de « 1 à plusieurs millions d'euros »	— 2/3 des scénarios de l'ordre de « 1 à plusieurs millions d'euros » et 1/3 réparti de façon homogène entre « plusieurs centaines à plusieurs milliers d'euros », « plusieurs milliers à plusieurs dizaines de milliers d'euros » et « plusieurs dizaines de milliers à plusieurs centaines de milliers d'euros »	— 96 % des scénarios de défaillances sont de l'ordre de « 1 à plusieurs millions d'euros »
Analyse n°2	Tous les scénarios de défaillances contenant l'intégralité des composants	Déterminer la distribution du coût total selon la longueur des scénarios de défaillances	— pour des longueurs de 2 et 3 composants, plus de la moitié des scénarios ont un coût total de l'ordre de « 1 à plusieurs millions d'euros » — à partir d'une longueur de 4 composants, 100 % des scénarios ont un coût total de l'ordre de « 1 à plusieurs millions d'euros »	— à partir d'une longueur de 3 composants, le coût total est de l'ordre de « 1 à plusieurs millions d'euros » pour une large part des scénarios (entre 62 % et 73 %); — même pour les scénarios les plus longs (à 8 composants), 27 % présente un coût total de « plusieurs dizaines de milliers d'euros à plusieurs centaines de milliers d'euros ».	— pour des longueurs de 2 et 3 composants, environ 60 % des scénarios ont un coût total de l'ordre de « 1 à plusieurs millions d'euros »; — à partir d'une longueur de 5 composants, 95 % des scénarios ont un coût total de l'ordre de « 1 à plusieurs millions d'euros » et cette valeur atteint 100 % pour des longueurs de 7 et 8 composants.

5.2.3.1.3. Statistiques sur le nombre de scénarios en fonction du délai total

De façon similaire aux statistiques sur le coût total des scénarios, des analyses sont réalisées sur le **délai global** issu du modèle d'évaluation coûts-délais pour l'ensemble des scénarios de défaillances.

La première analyse statistique menée consiste à **déterminer la répartition des délais globaux des scénarios de défaillances selon les cinq intervalles de délais** formulés dans le paragraphe 5.2.1.2.2. L'objectif est, là aussi, d'identifier les tendances en matière de délai de remise en état que représentent les défaillances engendrées par des effets domino pour chaque configuration d'implantation. Autrement dit, les effets domino pour une configuration d'implantation donnée impliquent-ils majoritairement des délais importants (de plusieurs semaines à plusieurs mois) de remise en état ? Des délais faibles (de plusieurs heures à plusieurs jours) de remise en état ?

Par exemple, dans le cas des délais globaux relatifs aux scénarios de défaillances de la configuration aérienne (Figure 5.8), 517 scénarios sur les 1 407 sont estimés avec un délai global de remise en état dans l'intervalle de « plusieurs jours à plusieurs semaines » dans le cas d'une inondation d'intensité graduel intermédiaire (N°2), soit une proportion d'environ 37 %.

Plusieurs observations peuvent être faites à partir de ces statistiques sur le délai total, pour un aléa graduel N°2 (un aléa inondation dit *intermédiaire* impliquant du remplacement de composants à l'identique) et un aléa graduel N°3 (un aléa inondation dit *rapide* impliquant de la reconstruction de sous-systèmes à l'identique), associé à chacun des scénarios de défaillances concernant les trois configurations d'implantation étudiées (Figure 5.8).

Premièrement, concernant le scénario d'**aléa graduel N°2**, il est important de mentionner que pour les 3 configurations d'implantation l'absence totale de scénarios présentant un délai global de l'ordre « de plusieurs semaines à plusieurs mois » est logique dans la mesure où aucun composant pris individuellement ne présente ce délai de remise en état. Ce fait est par exemple constaté dans le Tableau 5.4 pour la configuration de surface dans la colonne « Scénario d'aléa graduel N°2 » qui ne contient aucunement le libellé « de plusieurs semaines à plusieurs mois ». De plus, les trois configurations laissent apparaître des **répartitions étendues** sur les catégories de délai total avec en particulier environ 80 % des scénarios de défaillances qui se répartissent de façon quasi égale (2 fois 40 % environ) entre les deux catégories de délais les plus longs à savoir « de plusieurs semaines à plusieurs mois » et « de 1 à plusieurs années » (à l'exception du souterrain où cette valeur atteint 88 %). Par conséquent, cette analyse met en exergue le fait **qu'en proportion, dans le cas d'un aléa inondation de catégorie intermédiaire les potentielles défaillances d'éléments du système provoquées par les mécanismes singuliers que sont les effets domino génèrent des délais de remise en état globalement :**

- **équivalents pour les trois configurations d'implantation ;**
- **compris entre « plusieurs jours à plusieurs semaines » et « 1 à plusieurs années ».**

Deuxièmement, à propos du scénario d'**aléa graduel N°3**, les configurations en **aérien et en surface** font apparaître une **répartition plus large** selon les cinq catégories de délai total définies par rapport à la configuration en **souterrain**. En effet, dans le cas de l'aérien et de la surface, l'analyse montre que 92 % des scénarios de défaillances propres à chacune de ces configurations se répartissent de façon égale (2 fois 45 % environ) entre les deux catégories de délai les plus longues à savoir « de plusieurs semaines à plusieurs mois » et « de 1 à plusieurs années ». En revanche, dans le cas du souterrain, les délais globaux des scénarios se retrouvent pour 80 % des scénarios de défaillances dans la catégorie la plus extrême c'est-à-dire « de 1 à plusieurs années ». Ainsi, cette analyse semble mettre en avant le fait **qu'en proportion, dans le cas d'un aléa inondation de catégorie rapide (ou**

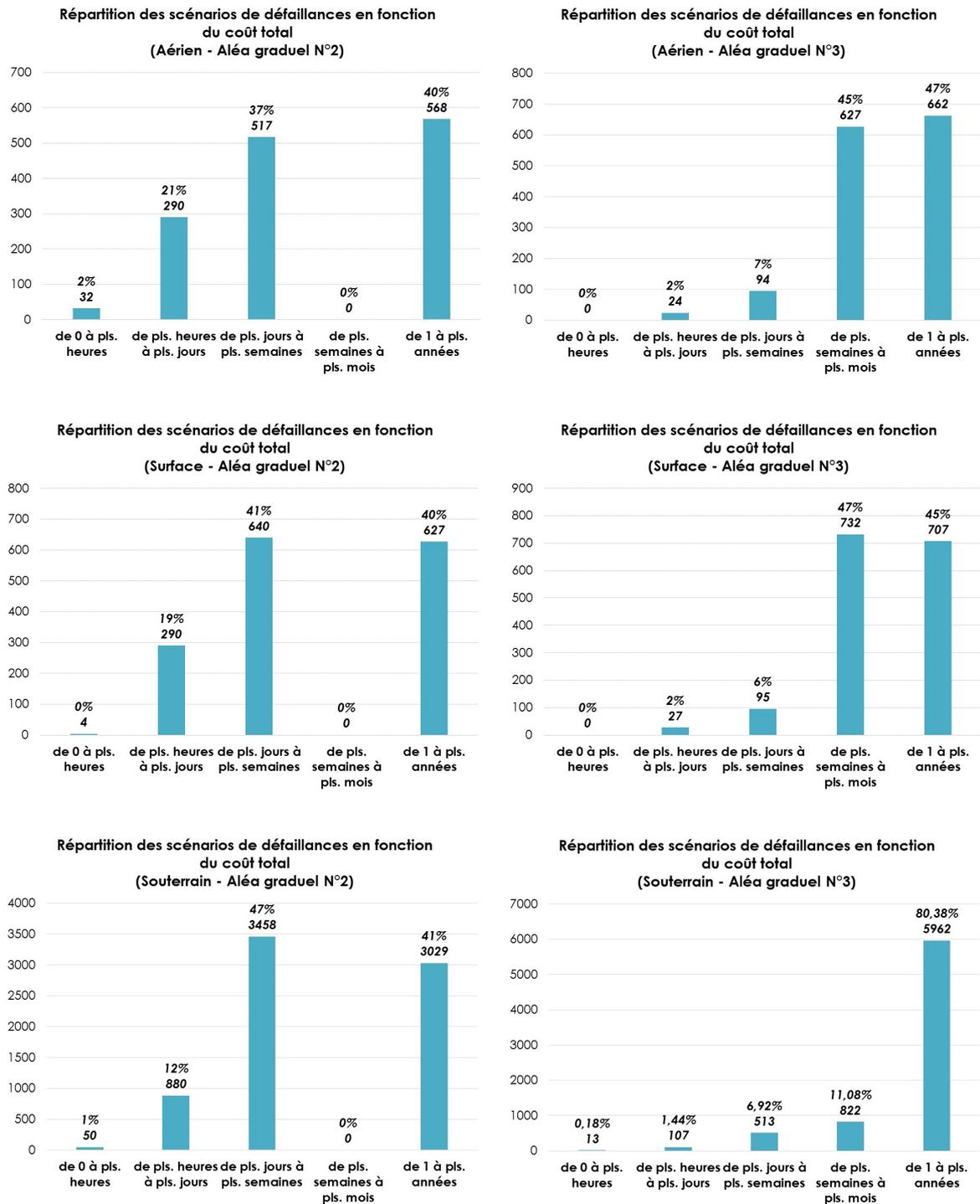


FIGURE 5.8 – Histogrammes descriptifs du nombre de scénarios en fonction des intervalles définis de coût global pour les scénarios d'aléa graduel N°2 et N°3 relatifs à toutes les configurations d'implantation étudiées (source : auteur)

torrentielle) les potentielles défaillances d'éléments du système provoquées par les mécanismes singuliers que sont les effets domino génèrent des délais de remise en état globalement :

- **plus élevés dans le cas d'une implantation en souterrain par rapport à une implantation de surface ou en aérien ;**
- **compris entre « plusieurs semaines à plusieurs mois » et « 1 à plusieurs années ».**

Finalement, **dans le cas d'une inondation de type rapide** c'est-à-dire avec des débits, vitesses d'écoulement des eaux importants et des hauteurs d'eau croissant puis décroissant rapidement, **le souterrain se démarque comme imposant des délais de remise en état en moyenne plus élevés** (facteur quasiment double car 45 % à 47 % des scénarios dans les cas respectifs de la surface et de l'aérien ont un délai de « 1 à plusieurs années » alors que cette valeur atteint 80 % pour le cas du souterrain). En revanche, dans le cas d'une crue intermédiaire c'est-à-dire avec des débits, vitesses d'écoulement des eaux faibles et des hauteurs d'eau croissant puis décroissant lentement, les trois configurations présentent des délais de remise en état semblables.

5.2.3.1.4. Statistiques sur le délai total en fonction du nombre de composants contenus dans les scénarios

Pour approfondir ces analyses statistiques de façon analogue aux statistiques de coût total, il est intéressant grâce à une seconde analyse d'**identifier les liens qui peuvent exister entre délai total et nombre de composants impliqués dans les scénarios**. Cette analyse statistique permet ainsi de présenter, sous forme d'histogrammes, pour chaque longueur de scénarios (de 2 à 8 composants) la distribution des délais totaux parmi les 5 catégories définies. Les résultats de cette analyse sont présentés en [Figure 5.9](#) pour la configuration d'implantation en surface soumise à une inondation rapide (aléa graduel N°3) et sont présentés en [Annexe](#) pour les deux autres configurations soumise à une inondation intermédiaire et rapide (aléa graduel N°2 et 3) ; **le gradient de couleurs des barres d'histogrammes, du plus clair au plus foncé, met en relief la valeur du délai total, de la plus faible à la plus élevée**.

Les principaux résultats de ces deux analyses statistiques successives sur l'étude des délais de remise en état engendrés par un risque inondation sont synthétisés dans le [Tableau 5.8](#) pour les trois configurations d'implantation. Ces analyses permettent ainsi de valoriser les éléments de sortie du modèle d'évaluation coûts-délais.

Ces deux analyses mettent en avant les éléments suivants dans une logique comparative des trois configurations d'implantation :

- dans le cas d'une inondation **intermédiaire** impliquant du **remplacement** de composants à l'identique, **les délais totaux sont très similaires pour les trois configurations** : pour une longueur de 2 à 4 composants, c'est-à-dire pour de courts effets domino, le délai total dominant des scénarios de défaillances est de l'ordre « de plusieurs heures à plusieurs jours » tandis qu'à partir d'une longueur de 5 composants, c'est-à-dire pour des effets domino qui se diffusent fortement au sein du système, le délai total majoritaire est au moins « de l'ordre de plusieurs jours à plusieurs semaines » ;
- dans le cas d'une inondation **rapide** impliquant de la **reconstruction** de sous-systèmes à l'identique, **les délais totaux les plus importants**, de l'ordre de « 1 à plusieurs années », sont obtenus dans le cas du **souterrain** comparativement à la surface et à l'aérien ; cette dominance est telle que même pour de courts effets domino (à partir d'une longueur de 4 composants), près de deux tiers des scénarios sont de l'ordre de « 1 à plusieurs années » de remise en état.

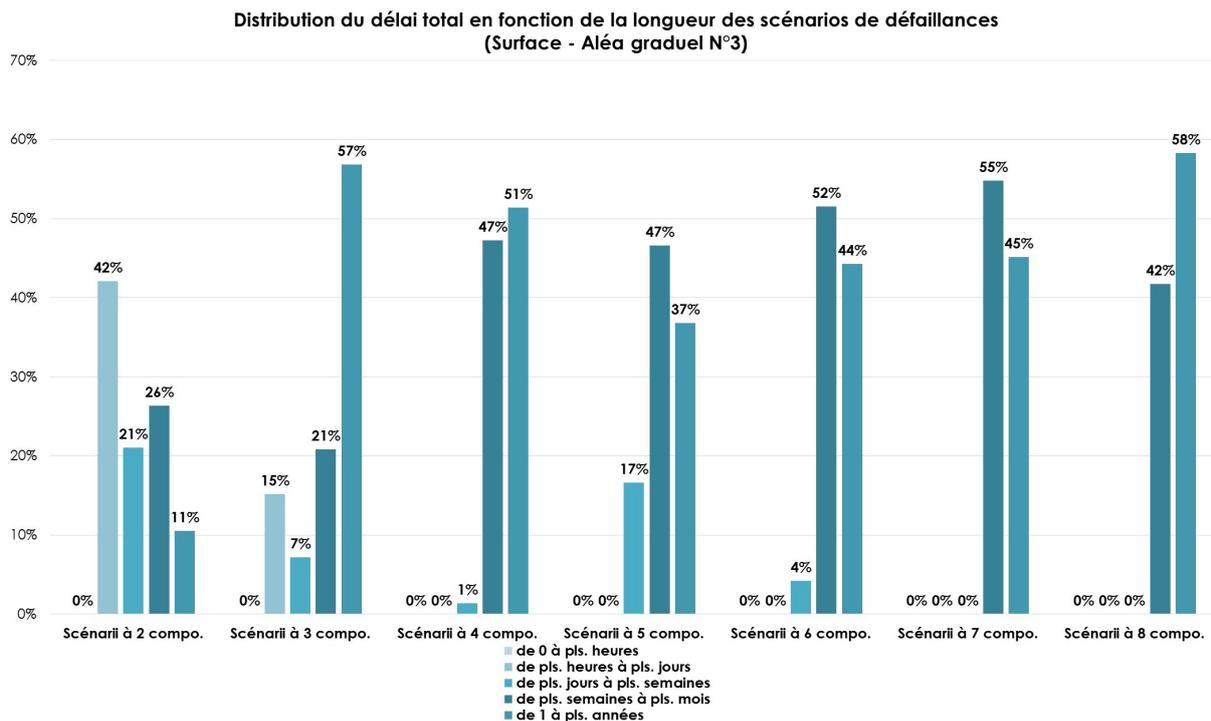


FIGURE 5.9 – Histogramme présentant la distribution du **délai total**, relatif à un scénario d'**aléa graduel N°3**, parmi les cinq catégories définies en fonction de la longueur des scénarios de défaillances relatifs à la configuration d'implantation de **surface** (source : auteur)

Enfin, **si les trois configurations semblent similaires pour des risques d'inondation intermédiaire en ce qui concerne les délais de remise en état** engendrés par les mécanismes de défaillances par effet domino, **la configuration en souterrain apparaît très pénalisante pour des risques d'inondation rapide**. Une hypothèse explicative qui peut être avancée est celle de la **vulnérabilité inhérente du souterrain face au risque inondation et aux difficultés très importantes d'accessibilité** qu'il impose en matière de remise en état de réseaux techniques. Cette majorité de délai total extrême de « 1 à plusieurs années » pour un système implanté en souterrain rejoint donc les chiffres avancés en particulier par la RATP indiquant qu'une remise en état total de son réseau dans le cas d'une crue de la Seine d'intensité identique à celle de 1910 pourrait prendre plusieurs années (OCDE, 2014, p. 57).

5.2.3.2 Application à un système de transport guidé spécifié par l'utilisateur

5.2.3.2.1. Création d'une interface utilisateur d'estimation coûts-délais

Une interface, sous la forme de **formulaire**, a été élaborée afin d'interroger le modèle d'interdépendances et permettre l'affichage des scénarios de défaillances existants selon des composants spécifiques entrés par l'utilisateur (chapitre 4, § 3.1.).

Néanmoins, cette première interface utilisateur contraint d'effectuer des recherches au sein des scénarios de défaillances identifiés par le modèle. Or, il est possible de généraliser cette interface utilisateur selon les deux axes suivants : premièrement, élargir la recherche à des scénarios de défaillances **spécifiés par l'utilisateur** qui entre alors les composants du système qu'il souhaite étudier lorsque ce dernier est soumis à un aléa inondation ; deuxièmement, évaluer les scénarios de défaillances entrés par l'utilisateur selon le coût et le délai de remise en état associés. Le second axe permet en fait d'exploiter la base de données de coûts de composants qui est désormais établie pour l'estimation des coûts globaux de scénarios de défaillances.

TABLEAU 5.8 – Synthèse des résultats obtenus pour les trois analyses statistiques des scénarios de défaillances successives relativement au délai total de remise en état et appliquées aux trois configurations d'implantation étudiées

Objet	Objectifs	Résultats			
		Aérien	Surface	Souterrain	
Analyse n°1 Tous les scénarios de défaillances contenant l'intégralité des composants	Déterminer la répartition des scénarios de défaillances selon le délai total	Scénario d'aléa graduel N°2	— 77 % des scénarios de défaillances se répartissent de façon quasi égale (2 fois 40 % environ) entre les deux catégories de délai les plus longues à savoir «de plusieurs semaines à plusieurs mois» et «de 1 à plusieurs années»	— 81 % des scénarios de défaillances se répartissent de façon quasi égale (2 fois 40 % environ) entre les deux catégories de délai les plus longues à savoir «de plusieurs semaines à plusieurs mois» et «de 1 à plusieurs années»	— 88 % des scénarios de défaillances se répartissent de façon quasi égale (2 fois 45 % environ) entre les deux catégories de délai les plus longues à savoir «de plusieurs semaines à plusieurs mois» et «de 1 à plusieurs années»
		Scénario d'aléa graduel N°3	— 92 % des scénarios de défaillances se répartissent de façon égale (2 fois 45 % environ) entre les deux catégories de délai les plus longues à savoir «de plusieurs semaines à plusieurs mois» et «de 1 à plusieurs années»	— 92 % des scénarios de défaillances se répartissent de façon égale (2 fois 45 % environ) entre les deux catégories de délai les plus longues à savoir «de plusieurs semaines à plusieurs mois» et «de 1 à plusieurs années»	— 80 % des scénarios de défaillances se trouvent dans la catégorie la plus extrême c'est-à-dire «de 1 à plusieurs années»
Analyse n°2 Tous les scénarios de défaillances contenant l'intégralité des composants	Déterminer la distribution du délai total selon la longueur des scénarios de défaillances	Scénario d'aléa graduel N°2	— pour des longueurs inférieures ou égales à 4 composants, les scénarios ont majoritairement un délai total «de plusieurs heures à plusieurs jours» — à partir d'une longueur de 5 composants, plus de 86 % des scénarios ont un délai total supérieur ou égal à «plusieurs jours à plusieurs semaines»	— pour des longueurs inférieures ou égales à 4 composants, les scénarios ont majoritairement un délai total «de plusieurs heures à plusieurs jours» — à partir d'une longueur de 5 composants, plus de 78 % des scénarios ont un délai total supérieur ou égal à «plusieurs jours à plusieurs semaines»	— pour des longueurs inférieures ou égales à 4 composants, les scénarios ont majoritairement un délai total «de plusieurs heures à plusieurs jours» — à partir d'une longueur de 6 composants, plus de 88 % des scénarios ont un délai total supérieur ou égal à «plusieurs jours à plusieurs semaines»
		Scénario d'aléa graduel N°3	— pour des longueurs à partir de 6 composants, plus de la moitié des scénarios ont un délai total de «1 à plusieurs années» et cette valeur atteint 58 % pour une longueur de 8 composants	— pour des longueurs à partir de 3 composants, la proportion de scénarios ayant un délai total de «1 à plusieurs années» oscille entre 38 % et 58 % (valeur atteinte pour la longueur maximale de 8 composants)	— pour des longueurs à partir de 4 composants, plus de 2/3 des scénarios ont un délai total de «1 à plusieurs années» et cette valeur atteint 93 % pour une longueur de 8 composants

Il apparaît d'ores et déjà la double utilisation possible d'une telle interface :

- soit de façon **prévisionnelle**, c'est-à-dire que l'utilisateur indique les composants d'un système de transport qu'il souhaite étudier afin d'avoir une estimation du coût et du délai de reconstruction qu'impliquerait l'occurrence d'une inondation ;
- soit de façon **diagnostique**, c'est-à-dire que l'utilisateur indique les composants d'un système de transport ayant été impacté par une inondation connue et passée afin de vérifier si le coût et le délai de reconstruction estimés sont cohérents avec le coût et le délai réels de reconstruction ;

L'usage prévisionnel est en fait celui réalisé précédemment lorsqu'il s'agissait de prévoir le coût et le délai de remise en état d'un scénario de défaillances grâce au modèle d'évaluation coûts-délais. Cette prévision est possible pour les trois scénarios d'aléas graduels définis dans cette recherche.

En ce qui concerne l'usage diagnostique et dans le cas d'un scénario d'aléa graduel correspondant à une inondation lente (scénario graduel N°1), l'interface utilisateur permet (Figure 5.10) :

- de sélectionner, en qualité, les équipes de maintenance requises pour le nettoyage et le contrôle des éléments ;
- d'indiquer, en quantité, le nombre d'agents de maintenance à mobiliser au sein de ces équipes et le nombre d'heures de travail ;
- le coût horaire moyen relatif à ces agents de maintenance ;
- le nombre de kilomètres impactés par l'inondation ;
- pour, enfin, en déduire une estimation du coût total et du délai total de remise en état.

Sc1. Nettoyage et contrôle **Calculer**

5	Longueur de section concernée (km)	
4	Agents « maintenance VOIE » pendant	3 heures par KM de voie.
4	Agents « maintenance SIG » pendant	3 heures par KM de voie.
0	Agents « maintenance LAC » pendant	0 heures par KM de voie.
0	item à entrer	0 heures par KM de voie.
0	item à entrer	0 heures par KM de voie.
0	item à entrer	0 heures par KM de voie.
	Management des équipes pendant	10 heures par KM de voie.
	Coût horaire	100 euros.

Par km de voie	Pour la section
34 heures de travail.	170 heures de travail.
3 400 euros.	17 000 euros.

FIGURE 5.10 – Aperçu de l'interface permettant l'estimation du coût et du délai de remise en état d'un système de transport guidé implanté en surface soumis à une inondation lente (scénario graduel N°1) (source : auteur)

En ce qui concerne l'usage diagnostique et dans le cas d'un scénario d'aléa graduel correspondant à une inondation intermédiaire (scénario graduel N°2) à rapide (scénario graduel N°3), l'interface

utilisateur permet :

- de sélectionner, en qualité, les composants constitutifs du système étudié ;
- d'indiquer, en quantité, le nombre de ces composants constitutifs : nombre de kilomètres de rails, nombre d'appareils de voies, etc. Cette valeur peut donc être unitaire (pour les composants ponctuels) ou linéaire (pour les composants linéaires) ;
- pour, enfin, en déduire une estimation du coût total et du délai total de remise en état.

Sc2. et Sc3. Remplacement de composants à l'identique							
NumCompo	TextCompo	Nbre	Coût unitaire	Unité	Coût total	Délai Douce	DélaiViolente
I_S_1	rails	3	100 €	€/ml	300 €	0 à qq heures	0 à qq heures
I_S_6	ouvrage hydraulique	1	1 000 €	€/pi	1 000 €	0 à qq heures	0 à qq heures
I_S_4	ballast	3	100 €	€/ml	300 €	qq heures à qq jours	qq semaines à qq mois
				€/ml		0 à qq heures	0 à qq heures

Coût total : 1 600,00 €
(de plusieurs centaines d'euros à plusieurs milliers d'euros)

Délai Sc2. (inond. lente-rapide) : qq heures à qq jours
Délai Sc3. (inond. rapide) : qq semaines à qq mois

FIGURE 5.11 – Aperçu de l'interface permettant l'estimation du coût et du délai de remise en état d'un système de transport guidé implanté en surface soumis à une inondation intermédiaire ou rapide (scénario graduel N°2 et N°3) (source : auteur)

Il est important de rappeler que les valeurs générées par le modèle en matière de coût de remise en état n'ont pas de réalité dans l'absolu : ces coûts qui semblent être calculés à l'euro près sont plutôt à **interpréter en matière d'intervalles pour donner une estimation du montant de la remise en état plus qu'une valeur exacte de celle-ci.**

Pour démontrer l'intérêt et la portée opérationnelle d'une telle interface comme outil prévisionnel et de diagnostic, des cas d'application d'inondations passées sont présentés.

5.2.3.2.2. Inondation du métro de Prague, 2002 : cas d'un système souterrain soumis à une inondation rapide

Le cas de l'inondation du métro de Prague, détaillé dans le [chapitre 2](#) (§ 2.1.) est un exemple intéressant d'application de l'interface utilisateur d'estimation du coût et délai de remise en état d'un système de transport guidé positionné en souterrain et soumis à un risque inondation impliquant le remplacement à l'identique de composants voire de sous-système ([GONZVA et al., 2016c](#)). L'estimation est donc réalisée pour un scénario d'aléa graduel N°2 (remplacement à l'identique de composants) voire N°3 (reconstruction de sous-systèmes en entier).

Bien que l'intégrité physique des structures souterraines (tunnels) et des espaces souterrains (gares) n'ait pas été atteinte lors de cette inondation, de nombreux composants du système ont été fortement endommagés. Quantitativement, les éléments endommagés peuvent être synthétisés comme suit à partir de données réelles issues de retours d'expériences ([JAKOUBEK, 2007](#); [CHAMRA, 2006](#); [DIREN ILE-DE-FRANCE, 2002](#)) et d'hypothèses faites :

- 19 gares souterraines et 17,3 km de voies inondées ;
- des **hypothèses** sont faites sur les composants linéaires suivants considérés comme défaillants : câbles de signalisation (environ 10 câbles sur 17,3 km), quelques câbles en gare (environ 5 km de câbles par gare), troisième rail (deux fois 17,3 km) ;
- des **hypothèses** sont faites sur les composants ponctuels suivants considérés comme défaillants : une dizaine d'électromécanismes (ascenseurs, escaliers mécaniques, etc.) par gare (environ 20), plusieurs dizaines de mécanismes d'appareils de voie au sein du système global (environ 30), quelques quais par station (environ 2), plusieurs détecteurs et balises de signalisation au sol au sein du système global (environ 50) ;
- des **hypothèses** sont faites sur les composants considérés comme non endommagés : les rails, les traverses, les appareils de voie, la dalle ferroviaire, les tunnels, les postes de commandement et les sites de maintenance.

Sur la base de ces données entrées *via* l'interface utilisateur, une estimation coût et délai est ainsi obtenue ([Figure 5.12](#)). Le coût de remise en état est évalué à environ 240 millions d'euros grâce à la base de données de coûts c'est-à-dire **de l'ordre de 1 à plusieurs millions d'euros** donc, et le délai est estimé entre **plusieurs jours à plusieurs semaines**. Ces résultats apparaissent cohérents avec les coûts et délais réels de l'inondation du métro de Prague évalués à environ 7 milliards de CZK (couronnes tchèques) en 2002 soit environ 260 millions d'euros et ayant interrompu le système pendant plusieurs mois ([CHAMRA, 2006](#)). L'estimation semble **plus optimiste** en indiquant tout au plus plusieurs semaines d'interruption nécessaire à la remise en état ; cependant, **ce délai théorique estimé s'accorde bien avec la valeur réelle** en état dans des ordres de grandeurs identiques.

5.2.3.2.3. Inondation de la ligne La Rochelle-Rochefort suite à la tempête Xynthia, 2010 : cas d'un système en surface soumis à une inondation rapide

La tempête Xynthia frappe plusieurs pays européens en 2010 et affecte la France durant la nuit du 27 au 28 février et une partie de la journée du 28. Parmi les conséquences du passage de cette tempête et des inondations engendrées, la ligne SNCF La Rochelle-Rochefort (double voie non électrifiée) qui longe le littoral est fermée à la circulation le 28 février 2010. Les dégâts sur les voies sont importants avec des désordres répartis de façon très hétérogène sur plus de 3 km. Ces désordres sont caractérisés par des brèches du remblai, des érosions de remblai et de l'emportement de ballast ([Figure 5.13a](#) et

Composants du scénario								
NumCompo	NomCompo	Nbre	Coût unitaire	Coût total	Unité	Sc. 2 Medium flood	Sc. 3 Major flood	
CCS_SS_2	Composants de CCS « sol » : câbles	95000	1,00E+03	9,50E+07	€/ml	qq jours à qq semaines	qq jours à qq semaines	
CCS_SS_3	Composants de CCS « sol » : détecteurs	50	1,00E+03	5,00E+04	€/pi	qq heures à qq jours	qq heures à qq jours	
CCS_SS_4	Composants de CCS « sol » : mécanisme d'ADV	30	1,00E+02	3,00E+03	€/ml	qq jours à qq semaines	qq jours à qq semaines	
En_SS_2	3eme rail	34600	1,00E+03	3,46E+07	€/ml	0 à qq heures	0 à qq heures	
G_SS_1	espaces d'accès	19	1,00E+06	1,90E+07	€/pi	qq heures à qq jours	qq heures à qq jours	
G_SS_2	electromecanismes	380	1,00E+05	3,80E+07	€/pi	qq jours à qq semaines	qq jours à qq semaines	
G_SS_3	câbles en gare	570000	1,00E+02	5,70E+07	€/ml	qq heures à qq jours	qq heures à qq jours	
I_SS_5	quais	38	1,00E+04	3,80E+05	€/pi	qq jours à qq semaines	qq jours à qq semaines	
Coût total :		244 033 000,00 €						
		(de 1 à plusieurs millions d'euros)						
Délai Sc.2 :		qq jours à qq semaines						
Délai Sc.3 :		qq jours à qq semaines						

FIGURE 5.12 – Estimation théorique à partir de la base de données de coûts et de délais de la remise en état relative au métro de Prague suite à son inondation en 2002 (source : auteur)

Figure 5.13b) ¹.

Les travaux de remise en état débutent le 12 mars. Parmi ces travaux :

- dépose de 3050 mètres de voies ferrées ;
- enlèvement du ballast et reprise de la plateforme au niveau des structures d'assises (sous le ballast) ;
- comblement des brèches au niveau du remblai ferroviaire.

Au total, environ 30 000 m³ de matériaux sont mis en œuvre. Les travaux prennent fin le 5 avril 2010. Des essais sont effectués avec du matériel roulant pour vérifier la stabilité et le bon fonctionnement de l'ensemble du système. Les circulations reprennent à vitesse réduite (70 km/h) le 23 avril 2010.

Sur la base de ces données entrées *via* l'interface utilisateur, une estimation coût et délai est alors obtenue (Figure 5.14) pour cet incident (voies non électrifiées) sur la base des éléments endommagés et des hypothèses estimatives suivants :

- ballast (linéaire de 3 km) ;
- remblai ferroviaire (linéaire de 3 km) ;
- câbles de signalisation (quelques câbles sur un linéaire de 3 km).

Le coût de remise en état est évalué à environ 4,5 millions d'euros grâce à la base de données de coûts c'est-à-dire de l'ordre **de 1 à plusieurs millions d'euros** donc, et le délai est estimé entre **plusieurs semaines à plusieurs mois** (cas d'une inondation rapide). Ces résultats apparaissent **cohérents**, d'une part, avec les coûts (eux-mêmes largement estimés seulement 1 mois après l'incident) à environ 3,5

1. Les données utilisées dans ce paragraphe sont issues des fructueux échanges réalisés avec Monsieur Vincent Talfumière, adjoint au chef du département Lignes Voie Environnement (LVE), au sein de la direction Ingénierie & Projets de SNCF Réseau.



(a) Dégâts sur la ligne SNCF La Rochelle-Rochefort suite à la tempête Xynthia
 (b) Emportement du ballast et du remblai ferroviaire sur la ligne SNCF La Rochelle-Rochefort suite à la tempête Xynthia

FIGURE 5.13 – Tempête Xynthia, en 2010, et conséquences sur les systèmes de transport (source : SNCF)

millions d'euros par la mission d'évaluation des dommages liés à la tempête Xynthia². D'autre part, le délai de remise en état estimé par le modèle est également **cohérent** en annonçant un temps de l'ordre de plusieurs semaines à plusieurs mois dans la mesure où la ligne a de nouveau fonctionné après environ 7 semaines d'interruption.

Sc2. et Sc3. Remplacement de composants à l'identique							
NumCompo	TextCompo	Nbre	Coût unitaire	Unité	Coût total	Délai Douce	DélaiViolente
I_S_4	ballast	3000	100 €	€/ml	300 000 €	qq heures à qq jours	qq semaines à qq mois
I_S_8	plateforme	3000	1 000 €	€/ml	3 000 000 €	qq heures à qq jours	qq semaines à qq mois
CCS_S_4	Composants de CCS sol cables	12000	100 €	€/ml	1 200 000 €	qq jours à qq semaines	qq jours à qq semaines
				€/ml		0 à qq heures	0 à qq heures
Coût total :		4 500 000,00 € (de 1 à plusieurs millions d'euros)					
Délai Sc2. (inond. lente-rapide) :		qq jours à qq semaines					
Délai Sc3. (inond. rapide) :		qq semaines à qq mois					

FIGURE 5.14 – Estimation théorique à partir de la base de données de coûts et de délais de la remise en état de ligne SNCF La Rochelle-Rochefort suite à la tempête Xynthia en 2010 (source : auteur)

5.2.4 Vers une aide à l'élaboration de stratégies de conception, d'exploitation et de maintenance des systèmes de transport guidé

La démarche de caractérisation de la vulnérabilité d'un système de transport guidé face au risque inondation et pour les trois configurations d'implantation traditionnelle s'est conclue, dans le cha-

2. CGEDD, IGA, IGF, CGAAER (2010). *Rapport sur l'évaluation des dommages causés par la tempête Xynthia des 27 et 28 février 2010 à prendre en compte au titre du Fonds de Solidarité de l'Union Européenne*. Juin. <http://www.ladocumentationfrancaise.fr/var/storage/rapports-publics/104000480.pdf>

Figure 4, par l'identification de profils comportementaux de composants. Ces profils correspondent à un **comportement émergent relatif aux défaillances par effet domino des éléments** du système lorsque celui-ci subit une inondation. Ces profils spécifient le comportement que chaque composant présente en situation de crise, c'est-à-dire lors de l'occurrence d'une inondation : est-il principalement initiateur de chaînes de défaillances par effet domino c'est-à-dire agressif à l'égard des autres éléments au sein du système ? Est-il majoritairement à la conclusion de chaînes de défaillances par effet domino c'est-à-dire sensible vis-à-vis des autres éléments au sein du système ? Ou est-il essentiellement propagateur de chaînes de défaillances par effet domino c'est-à-dire avec un rôle de diffusion des défaillances d'un composant vers un autre composant ?

Ces profils comportementaux d'éléments soumis au risque inondation composent une modélisation qualitative du système de transport guidé. Ils sont issus des résultats du modèle d'interdépendances développé. Ce modèle a été complété dans une logique cette fois quantitative de caractérisation de la vulnérabilité par une estimation des coûts et des délais de remise en état. Ce modèle d'estimation coûts-délais a conduit à l'élaboration d'une base de données relative à la reconstruction. Les **coûts et délais de remise en état sont donc mobilisés comme des indicateurs de vulnérabilité** mais tendent aussi vers **un usage d'indicateurs de résilience**.

Ces profils comportementaux et coûts et délais de remise en état peuvent en effet servir à, d'une part, définir des **stratégies opérationnelles** d'amélioration de la résilience des systèmes de transport guidé quelle que soit leur configuration d'implantation et à, d'autre part, **évaluer l'apport de ces stratégies** par rapport à la situation sans leur mise en place. Ils marquent ainsi le passage de la démarche de caractérisation de la vulnérabilité d'un système de transport guidé face au risque inondation vers la démarche d'amélioration de la résilience.

5.2.4.1 Exploitation des profils comportementaux

Les profils comportementaux sont mis en avant dans leur potentiel rôle pour de l'aide à la réflexion en matière de conception, d'exploitation et de maintenance. Ces éléments de comportements fournis par le modèle d'interdépendances représentent une information nouvelle et pertinente pour les gestionnaires et exploitants de systèmes de transport (GONZVA *et al.*, 2016f).

Premièrement, une stratégie possible **dans la conception** peut consister en la **protection des composants agressifs**. L'objectif vis-à-vis de ces composants est d'opter pour une stratégie de fiabilisation renforcée au vu de leur rôle d'initiateur de chaînes de défaillances par effet domino, c'est-à-dire agressif à l'égard des autres composants du système. Cette fiabilisation peut passer par des mesures de surélévation ou de cloisonnement telles qu'elles permettent de minimiser l'atteinte de ces éléments agressifs par une inondation.

Une telle politique de protection renforcée est appliquée dans le cas du métro de Copenhague au Danemark, constitué à ce jour de deux lignes de métro sur une longueur d'environ 21 km et comptant 22 stations dont 9 souterraines. Pour réduire le risque d'inondation par montée des eaux ou par fortes pluies, cet aléa est en effet intégré dans les critères de conception de la première ligne de métro entre 1993 et 1995 et ont été révisés pour la conception des nouvelles lignes actuellement en construction (EEA, 2014, p. 40). La limite supérieure des escaliers d'accès aux stations en souterrain, des sorties de secours, des accès pompiers et des ouvrages de ventilation est fixée pour les futures lignes de métro à 2,20 m (ou plus) au-dessus du niveau normal de la mer entourant la ville. Cette limite atteint même 2,42 m au niveau des bouches d'accès aux stations (COWI, 2009). Pour les stations souterraines du

réseau existant, une marche supplémentaire est ajoutée (Figure 5.15a) ; pour certains espaces techniques, les seuils de portes bénéficient également d'une surélévation de 30 cm (SØRENSEN, 2015). Enfin, des portes anti-inondation sont mises en place dans trois stations souterraines existantes afin de prévenir la propagation des eaux au niveau des espaces souterrains connectés à ces stations permettant alors un cloisonnement de ces dernières (Figure 5.15b). Toutes ces mesures concourent à faire du métro de Copenhague un système, semble-t-il, protégé pour des inondations de période de retour égale à 2 000 ans (HOLSE, 2014).

Ainsi, les composants agressifs d'un système positionné en souterrain tels que, majoritairement, les espaces d'accès faisant liaison entre surface et souterrain et les tunnels profitent d'une protection accrue par surélévation ou isolement par rapport aux autres éléments du système.



(a) Marche supplémentaire à la station *Kongens Nytorv*



(b) Porte anti-inondation aux stations *Frederiksberg, Nørreport et Kongens Nytorv*

FIGURE 5.15 – Protection des composants ferroviaires : cas du métro de Copenhague (SØRENSEN, 2015)

En plus de mesures de surélévation ou de cloisonnement, les composants agressifs peuvent faire l'objet d'un doublement voire d'un triplement de sorte que lorsque le composant est défaillant suite à une inondation, les doublons mis en place permettent de maintenir la fonction et d'éviter l'initiation d'une chaîne de défaillances indirectes par effet domino. Ces mesures de doublement de composants sont d'ailleurs usuellement appliquées sur les réseaux ferrés sans considération du risque inondation. En effet, concernant le réseau de télécommunications nécessaire à la gestion de la circulation des trains, à la distribution en énergie électrique des lignes ainsi qu'à toute transmission d'informations, la notion de **redondance** et de **maillage** du réseau est importante. Voilà pourquoi des éléments sont doublés afin de respecter les exigences de sécurité et d'éviter des perturbations intempestives de l'exploitation. Cette démarche pourrait donc tout à fait être menée identiquement afin de convenir aux exigences de fiabilité relatives à la protection face au risque inondation.

Deuxièmement, une stratégie **dans le cadre de l'exploitation** peut consister à assurer un **suivi accru de l'état des composants au profil propageur** pour prévenir leur dysfonctionnement en cas d'occurrence d'une inondation. L'instrumentation des ouvrages hydrauliques par exemple en tant que composant majoritairement diffuseur en configuration d'implantation de surface afin de contrôler les éventuels phénomènes de débordement des eaux, ou encore l'instrumentation des tunnels en tant que composant majoritairement diffuseur en configuration d'implantation souterraine afin de contrôler les hauteurs d'eau, sont des stratégies usuellement mises en place sur les réseaux ferrés internationaux. Une stratégie de cloisonnement de sections d'un réseau de transport souterrain est également souvent mise en avant pour lutter contre le risque inondation (BACOT *et al.*, 2015, p. 44). Si

ce cloisonnement peut être réalisé par des portes anti-inondation permanentes, des dispositifs temporaires sont également envisageables. Le *tunnel plug* (ou obturateur de tunnel) développé après l'ouragan Sandy en 2012 aux Etats-Unis est un exemple de tel dispositif.

Après le passage de l'ouragan dont les dégâts sont considérables sur le réseau métropolitain avec 8 stations et 14 tunnels inondés pour un coût estimé à 5 milliards de dollars (HCFDC, 2013, p. 54), des mesures de cloisonnement des sections du réseau sont envisagées pour limiter la propagation des eaux. Le *tunnel plug* est un système gonflable en une trentaine de minutes qui s'insère dans les espaces souterrains, en particulier les tunnels et potentiellement les bouches d'accès de surface (CAMPBELL-DOLLAGHAN, 2013) (Figure 5.16a). Bien que prototypé et testé en grandeur nature avec succès, le *Metropolitan Transportation Authority of the State of New York* (MTA) n'a jamais utilisé ce dispositif dans le cas d'une inondation réelle (Figure 5.16b). D'autres systèmes gonflables mis en place temporairement existent également pour limiter l'entrée et la propagation des eaux au sein de systèmes souterrains mais leur efficacité reste limitée (Figure 5.16c).

Enfin, une autre stratégie envisageable, **pour la maintenance**, peut être celle de considérer **les composants sensibles comme ayant une durée de vie particulièrement limitée et devant donc faire l'objet d'un remplacement plus fréquent** que les autres éléments du système. Cette stratégie trouve bien sûr sa pertinence dans le cas de composants sensibles présentant de faible coût individuel de remise en état. Une autre mesure pour les composants sensibles peut être celle de leur **dissociation en composants élémentaires afin d'atténuer le risque de défaillance générale**.

Ainsi, l'élaboration de modèles décrivant les mécanismes internes de propagation des effets domino sont primordiaux pour la gestion des risques car ils permettent non seulement d'améliorer la connaissance scientifique des catastrophes en remplaçant celle-ci dans leur complexité mais aussi de produire une information nouvelle apportant une aide pour la prise de décision (PROVITOLLO, 2005). Ces modèles théoriques ont donc naturellement une portée opérationnelle pour la conception de systèmes urbains plus résilients face aux risques naturels.

5.2.4.2 Exploitation des indicateurs de coûts et de délais de remise en état

Les coûts et les délais de remise en état constituent, tout comme les profils comportementaux, un atout pour de l'aide à la réflexion en matière de conception, d'exploitation et de maintenance de systèmes de transport guidé.

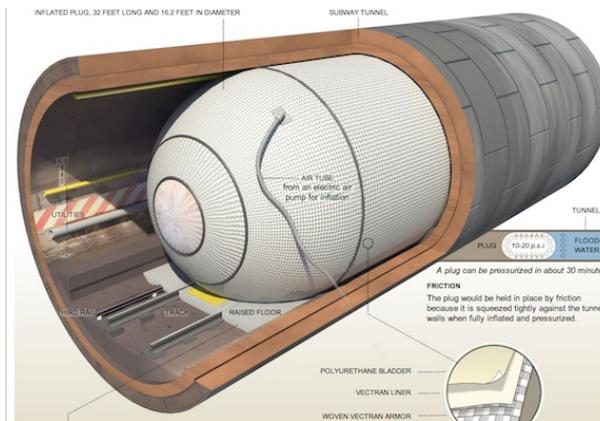
Ces indicateurs peuvent être utiles pour évaluer certaines mesures d'amélioration de la fiabilité de composants et, à plus large échelle, d'amélioration de la résilience du système face au risque inondation.

Les mesures qui consistent à fiabiliser des composants aux profils **agressifs** en situation de crise afin de minimiser de possibles défaillances successives par effet domino peuvent être évaluées en matière d'analyse coût/bénéfice : quel coût représente la fiabilisation d'un composant agressif face à un aléa inondation par rapport au coût que représente sa remise en état et celle de l'ensemble des composants défaillants successivement? (Figure 5.17) Fiabiliser les composants agressifs apparaît également plus pertinent si le coût total de remise en état est porté par ceux-ci.

Dans une situation différente, un ensemble de mesures distinctes qui consistent à fiabiliser les composants sensibles peuvent aussi être évaluées en matière d'analyse coût/bénéfice : quel coût représente une stratégie A de fiabilisation d'un composant sensible face à une inondation par rapport à



(a) « Tunnel plug » en phase de gonflage (CAMPBELL-DOLLAGHAN, 2013)



(b) « Tunnel plug » schématisé (CAMPBELL-DOLLAGHAN, 2013)



(c) Boudin gonflable utilisé au niveau du métro de New-York durant l'ouragan Sandy en 2012 (source : MTA)

FIGURE 5.16 – Stratégies de cloisonnement de section d'un réseau de transport souterrain : cas du métro de New-York

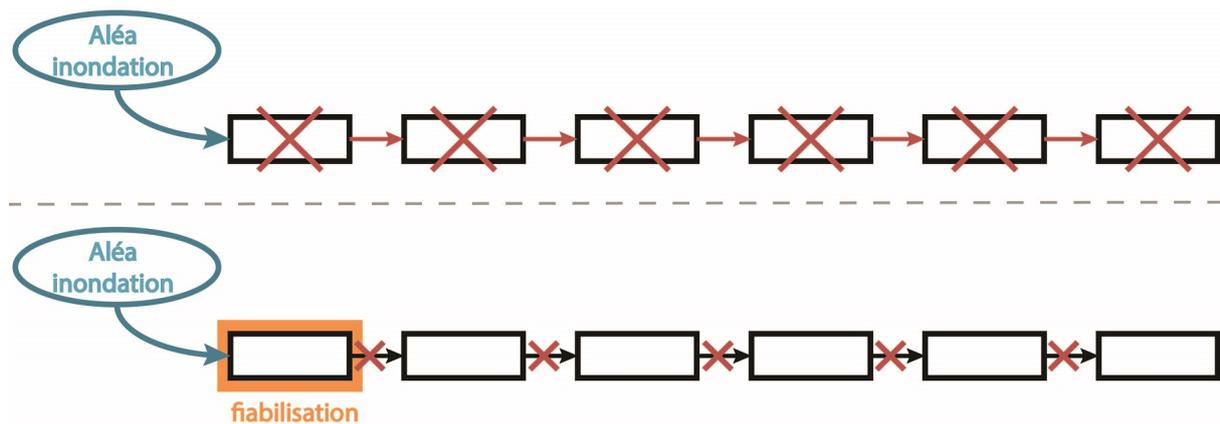


FIGURE 5.17 – Comparaison coût/bénéfice entre une situation d'occurrence d'un scénario de défaillances successives par effet domino par rapport à une situation de fiabilisation d'un composant agressif prévenant l'occurrence d'effets domino (source : auteur)

une stratégie B de fiabilisation d'un autre composant ? (Figure 5.18) La fiabilisation vise alors les composants les plus en amont dans les scénarios de défaillances mais selon leur coût de remise en état ; autrement dit, il est plus pertinent de préférer une solution peu chère de fiabilisation d'un composant diffuseur au coût individuel élevé de remise en état (stratégie B) plutôt qu'une fiabilisation très chère d'un composant initiateur au coût individuel faible de remise en état (stratégie A).

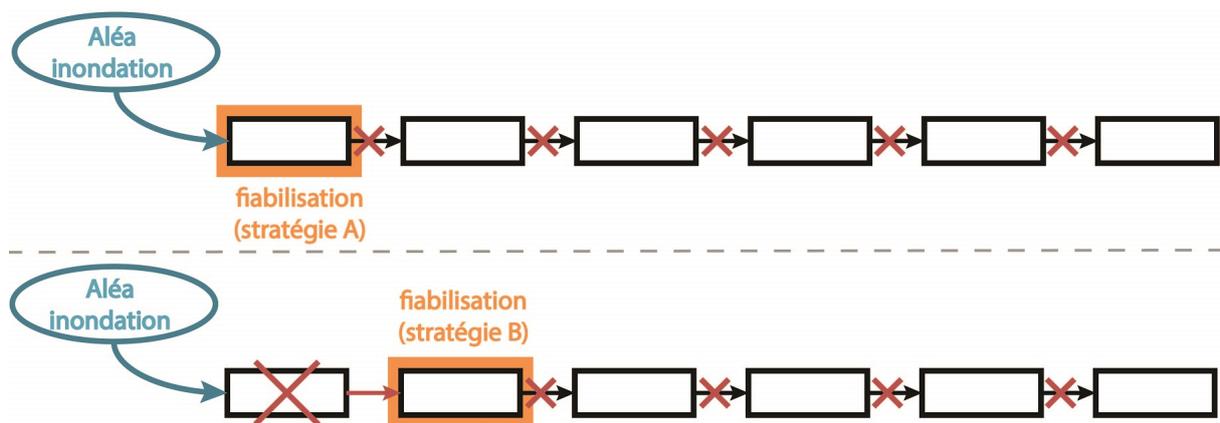


FIGURE 5.18 – Comparaison coût/bénéfice entre une stratégie de fiabilisation A d'un composant par rapport à une stratégie de fiabilisation B d'un autre composant (source : auteur)

En synthèse, de nombreuses **stratégies d'amélioration de la résilience** du système face au risque inondation par des mesures de fiabilisation sont **évaluables** en croisant :

- l'**indicateur de coût**, qu'il soit relatif au coût individuel de remise en état des composants, au coût individuel de leur fiabilisation ou au coût total du scénario de défaillances par effet domino dans lesquels ils sont impliqués ;
- l'**indicateur de délai**, qu'il soit relatif au délai individuel de remise en état des composants, au délai individuel que nécessiterait leur fiabilisation ou au délai total du scénario de défaillances par effet domino dans lesquels ils sont impliqués ;
- les **profils comportementaux** : fiabilisation des composants agressifs pour réduire ou supprimer des mécanismes d'effet domino, fiabilisation des composants sensibles car en moyenne majoritairement endommagés ou fiabilisation des composants diffuseurs pour réduire leur tendance à entretenir la dynamique d'effet domino et ainsi propager les défaillances indirectes.

Finalement, les notions d'indicateur de coût de remise en état, d'indicateur de délai de remise en état et de profil de comportement questionnent plusieurs étapes-clés du cycle de vie d'un système de transport guidé : la phase de conception et de réalisation ainsi que la phase d'exploitation et de maintenance. Ces notions offrent l'opportunité de **considérer les risques naturels comme moteurs dans le cadre d'un projet de transport** en interrogeant les étapes du cycle de vie sous l'angle de la gestion des risques. Elles interviennent comme une aide à la réflexion afin d'envisager des solutions structurelles et non structurelles pour l'amélioration de la résilience du système global.

5.2.4.3 Notion de criticité des éléments du système

Que ce soit l'indicateur de coût de remise en état, l'indicateur de délai de remise en état ou les profils de comportement, ces éléments mettent en avant la notion de **criticité** des composants de systèmes technico-fonctionnels tels que les systèmes de transport guidé.

Dans le domaine industriel où ses méthodes ont été historiquement appliquées, la Sûreté de Fonctionnement définit la notion de criticité en considérant le couple fréquence d'occurrence de chaque mode de défaillance d'un composant et gravité de ses effets (AUBRY et CHÂTELET, 2008). Ces éléments permettent donc de définir des zones d'acceptabilité d'un risque selon ces deux axes à la fois d'occurrence et de gravité (ZWINGELSTEIN, 1999).

Néanmoins, cette définition est restreinte aux systèmes industriels et peut être élargie à d'autres types de systèmes, notamment technico-fonctionnels. Dans ce contexte, les éléments **critiques** peuvent être définis comme ceux « *dont la défaillance est susceptible de provoquer une interruption de longue durée du service* », à partir donc d'un critère de temps de rétablissement (BACOT *et al.*, 2015, p. 59). Mais, cette notion peut être aussi étendue au-delà d'un critère de temps de remise en fonctionnement. Le travail présenté précédemment autour de la notion de coût total d'un scénario de défaillances successives de composants souligne l'importance des dommages économiques d'un élément dans l'évaluation de sa criticité. Les facteurs coût et délai de rétablissement apparaissent d'ailleurs dans la caractérisation de la criticité à des échelles plus larges que les composants : à l'échelle des systèmes eux-mêmes. En Allemagne, le guide national pour la protection des infrastructures critiques paru en 2007 suivi de la stratégie nationale de protection des infrastructures critiques élaborée en 2009 ont permis l'identification de plusieurs critères pour déterminer la criticité de ces systèmes (CEPRI, 2016, p. 19) :

- conséquences de la perturbation sur la vie et la santé humaine ;
- délai entre la perturbation et la manifestation des conséquences sur la production ou les services ;
- ampleur des conséquences sur la production ou les services ;
- conséquences contractuelles, pénales et judiciaires pour l'opérateur ;
- impacts économiques pour l'opérateur.

En plus de temps de remise en état, l'Allemagne relève la notion d'**inertie de fonctionnement** d'un élément (TOUBIN *et al.*, 2012) ou de **délai d'affectation** (PAIRET, 2009, p. 56). Cet indicateur de temps est, en effet, celui qu'a l'opérateur du réseau impacté par un aléa pour agir, par des mesures structurelles ou organisationnelles, avant que les conséquences de l'impact de ce réseau ne se manifestent sur le service produit. Ce critère est déterminant dans la diffusion de défaillances par effet domino afin de déterminer la marge de manœuvre qu'ont les opérateurs et gestionnaires de systèmes urbains pour endiguer cette dynamique de propagation (ROBERT et MORABITO, 2009). Par comparaison, le

critère de délai de remise en état d'un élément revêt plutôt un caractère **réactif**, relatif à l'après aléa, contrairement au critère lui aussi temporel d'inertie de fonctionnement d'un élément qui désigne quant à lui une tendance à la **proactivité**, relative à la phase pendant l'aléa. De plus, au Royaume-Uni, le « *Strategic Framework and Policy Statement on Improving the Resilience of Critical Infrastructure to Disruption from Natural Hazards* » répartit les infrastructures selon 6 catégories de criticité (de CAT0 à CAT5) définies par la prise en compte des critères suivants (OFFICE, 2010) :

- importance du ou des services fournis par l'infrastructure ;
- degré de dégradation du ou des services fournis par l'infrastructure ;
- impacts économiques dus à l'interruption de services essentiels ;
- impacts sur la vie dus à l'interruption de services essentiels ;
- durée et étendue (géographique et population) de la perturbation.

Pour les infrastructures de catégories 3, 4 et 5, les impacts générés par leur défaillance sont tels qu'elles sont considérées comme des « *Critical National Infrastructures* » (Figure 5.19).

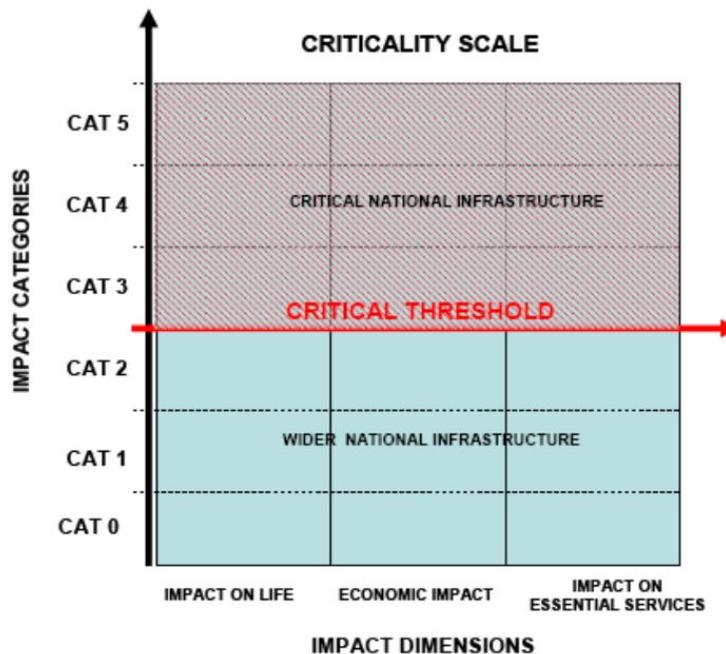


FIGURE 5.19 – Echelle de criticité du Royaume-Uni pour classer les infrastructures nationales (OFFICE, 2010)

La notion de criticité est variable en fonction de différents paramètres comme le contexte spatial et temporel ou le type d'aléa étudié (BALSELLS, 2015, p. 37) : alors qu'une installation peut être critique pour le fonctionnement d'un quartier ou d'une commune, elle peut passer en second plan d'un point de vue plus large, c'est-à-dire départemental ou régional (CEPRI, 2016, p. 16). De même, un élément considéré comme critique face à un aléa inondation ne le sera pas nécessairement face à un aléa sismique par exemple. Il est donc important d'observer le caractère **multiscale** de la criticité : criticité d'un composant, criticité d'un sous-système, criticité d'un système.

En synthèse, la criticité d'un élément du système est une donnée indispensable pour appréhender le fonctionnement global de ce système c'est-à-dire la possibilité qu'il soit exploité afin qu'il puisse assurer son service. Dans cette recherche et dans une logique de cohérence avec la démarche méthodologique élaborée pour la caractérisation de la vulnérabilité, **la criticité est considérée dans son double aspect temporel, à savoir la durée d'interruption provoquée, et économique, c'est-à-dire le coût attaché à la remise en état.**

Finale­ment, la littérature sur la criticité d'un système met en avant l'importance de **critères**, d'**indicateurs** et plus générale­ment d'**éléments quantifiés** pour détermi­ner le mode de fonc­tionnement de ce système, de façon nominale ou de façon dégradée. Par exemple, la défaillance de composants pour­tant critiques n'implique pas nécessaire­ment l'arrêt du système. Les systèmes de transport guidé dé­montrent ordinaire­ment ce fait par l'interrup­tion de certaines sections du réseau impactées par un aléa de tout type tout en maintenant l'exploitation sur les autres sections du réseau, ou encore par le ralentissement de la vitesse d'exploitation tout en assurant l'exploitation. C'est la raison pour laquelle l'élaboration de stratégies d'amélioration de la résilience de systèmes de transport guidé face au risque inondation passe par la définition de modes de fonc­tionnement dégradé. Ils constituent une composante importante de la résilience (TOUBIN, 2014, P. 137).

Or, la notion de fonc­tionnement en mode dégradé nécessite d'être clairement définie tant en termes de dégradation **qualitative** que **quantitative** (TOUBIN, 2014). Le lien scientifique entre la dégradation matérielle directe ou indirecte par effet domino d'éléments critiques d'un système de transport guidé et les possibilités de mettre en place un fonc­tionnement en mode dégradé peut se formaliser par la mobilisation de méthodes probabilistes capables de fournir une approche globale de la caractérisation du risque.

Synthèse

Plusieurs étapes permettent de construire un modèle d'évaluation du coût et du délai global de remise un état d'un système touché par une inondation. Premièrement, une base de données de coûts et une base de données de délais de remise en état sont conçues à partir de la connaissance experte et de documentation technique, et ce pour tous les composants. De cette manière, un coût individuel et un délai individuel sont identifiés pour chaque composant. L'objectif n'étant pas de fournir une évaluation économique fine de l'impact d'une inondation mais plutôt de donner un aperçu de l'ampleur des dommages susceptibles de survenir, les coûts et délais individuels sont évalués selon cinq intervalles définis dans cette recherche. Deuxièmement, sont définies les règles de calcul du coût et du délai global de remise un état d'un système de transport guidé à partir des coûts et délais individuels des éléments qui le constituent. L'hypothèse prise pour le calcul du coût global d'un scénario donné de défaillances consiste à sommer les coûts individuels de chaque composant. Pour le calcul du délai global, il s'agit de prendre le maximum des délais individuels comme valeur majorante. Ainsi, il est possible d'associer pour chacun des milliers de scénarios de défaillances un coût et un délai global sous forme d'intervalles qui correspondent à la remise en état.

Un travail d'analyse statistique est ensuite mené sur ces coûts et délais globaux dans une approche comparative entre des systèmes souterrains, de surface et aériens. Des statistiques sont réalisées quant au nombre de scénarios en fonction du coût global et du délai global ainsi que sur l'influence du nombre de composants présents dans les scénarios sur la remise en état.

Une interface utilisateur est également conçue afin de pouvoir estimer sous forme d'intervalles le coût global et délai global de remise en état d'un système de transport donné faisant face à une inondation de faible, moyenne ou forte intensité. À partir de quelques incidents passés d'inondation sur des systèmes de transport, une comparaison est faite entre le coût et délai estimés par le modèle et le coût et délai réels. Ces confrontations entre valeurs estimées et valeurs réelles ont permis la validation du modèle construit.

Enfin, l'apport d'un tel modèle d'estimation coûts-délais est discuté en matière d'aide à l'élaboration de stratégies de conception, d'exploitation et de maintenance de systèmes ferroviaires soumis au risque inondation.

5.3 Conclusion du chapitre 5

Le chapitre 5 permet à la démarche méthodologique de caractérisation de la vulnérabilité des systèmes de transport guidé soumis à un risque inondation de passer d'une logique **qualitative** à une logique **quantitative**. Il est donc dans la continuité du travail de modélisation des effets domino internes aux systèmes de transport guidé.

Le modèle d'interdépendances conçu jusque-là a produit des résultats qualitatifs en produisant les

scénarios de défaillances par effet domino susceptibles de survenir et en identifiant le comportement des composants vis-à-vis de ces effets domino en les initiant, en les diffusant ou en les terminant. Or, le chapitre 5 perfectionne ce modèle en associant à ces résultats qualitatifs des éléments de **coûts** et de **délais** de remise en état d'un système touché par une inondation, dans une optique comparative entre les trois configurations usuelles d'implantation. La construction de ce modèle passe par différentes étapes : définition de trois aléas d'intensité graduelle et caractérisés par les types de dommages qu'ils engendrent, identification et synthèse des coûts individuels et des délais individuels de remise en état propres à chacun des composants, règles de calcul du coût global et du délai global associés à un scénario donné de composants défaillant successivement.

Ce chapitre ouvre également la perspective opérationnelle offerte par le modèle d'interdépendances et le modèle d'estimation coûts-délais. Les profils comportementaux, d'une part, et les coûts et délais de remise en état, d'autre part, sont en effet des résultats susceptibles de fournir **une aide quant à la conception, à l'exploitation et à la maintenance de systèmes de transport guidé** dans des conditions d'inondation. Ils permettent d'orienter les choix de conception de système en protégeant certains composants particulièrement critique ou en indiquant ceux devant faire l'objet d'une surveillance accrue en exploitation.

Précisément, l'aide à la réflexion en matière de gestion de crise que permet ces deux modèles ne vise pas à la résolution de la vulnérabilité des composants pris un à un pour aboutir à une amélioration de la résilience globale du système. Une telle conclusion viendrait à considérer la vulnérabilité comme l'opposé de la résilience, ce qui n'est pas l'hypothèse prise dans cette recherche. L'idée est de dire que certains composants particulièrement critiques ou ayant un rôle important dans la dynamique des effets domino (initiation, propagation) nécessitent de faire l'objet de mesures particulières grâce auxquelles le système dans son ensemble est mieux capable de faire face à un risque inondation. De cette façon, ces résultats ne s'inscrivent pas uniquement dans une réduction de vulnérabilité mais plutôt dans une amélioration de la résilience du système basée sur une maîtrise et une gestion des risques.



Troisième partie

METTRE EN ŒUVRE LA RÉSILIENCE DES SYSTÈMES DE TRANSPORT GUIDÉ PAR UNE DÉMARCHE OPÉRATIONNELLE



Chapitre 6

Construction d'un modèle quantitatif à l'aide d'une méthode probabiliste

« Uncertainty is not an excuse for inaction.

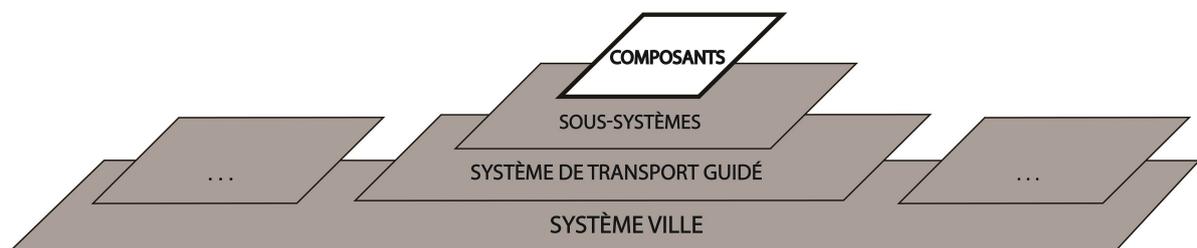
[...] As climate changes will bring about increasing weather-related hazards in the longer term, UIC would like to see NDC (national policy) statements advocating early adaptation action to build resilience – early because of the long lead times for infrastructure planning and early because if we leave things too late – for some years – we will become focused on managing disruption by unaffordable reaction.

Key message — uncertainty should not be an excuse to avoid taking action.

Fire-fighting is very expensive, we need a strategic approach. We should use investments to manage uncertainty.

In Europe alone, weather resilience costs the rail sector 300 million Euros every year, 80 % of that is due to flooding alone. »

Jean-Pierre Loubinoux, Directeur général de l'Union Internationale des Chemins de Fer (UIC). Discours réalisé lors de la COP22 de la Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques, Marrakech, Maroc, 15 novembre 2016.



La démarche méthodologique de caractérisation de la vulnérabilité d'un système de transport guidé face au risque inondation s'est focalisée sur les défaillances d'éléments par des effets domino. Ces mécanismes ont la particularité de propager le risque au sein de l'ensemble du système, avec un effet démultiplicateur sur les impacts initiaux. Cette démarche a permis d'identifier exhaustivement et théoriquement tous les potentiels scénarios de défaillances par effet domino au sein d'un système de transport guidé selon qu'il soit implanté en aérien, en surface ou en souterrain. Ces résultats, issus d'une modélisation des interdépendances des éléments du système, sont approfondis par une modélisation estimative du coût et du délai de remise en état global impliqués par ces défaillances directes et par effet domino. Cette approche met en exergue l'apport d'indicateurs quantitatifs tels que le coût ou le délai de reconstruction dans l'aide à la réflexion en matière de développement de mesures de réduction de la vulnérabilité. Or, ce travail de quantification ouvre de multiples applications au-delà de la réduction de la vulnérabilité des composants. En matière de gestion des risques, il est en effet nécessaire de ne pas se contenter de l'étude de la vulnérabilité d'un système au travers de ses potentiels dysfonctionnements mais d'analyser aussi la manière de gérer les conséquences de ces dysfonctionnements ¹ (DALZIELL et McMANUS, 2004). Dès lors, « *il semble temps de raisonner en termes de stratégie et non plus en termes de programmation, pour privilégier les démarches heuristiques, itératives, incrémentales et récurrentes* » (LHOMME, 2012, p. 89).

La quantification des effets de l'aléa apparaît comme une base scientifique fructueuse en matière de développement de stratégies de résilience pour les systèmes de transport. Elle permet, en effet, de fournir une vision complète des conséquences du risque : de l'occurrence de l'aléa, avec ses paramètres d'intensité donnée, des dommages directs et indirects c'est-à-dire provoqués par des mécanismes d'effet domino jusqu'aux effets sur l'exploitation et donc sur le service fourni par le système. Dans ce contexte de construction de stratégies opérationnelles de résilience, l'approche probabiliste apparaît favorable dans la mesure où le concept de résilience côtoie les notions d'environnement changeant, de futur imprévisible où la surprise est probable (FOLKE *et al.*, 2002, p. 13).

L'approche probabiliste rejoint, en fait, les acceptions historiques du risque vu notamment comme une mesure de la probabilité de la gravité d'évènements dommageables ² (LAWRENCE, 1976) c'est-à-dire des acceptions centrées sur une évaluation de valeurs prévues ou attendues (ŠOTIĆ et RAJIĆ, 2015). Dans cette recherche, il s'agit d'appliquer la mesure de la probabilité au service qu'est capable de fournir le système. L'approche probabiliste ne vise donc pas à contrôler l'imprévisibilité des conséquences du risque sur le système, en particulier la diffusion plus ou moins intense d'effets domino, mais plutôt de l'intégrer comme une composante pour le développement de stratégies d'amélioration de la résilience. Cette approche est mobilisée dans cette recherche comme moyen de lier les conséquences matérielles analysées grâce aux modèles d'interdépendances et d'estimation coût-délai avec les conséquences fonctionnelles sur l'exploitation du système. L'objectif est de déterminer, à partir de la connaissance du « paysage de défaillances » de composants, dans quelle mesure un système de transport guidé peut-il maintenir son exploitation en dehors du mode nominal réservé à une situation de fonctionnement normal.

La résilience est alors envisagée comme l'ensemble des stratégies qu'il est possible de mettre en œuvre afin de réduire les conséquences d'une inondation.

1. "There is a need to focus not only on the vulnerability of our systems to failure, but also on our ability to manage and minimise the impact of any failures."

2. "The measure of the probability and severity of adverse effects."

6.1 Formulation des besoins scientifiques et pratiques du modèle quantitatif

6.1.1 Définition des besoins du modèle et critères de choix

La modélisation quantitative entreprise, sur la base des modélisations semi-quantitatives précédemment réalisées, répond à un cahier des charges constitué de besoins théoriques et pratiques qui sont décrits ci-dessous.

6.1.1.1 Intégrer la multiplicité des événements redoutés provoqués par le risque hydrologique

Le traitement probabiliste du risque hydrologique s'avère moins aisé que dans le cas d'autres risques naturels tels que le risque lié aux vents traversiers ou vents forts par exemple (GONZVA et GAUTIER, 2014). En effet, il est intéressant de faire une comparaison avec le risque vents traversiers en ce sens que celui-ci peut être considéré, à l'échelle du système de transport, comme touchant un seul sous-système : le matériel roulant, pouvant se renverser. Or, l'aléa hydrologique tel le ruissellement pluvial est susceptible d'engendrer plusieurs incidents : l'érosion des sous-couches de la voie ferrée, l'emportement du ballast, la formation de coulées de boue ou le charriage d'éléments sur la voie, le déraillement du train en cas de présence d'obstacles sur la voie, ou la mise hors service des composants électriques (CHAZELLE *et al.*, 2014; PAMS CAPOCCIONI *et al.*, 2013b). Par conséquent, à l'échelle du système de transport, **le risque hydrologique peut être considéré comme multi-systèmes** dans la mesure où il peut toucher potentiellement tous les composants du système. **La granularité des éléments impactés et donc différente d'un risque à l'autre.**

De plus, le risque hydrologique peut être considéré comme multi-défaillant par opposition au risque de vents traversiers mono-défaillant (cf. Annexe). En effet, pour ce dernier, l'évènement résultant est le « renversement de véhicules » ; or, pour le risque hydrologique, plusieurs évènements peuvent en découler, tels que les incidents cités plus haut : « emportement du ballast », etc. Certains éléments pouvant même subir plusieurs types de défaillances : par exemple, le ballast peut être ennoyé, il peut être aussi emporté.

Ainsi, la tâche s'avère plus difficile dans le cadre du risque hydrologique car celui-ci affecte le système à une échelle plus élémentaire, sur un plus grand nombre d'éléments et génère plus d'évènements critiques que dans l'exemple du risque de vents traversiers (Tableau 6.1). Le deuxième critère que doit suivre la modélisation quantitative à partir d'une approche probabiliste est celui d'**intégrer scientifiquement cette situation de multiplicité.**

TABLEAU 6.1 – Comparaison des enjeux liés à la modélisation quantitative (probabiliste) du risque inondation par rapport au risque de vents traversiers

	Vents traversiers		Inondation
Granularité des éléments impactés	Sous-système	→	Composant
Multiplicité des éléments impactés	Mono sous-système	→	Multi composant
Multiplicité des défaillances observées	Mono défaillance	→	Multi défaillance

6.1.1.2 Intégrer la multiplicité des sources de données permettant de modéliser les effets du risque inondation

Un autre critère que doit considérer le modèle quantitatif probabiliste est **la multiplicité des sources de données relatives à la compréhension des effets du risque inondation sur l'exploitation**. En effet, les recherches se multiplient depuis les dernières années autour de la problématique de quantification des conséquences qu'engendre le risque inondation sur le transport ferroviaire ; à ces recherches s'ajoutent des pratiques, des procédures et des documents techniques existants traitant de ce risque.

De façon générale, les méthodes d'analyse de risque les plus utilisées pour étudier le comportement fonctionnel et dysfonctionnel d'infrastructures sont les méthodes **physiques, statistiques** et par « **dire d'expert** » (PEYRAS, 2009). Les effets du risque inondation sur les systèmes de transport guidé ne s'inscrivent pas tout à fait dans ce même triptyque ; les méthodes statistiques sont en effet complexes à mettre en place dans la mesure où des données telles que les débits d'eau ou les hauteurs d'eau ayant engendré des dommages sur le système sont ordinairement impossibles à obtenir au vu de la rapidité des inondations, en particulier dans le cas d'inondations soudaines³. Les traces des inondations sont, par ailleurs, rapidement effacées par les travaux effectués dans l'urgence afin de permettre la reprise rapide des circulations (PAMS CAPOCCIONI *et al.*, 2015). Néanmoins, des projets de recherche internationaux présentent des données d'ordre statistique issues essentiellement de retours d'expérience sur des incidents dus aux aléas naturels et en particulier à l'aléa inondation. De plus, les méthodes physiques et par « dire d'expert » sont applicables dans le cas des systèmes ferroviaires soumis au risque inondation.

Cette situation amène alors à devoir développer un modèle apte à intégrer plusieurs types de résultats et de données quantitatives dont sont listés quelques exemples ci-après.

6.1.1.2.1. Normes

Une première source importante de données pour alimenter le modèle quantitatif est issue des **textes normatifs**.

En France, la SNCF élabore des documents techniques, procédures et référentiels relatifs à l'ensemble des domaines en lien avec la conception d'un système de transport, son exploitation ou encore sa maintenance. Ces référentiels techniques sont usuellement nommés « IN » et sont numérotés. Parmi les sujets faisant l'objet de référentiels, les aléas naturels pouvant affecter les systèmes de transport guidé en font partie. Deux exemples sont explicités.

L'IN 0319 est un référentiel technique qui « *définit la notion de stabilité de la voie ballastée et en donne les caractéristiques ; elle définit les mesures à prendre par les agents voie, en cas de diminution inopinée ou de risque de diminution de la stabilité de la voie* » (SNCF, 2004). Parmi les cas recensés pouvant altérer la stabilité de la voie sont concernées les conditions climatiques : température du rail, le gel et dégel, la sécheresse et la pluie, et de façon plus générale les inondations. Pour le risque inondation, l'action de l'eau sur la stabilité de la voie ferrée implique des procédures d'exploitation applicables immédiatement pendant et après l'aléa. Ces procédures sont essentiellement constituées de réductions temporaires de vitesse (Figure 6.1).

L'IN 3278 est un autre référentiel qui « *expose les exigences [...] pour la conception des ouvrages de génie civil des lignes ferroviaires à grande vitesse* » telles que les principes de dimensionnement ré-

3. Une inondation soudaine, brutale ou éclairée est une montée rapide des eaux sur une partie d'un réseau hydrographique et pouvant être due à des épisodes pluvieux violents et localisés.

Article 3.6 Inondation

En cas d'inondation, les **mesures immédiates** à appliquer en attendant l'arrivée du dirigeant local ou d'astreinte sont les suivantes :

- autorisation de franchissement à un **taux maximum de 100 km/h** avec surveillance quotidienne, **si l'eau atteint le niveau du pied de la banquette,**
- autorisation de franchissement à un **taux maximum de 40 km/h** avec surveillance à chaque circulation, **si l'eau atteint le niveau inférieur des traverses,**
- autorisation de franchissement à un **taux maximum de 10 km/h** avec surveillance à chaque circulation, **si l'eau atteint le patin du rail le plus bas,**
- **arrêt des circulations,** **si le ballast est entraîné** ou **si l'eau atteint le dessus du champignon du rail le plus bas** (il en va de même si l'observation ne permet pas de s'assurer de l'intégrité de la plate-forme et du profil de ballast).

En présence d'affouillement, de risque d'affouillement, de courants ou de tourbillons pouvant faire craindre l'apparition de désordres, des taux de ralentissements inférieurs à ceux indiqués ci-dessus et adaptés au risque constaté doivent être prescrits.

Après une inondation au cours de laquelle la circulation des trains a dû être interrompue, la restitution de la voie au service commercial doit être réalisée comme suit :

- **La circulation peut être autorisée, à vitesse réduite ne pouvant excéder 40 km/h,** lorsque l'absence de désordres visibles a pu être vérifiée lors de la tournée sur la zone concernée d'une draine ou d'un train de travaux ou suite au passage en marche prudente d'un premier train commercial et si nécessaire, au passage à vitesse réduite d'un certain nombre de circulations.
- **La vitesse est ensuite remontée par paliers** en respectant les mêmes conditions que sur les chantiers affectant la stabilité de la voie.
- Une surveillance adaptée de la voie et des ouvrages en terre doit être maintenue, y compris après restitution à vitesse normale jusqu'à obtention de l'assurance que les risques de tassements ou de déstabilisation de la voie ou de la plate-forme ont disparu.

FIGURE 6.1 – Extrait du référentiel technique SNCF IN 0319 traitant de l'influence du risque inondation sur la stabilité de la voie ferrée (SNCF, 2004). *En jaune sont surlignées les restrictions de vitesse de circulation.*

pondant à des objectifs fixés par le maître d'ouvrage (SNCF, 2006). Ce référentiel a été repris dans le cas de la conception de la ligne LGV Sud Europe Atlantique (SEA) entre Tours et Bordeaux (COSEA, 2013). En particulier, le débit d'eau du projet à prendre en compte pour le dimensionnement des ouvrages hydrauliques de rétablissement des bassins versants naturels y est défini comme étant : le débit centennal, ou le débit maximal historique connu s'il est supérieur, associé à un débit de crue exceptionnel établi comme étant égal à 1,8 fois le débit d'eau du projet. Ce débit exceptionnel correspond à une valeur test de débit compatible « avec la sécurité des usagers et des riverains », c'est-à-dire que le niveau d'eau ne doit pas atteindre la piste, c'est-à-dire la base de la banquette de ballast, ou mettre en cause d'une quelconque façon la sécurité des personnes. Ce facteur d'1,8 est déterminé arbitrairement à l'aide des dires d'expert (PAMS CAPOCCIONI *et al.*, 2015).

Ces référentiels techniques couvrent donc la conception, l'exploitation et la maintenance de plusieurs types de systèmes de transport guidé. Ils représentent, dans le cas de la construction d'un modèle probabiliste des conséquences sur l'exploitation, des données à inclure, en particulier celles qui lient les hauteurs d'eau et les réductions de vitesse d'exploitation.

6.1.1.2.2. Littérature scientifique et projets de recherche

Si la connaissance en matière d'impact d'aléas naturels est souvent complexe à obtenir au vu de la dynamique de certains aléas qui ne laissent pas toujours de traces explicites, des projets de recherche internationaux visent à **synthétiser la connaissance** quantitative qui peut exister sur ces impacts.

Le projet européen EWENT (2009-2012) pour *Extreme Weather impacts on European Networks of Transport* propose un cadre méthodologique basé sur l'identification de phénomènes météorologiques, suivie d'une analyse de leurs impacts sur les systèmes de transport jusqu'à la préconisation de mesures de réduction et de contrôle des risques générés. Le système de transport est étudié selon trois axes : l'infrastructure, et les dommages matériels possibles ; l'exploitation, et les impacts sur le trafic et la fiabilité du service ; les impacts indirects, c'est-à-dire les conséquences externes sur les parties dépendantes des systèmes de transport. Les impacts sur les systèmes de transport sont considérés pour des événements ayant des effets sur le court terme, tels que des aléas courants et quotidiens, et sur le long terme, tels que des événements extrêmes nécessitant la plupart du temps des réflexions plus importantes en matière de conception, d'exploitation et de maintenance.

Dans le cadre de ce projet, une revue de la littérature est réalisée sur la connaissance actuelle relative aux impacts de phénomènes météorologiques sur les systèmes de transport. Plus précisément, des valeurs critiques d'intensité de plusieurs aléas (vent fort, tempête, neige, gel, inondation, basse et haute température, brouillard, sécheresse, etc.) sont recensées comme des événements précurseurs à des dégâts matériels ou des effets sur l'exploitation (LEVIÄKANGAS *et al.*, 2011, p. 15 ; MÜHLHAUSEN *et al.*, 2010, p. 118). La généralisation de ces valeurs propres au réseau ferroviaire d'un pays donné à une échelle géographique plus large est à prendre avec prudence. Cependant, il est raisonnable de faire l'hypothèse qu'un phénomène météorologique donné qui survient au niveau d'une région et à partir duquel des valeurs critiques ont été identifiées engendre le même type de conséquences sur une autre région (LEVIÄKANGAS *et al.*, 2011, p. 15).

Ainsi, cette revue de littérature rassemble plusieurs aléas naturels, des valeurs critiques, les impacts matériels et fonctionnels observés sur des incidents passés et la validité spatiale de ces résultats (Figure 6.2).

Heavy precipitation				
Thresholds	Impacts	Consequences to infrastructure	Consequences to operations/services	Relevant climatic zones
≥ 50 mm/24 h	<ul style="list-style-type: none"> Flooding, coastal flooding, fluvial flooding Soil erosion²⁾ 	<ul style="list-style-type: none"> Damage to railway embankment and slope [km, km²] Scour of bridge supports [m/km, m²/km²] Water on track or in underground structures [km] Damage to rail track [km] Other material damage to equipment and infrastructures [km, €] Problems with drainage systems, tunnels and bridges²⁾ 	<ul style="list-style-type: none"> Stopped and/or cancelled rail services [min/h, €]; delays [min, €] Passengers trapped on trains³⁾ Inefficient acceleration and braking → slower speeds → delays [h/min] Accidents [number of dead and injured persons] Material damage to rail fleet, equipment and infrastructures [€] Changes in accessibility by train (urban and/or inter-urban) [km, min] Changes in quality of transport services e.g. frequency, routes, waiting times, predictability, information, etc. [min, km] Additional earthworks²⁾ 	Temperate, Alpine, Mediterranean, Maritime
≥ 100 mm/24 h		<ul style="list-style-type: none"> The sewer system fills up; water rises from drains. Flooded underpasses. 	<ul style="list-style-type: none"> Safety of work force carrying out inspections and repair work²⁾ 	Temperate, Alpine, Mediterranean, Maritime
≥ 150 mm/24 h	<ul style="list-style-type: none"> Rainfall induced landslides, mudslides²⁾ and rock falls²⁾. 	<ul style="list-style-type: none"> Flooded rail tracks. Flooded bridges. Metro systems: damaged track switch motors, signalling systems, power distribution systems. 	<ul style="list-style-type: none"> Delays in rail traffic. Closed rail tracks. 	Temperate, Alpine, Mediterranean, Maritime
		<ul style="list-style-type: none"> Landslide → wash-out of rail tracks and mud/debris on tracks. 		

FIGURE 6.2 – Extrait de la revue de littérature relative au risque de forte pluie et réalisée dans le cadre du projet européen EWENT

6.1.1.2.3. Modèles physiques

Une autre source importante de données à intégrer dans un modèle global de quantification du risque inondation est celle issue des **résultats produits par des modèles physiques**.

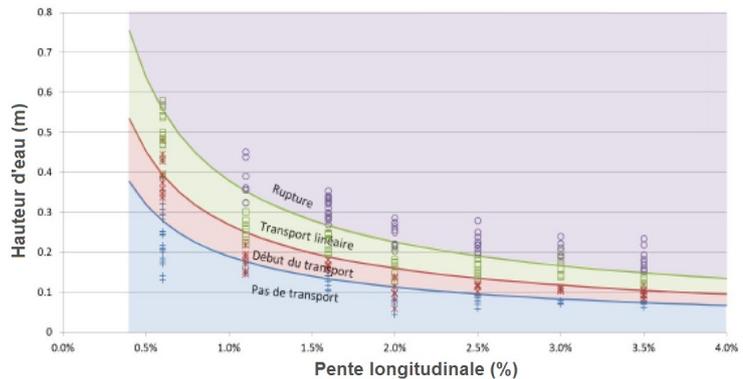
Les modèles physiques, de façon complémentaire aux modèles numériques, ont pour objectif la reproduction de phénomènes mis en jeu lors d'aléas hydrologiques touchant des réseaux ferroviaires. Ces phénomènes sont, en effet, difficilement pris en compte par une modélisation numérique. C'est le cas du « risque Sarry », en référence à l'incident survenue en 2000 au niveau de la commune de Sarry sur la LGV entre Paris et Lyon, qui est un exemple notable des limites des modèles numériques pour reproduire et comprendre le phénomène de transport de ballast dû à des écoulements d'eau sur la banquette (PAMS CAPOCCIONI *et al.*, 2015). Pour ce cas spécifique, une maquette réduite à l'échelle 1/3 a été réalisée dans le cadre du projet de recherche « Impact sur le Ballast des Eaux de Ruissellement » (IBER). L'objectif a été de faire des essais d'écoulement d'eau au niveau de la banquette du ballast et pour des configurations différentes (avec ou sans obstacle de type massif de poteau caténaire ou regard de collecteur, avec plusieurs valeurs de pentes longitudinales de la voie, etc.) afin d'en déduire les valeurs de débits et d'hauteurs d'eau qui induisent des événements précurseurs au phénomène de transport de ballast (Figure 6.3a). Précisément, pour des pentes longitudinales comprises entre 0,5 % et 3,5 %, plusieurs classes de transport de ballast ont été définies en identifiant les hauteurs d'eau et débits d'eau associés. Les résultats observés montrent que (PAMS CAPOCCIONI *et al.*, 2015, 2013b) :

- trois classes de transport de ballast sont possibles (Figure 6.3b) : pas de transport, initiation du phénomène de transport, transport linéaire, effondrement de la banquette de ballast ;
- des critères fixes de hauteur d'eau et vitesse, quelle que soit la pente, ne sont pas pertinents ;
- pour des pentes faibles, les critères purement empiriques utilisés jusqu'à présent sont plus restrictifs. Ce résultat est très intéressant puisqu'il permet alors d'optimiser les hypothèses de conception usuellement prises pour les études d'ouvrages hydrauliques ;

— pour de fortes pentes, le ballast risque d'être emporté dès quelques centimètres d'eau.



(a) Maquette à l'échelle $\frac{1}{3}$ présentant un écoulement au niveau de la piste sans obstacle (PAMS CAPOCCIONI *et al.*, 2015)



(b) Définition des trois classes de transport de ballast en fonction de la pente longitudinale de la voie et de la hauteur d'eau

Finalement, ces résultats trouvent pleinement leur place dans une quantification globale du risque inondation depuis l'aléa, puis les dégâts matériels engendrés, jusqu'aux effets sur l'exploitation.

6.1.1.2.4. Dires d'experts

Une troisième source importante de données à inclure dans un modèle global de quantification du risque inondation est celle des **avis d'expert**. Un dire d'expert est l'association de faits et de règles expertes et il peut être qualitatif et/ou quantitatif (TALON, 2006, p. 34). Les données issues de dire d'experts ont pour avantage d'être fournies rapidement mais leurs limites majeures sont la subjectivité, l'incertitude ou l'imprécision (TALON, 2006, p. 36). Elles sont communes lorsqu'il s'agit d'évaluer des domaines pour lesquels les phénomènes sont rares, mal connus ou difficilement reproductibles. L'estimation experte peut ainsi devenir une source de données à part entière bien que ce type d'information ne constitue pas une loi physique ni une donnée réellement observée (VUILLET, 2012, p. 121).

Différentes techniques ont été développées pour recueillir cette connaissance experte (MUCCHIELLI, 1991) : l'introspection c'est-à-dire une auto-analyse de l'expert des connaissances qu'il possède ; la description phénoménologique qui est une méthode de description du vécu, en éliminant le plus rigoureusement possible l'explication de ce phénomène et en se focalisant sur une retranscription précise des faits observés par l'expert ; les entretiens qui consistent à recueillir directement ou indirectement les connaissances d'un ou de plusieurs interviewés (experts). Cette phase de recueil de la connaissance experte est la phase d'élicitation et est suivie d'une phase de formalisation (TALON, 2006, p. 34). L'étape de formalisation, comme son nom l'indique, permet de formaliser les dire d'expert en prenant en compte l'incertitude et l'imprécision lors de la phase précédente d'élicitation.

Cependant, dans une optique de prise en compte des défaillances de composants provoquées par des effets domino, les dire d'expert constituent une donnée peu recommandable car il est difficile d'identifier des experts en matière d'interdépendances (LHOMME, 2012, p. 182). Les dire d'expert doivent donc bien être considérés comme des données sectorielles c'est-à-dire qui relèvent d'un sous-système précis tel que l'infrastructure ou l'énergie.

Dans cette recherche, l'approche par la connaissance experte est peu formalisée dans la mesure où elle ne bénéficie pas d'une phase d'élicitation et de formalisation approfondies. Elle est mise en place dans le cadre d'entretiens avec des professionnels de la maintenance et de l'exploitation afin de déterminer des données relatives aux dommages matériels et conséquences sur l'exploitation de la même

façon que lors du recueil d'information relatives aux coûts et aux délais de remise en état des composants pour alimenter le modèle d'estimation coût-délai (cf. chapitre 5). Ces données revêtent donc, de fait, une part d'incertain et d'imprécis mais respectent l'exigence de cette recherche, à savoir élaborer et alimenter un modèle quantitatif sur la base d'une approche probabiliste pour comprendre l'impact du risque inondation sur la dégradation du service.

6.1.2 Approches dominantes pour la construction de modèles probabilistes

Le cahier des charges fonctionnel pour ce modèle quantitatif permettant la caractérisation totale du risque inondation peut être synthétisé comme suit :

- intégrer la notion d'**interdépendance entre composants** pouvant être la source de défaillance de composants par effet domino afin de prendre en compte la **multiplicité des évènements redoutés provoqués par le risque inondation** ;
- conserver la **logique comparative entre les trois configurations d'implantation** traditionnelles d'un système de transport guidé ;
- intégrer la **multiplicité des sources de données existantes** quant à la connaissance actuelle des effets du risque inondation sur les systèmes de transport guidé ;
- permettre une **caractérisation complète du risque** depuis l'aléa et ses paramètres d'intensité jusqu'aux conséquences fonctionnelles sur l'exploitation c'est-à-dire la dégradation de service du système engendrée par les défaillances de composants ;
- être un modèle d'**aide à la réflexion** pour l'élaboration de **stratégies opérationnelles de résilience** par une réduction du risque encouru pour le système en cas d'inondation et par une adaptation du service fourni de façon à le maintenir même de façon dégradée.

Pour ce dernier point et de façon simplifiée, le modèle quantitatif doit permettre d'apporter des éléments de réponse quant aux possibilités d'exploiter le système sachant qu'il affiche un certain nombre de composants défaillants. En ce sens, le choix de s'orienter vers une approche probabiliste apparaît pertinent dans ce contexte d'effets probables sur l'exploitation du système, conditionnés par les défaillances de composants.

Par conséquent, la notion de probabilité conditionnelle est de rigueur pour établir ce lien entre l'information disponible, le contrôle des facteurs déterminants d'un phénomène qui est ici l'impact fonctionnel du risque inondation et sa probabilité de réalisation (GOLDFARB et PARDOUX, 2011, p. 136). Autour de la notion de probabilité, deux approches dominantes existent : l'approche **fréquentiste** dite « **objectiviste** » et l'approche **bayésienne** dite « **subjectiviste** ».

6.1.2.1 Approche fréquentiste dite objectiviste

La première approche possible permettant de traiter des probabilités d'évènements est l'approche fréquentiste. L'approche fréquentiste se développe sur l'évaluation de la probabilité d'un évènement à partir de la limite de la fréquence relative d'apparition de cet évènement lorsqu'est répétée indéfiniment l'épreuve aléatoire lors de laquelle il peut se réaliser (GOLDFARB et PARDOUX, 2011, p. 170). La probabilité est en fait définie par la limite d'une fréquence observée (NAÏM *et al.*, 2011, p. 17). Dans ce cas, il s'agit alors de probabilités dites objectives et *a posteriori* visant à dégager les lois stochastiques de processus aléatoires dans des statistiques de fréquence à long terme (FAURE, 2013). Dès cette définition de l'approche, des problèmes majeurs se révèlent dans le contexte de cette recherche.

Premièrement, l'approche fréquentiste nécessite de répéter l'épreuve afin d'évaluer les probabilités des événements générés par l'occurrence de cette épreuve. Or, un aléa inondation donné n'est pas une épreuve, pour reprendre ce terme probabiliste, qui se répète en ce sens que les événements qu'il engendre en matière de dommages sur les systèmes de transport sont uniques. Chaque inondation provoque, en effet, des dommages spécifiques liés à la configuration du système de transport, l'environnement dans lequel il s'implante, son âge, et bien d'autres caractéristiques qui empêchent toute répétabilité au sens probabiliste. Deuxièmement, l'approche fréquentiste nécessite une importante quantité de données relatives à chaque événement résultant de l'occurrence d'un aléa inondation. Or, dans le domaine de l'ingénierie ferroviaire, tout comme dans de nombreux autres domaines de l'ingénierie tels que la construction (ZHANG *et al.*, 2014), le manque de données relatives à l'aléa et aux événements redoutés engendrés par cet aléa empêche d'établir des probabilités de réalisation de ces événements. Troisièmement, la connaissance actuelle en ce qui concerne les impacts du risque inondation sur les systèmes de transport guidé est plurielle, c'est-à-dire ni tout à fait d'ordre statistique, ni tout à fait d'ordre physique et ni tout à fait d'ordre expert. Or, l'approche fréquentiste ne peut déduire aisément de lois générales à partir d'une telle multiplicité de données en genre et en nombre.

Ainsi, l'approche fréquentiste semble non adaptée au contexte de cette recherche et amène à s'orienter vers la seconde approche dominante en matière de probabilité : l'approche bayésienne dite « subjectiviste ».

6.1.2.2 Approche bayésienne dite subjectiviste

La deuxième approche qui permet de traiter les probabilités est l'approche subjectiviste, par opposition à l'approche objectiviste. Cette approche considère que la probabilité mesure la croyance attribuée à la survenance d'un fait donné (NAÏM *et al.*, 2011, p. 17). L'approche subjectiviste ainsi définie fait couramment l'objet d'une confusion avec l'approche bayésienne (KERMISCH, 2012). Celles-ci sont, en effet, souvent considérées comme synonymes dans la mesure où elles s'opposent aux probabilités fréquentistes, lesquelles renvoient à des résultats d'expériences répétées et à des observations d'apparition d'événements, d'où leur appellation de probabilités « objectives » (KERMISCH, 2012). En fait, les probabilités subjectives correspondent à un degré de croyance relatif à la réalisation d'un événement alors que les probabilités bayésiennes correspondent à un degré de connaissance fondé sur le théorème de Bayes (KAPLAN, 1997). (KERMISCH, 2012) précise que « *le théorème permet d'estimer a posteriori la probabilité d'apparition d'un événement A en se fondant sur une première estimation a priori de cette probabilité. Le fait de se fonder sur la probabilité d'apparition a priori de A pour estimer a posteriori celle de A peut être considéré comme une démarche subjective au sens où elle ne se base pas sur des observations répétées et où il n'y a aucune certitude a priori quant à l'équivalence de ces probabilités. Toutefois, la prise en compte d'observations de plus en plus nombreuses afin d'actualiser la probabilité d'apparition de A, par la vraisemblance (probabilité conditionnelle fréquentiste) de ces observations, lui confère une « objectivité » plus grande, étant donné le poids croissant accordé à ces observations.* »

L'approche choisie dans cette recherche est donc bien une **approche bayésienne** dans laquelle les probabilités bayésiennes sont des mesures du degré de connaissances *a priori* et représentent la traduction chiffrée de cet état de connaissance (FAURE, 2013). L'utilisation de l'approche bayésienne, et plus exactement celle des réseaux bayésiens qui sont l'outil opérationnel pour la mise en pratique de cette approche, présente plusieurs intérêts manifestes dans le cadre des besoins de cette recherche.

Premièrement, l'approche bayésienne est plus **robuste** dans des contextes de manque de données (KOOP, 2003) que l'approche fréquentiste. Cette considération est importante dans le cas de la présente étude où le manque de données est avéré. Les dires d'expert identifiés comme une source de données pour l'élaboration du modèle trouvent parfaitement leur place dans les approches subjectives *stricto sensu* et bayésiennes car elles permettent l'évaluation de probabilités *a priori* (PEYRAS, 2002, p. 31).

Deuxièmement, l'approche bayésienne permet d'avoir un **raisonnement bidirectionnel** c'est-à-dire une lecture prédictive (des causes vers les effets) et une lecture diagnostique (des effets vers les causes) (BUXTON *et al.*, 2010; JENSEN, 2001; NEAPOLITAN, 2004). La prévision permet la détermination des conséquences probables à partir des causes connues, et le diagnostic permet la détermination des causes probables à partir des conséquences connues (NAÏM *et al.*, 2011, p. 65). Cette double utilisation d'un même réseau bayésien est intéressante dans la mesure où elle permet, en plus de l'objectif initial de déterminer les conséquences sur l'exploitation d'un risque inondation caractérisé en intensité, de déterminer pour un mode dégradé fixé d'exploitation les composants défaillants qui imposent ce mode de fonctionnement dégradé.

Troisièmement, (BENSI, 2010, p. 4) mobilise les réseaux bayésiens pour l'**analyse des impacts du risque sismique** sur des systèmes de transport ferré et met en avant plusieurs avantages de l'approche bayésienne quant à leur utilisation dans le cadre de la gestion des risques :

- un réseau bayésien est un outil graphique intuitif et efficace pour la représentation et l'évaluation du fonctionnement d'un système dans un contexte d'incertitudes⁴ ;
- un réseau bayésien peut servir à modéliser plusieurs types d'aléas et leurs interdépendances⁵ ;
- l'interface graphique d'un réseau bayésien en fait un bon outil pour l'utilisation par des praticiens qui ne sont pas experts dans le domaine de l'analyse probabiliste et facilite l'échange entre eux⁶ ;
- la capacité des réseaux bayésiens à intégrer de nouvelles données et à mettre à jour la modélisation du système en fait un bon outil pour l'évaluation de plusieurs scénarios de conception ou de réponse du système en situation de crise⁷.

Ces avantages de l'approche bayésienne se recourent tout à fait avec les besoins spécifiés dans le cahier des charges fonctionnel du modèle quantitatif probabiliste.

Enfin, cette approche bénéficie actuellement d'**un grand nombre d'applications** scientifiques similaires à celle construite dans cette recherche. De nombreuses applications existent, en effet, dans le cas de l'évaluation de l'impact de risques, naturels ou non, sur des infrastructures critiques : chutes de roches sur le réseau de transport routier (STRAUB, 2005), risques d'accidents de personnes à des passages à niveau de lignes de transport ferroviaire (BOUCHIBA, 2013), risques naturels au niveau de réseaux ferrés (JHA et KEELE, 2012; BENSI, 2010; BENSI *et al.*, 2011) ou plus globalement de réseaux critiques (OH *et al.*, 2010). Ces applications de l'approche bayésienne et de l'approche subjective *stricto sensu* sont d'ailleurs également nombreuses dans le domaine de l'analyse de risque et de la Sûreté de Fonctionnement (WEBER *et al.*, 2012) et dans le génie urbain (KANSO, 2005; PEYRAS, 2002; VUILLET,

4. "A Bayesian network is an efficient and intuitive graphical tool for the representation and assessment of systems under uncertainty".

5. "Bayesian networks can be used to model multiple hazards and their interdependencies".

6. "The graphical interface of the Bayesian network makes it an excellent tool for interaction with and use by practitioners and end-users, who may not be experts in probabilistic system analysis".

7. "The ability to update information makes the Bayesian network an excellent tool for scenario evaluation for design purposes as well as for training/planning exercises for emergency response".

2012). Le projet européen RAIN (2014-2017) pour *Risk Analysis of Infrastructure networks in response to extreme weather* fait également usage des réseaux bayésiens. Ils sont notamment utilisés pour modéliser les débits des écoulements d'eau en fonction des paramètres des bassins versants (topographie, usage des sols, etc.), et permettent ainsi d'identifier l'intensité des inondations (PAPROTYN et MORALES-NAPOLES, 2015; PAPROTYN *et al.*, 2015). Les réseaux bayésiens permettent également d'intégrer les interdépendances entre les systèmes étudiés au travers d'un cadre d'analyse opérationnelle de l'impact d'évènements naturels majeurs sur les réseaux de transport, d'énergie et de télécommunication (HAJIALIZADEH, 2015). Ils permettent alors de quantifier le risque encouru d'ordre économique et social sur les réseaux étudiés et également de déterminer l'apport de mesures de réduction du risque sur les dommages observés (Figure 6.4). Cette dernière application est très proche du modèle quantitatif souhaité dans cette recherche. En revanche, il se distingue des travaux du projet RAIN en ce sens que leur modèle bayésien semble s'arrêter aux dommages physiques sur les réseaux et aux conséquences indirectes engendrées sur la société. La problématique liée à la dégradation du service fourni par ces réseaux durant l'aléa ou après l'aléa n'est pas traité.

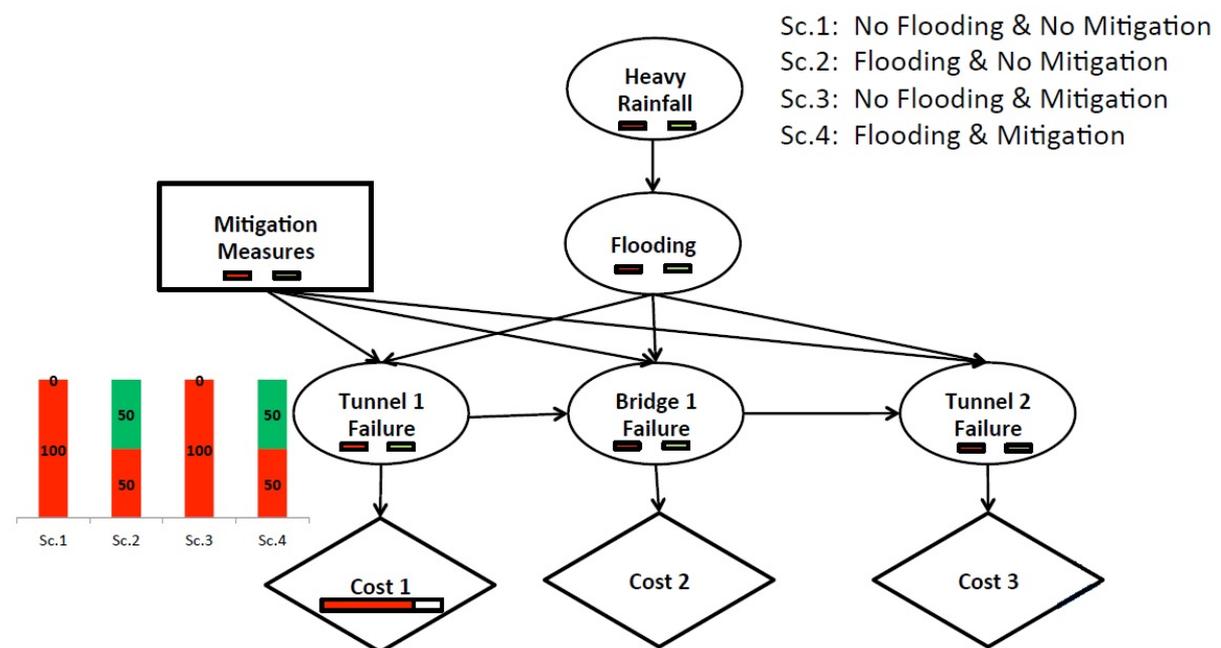


FIGURE 6.4 – Exemple d'application d'un réseau bayésien pour l'analyse du risque de dommages aux infrastructures suite à un risque inondation, dans le cadre du projet européen RAIN (HAJIALIZADEH, 2015)

Cette diversité d'applications de l'approche bayésienne s'explique parce qu'elle permet de modéliser de façon fiable les risques générés par l'occurrence d'aléas naturels, d'intégrer les interdépendances existantes dans les effets qu'engendrent ces risques et d'aider à la planification et à l'organisation de mesures de réduction du risque⁸ (STRAUB, 2005).

Ainsi, les réseaux bayésiens fournissent un cadre formel permettant de traiter des événements probabilistes en les représentant par des variables aléatoires discrètes et de spécifier les relations qui les lient (PEARL, 1988; JENSEN, 2001). La modélisation par réseaux bayésiens se fonde sur un formalisme d'expression des dépendances entre des variables aléatoires multi-états (WEBER et SIMON, 2016). Ce formalisme est donc bien adapté à la représentation de systèmes compliqués ou complexes multi-

8. "Bayesian Networks facilitate the consistent modeling of the risks arising from natural hazards and enhance the understanding of the inter-dependencies of the involved processes and decisions. They also assist the planning and the optimization of risk mitigation and protection measures".

états comme les systèmes de transport guidé soumis à un risque inondation.

Synthèse

Une approche probabiliste est préconisée afin de lier les conséquences matérielles, analysées grâce aux modèles d'interdépendances et d'estimation coût-délai, avec les conséquences fonctionnelles. Cette approche permet également de poursuivre l'orientation choisie pour la démarche méthodologique globale de quantification des effets du risque. Dans ce contexte, les exigences d'un modèle quantitatif sont définies : caractériser globalement les effets du risque inondation depuis l'intensité de l'aléa jusqu'aux dégradations de l'exploitation du système, intégrer tous les événements redoutés provoqués par le risque inondation, et intégrer le grand nombre de sources de données existantes traitant des effets du risque inondation (référentiels techniques, modélisations physiques et connaissance experte). Pour élaborer ce modèle, l'approche bayésienne est préconisée plutôt que l'approche fréquentiste car elle apparaît plus adaptée pour répondre aux exigences scientifiques et pratiques posées.

6.2 Choix méthodologique et construction du modèle quantitatif

6.2.1 Principes de construction d'un modèle probabiliste

Le choix pour le modèle quantitatif se porte sur l'approche bayésienne par l'utilisation des **réseaux bayésiens** particulièrement bien adaptés pour une très large variété de problèmes à résoudre tels que les diagnostics médicaux, la prévision, l'épidémiologie, la robotique et bien d'autres⁹ (DRUZDZEL et DÉEZ, 2003). Grâce à leur structure hiérarchique pour la représentation du système et la possibilité de prendre en compte des caractéristiques spatiales et temporelles des aléas et des conséquences observées, ils sont ordinairement utilisés comme des outils pour l'évaluation des risques¹⁰ (FABER, 2007). Dans la continuité du modèle d'interdépendances et du modèle d'estimation coût-délai, le modèle quantitatif a tout intérêt à se baser sur les réseaux bayésiens car (GONZVA *et al.*, 2016e) :

- ils reprennent une structure hiérarchique similaire pour représenter le système de transport guidé : un système, divisé en sous-systèmes, eux-mêmes divisées en composants ;
- ils sont capables d'intégrer les interdépendances entre les composants identifiées avec le modèle d'interdépendances ;
- ils ont un fonctionnement théorique basé sur les relations causales de façon similaire aux graphes d'évènements causaux ayant servi à la représentation des résultats du modèle d'interdépendances.

Les **réseaux bayésiens** sont donc utilisés en cohérence avec les méthodes précédemment mobilisées de Sûreté de Fonctionnement.

9. "Directed graphical probabilistic models have been successfully applied to a variety of problems, including medical diagnosis, prognosis, and therapy planning, epidemiology, machine diagnosis, user interfaces, natural language interpretation, planning, vision, robotics, data mining, and many others".

10. "Due to the hierarchical structure of the system representation and the temporally and spatially varying characteristics of exposure events and consequences the risk assessment is greatly supported by the Bayesian probability theory and modern risk assessment tools such as e.g. Bayesian Probabilistic Nets".

De plus, le réseau bayésien est construit dans le cas d'un système de transport guidé de type **ferroviaire classique**; les données permettant de faire fonctionner le modèle sont, en effet, essentiellement issues de référentiels techniques, de maquettes physiques et de connaissance experte sur ces deux types de systèmes de transport guidé. L'objectif de l'élaboration de ce réseau bayésien est **de montrer l'intérêt et la puissance d'un modèle probabiliste dans l'aide à la réflexion pour l'élaboration de stratégies globales de résilience** et c'est la raison pour laquelle cet objectif est illustré pour un certain type de système de transport guidé et non tous les systèmes de transport guidé.

6.2.1.1 Présentation des réseaux bayésiens

6.2.1.1.1. Théorème de Bayes

Les réseaux bayésiens tiennent leur nom du théorème de Bayes. Ce théorème, formulé par Thomas Bayes au XVIII^{ème} siècle, énonce des probabilités conditionnelles¹¹ : étant donné deux événements A et B, le théorème de Bayes permet de déterminer la probabilité de A sachant B, si l'on connaît les probabilités de A, de B et de B sachant A. La formule est alors la suivante (Équation 6.1) :

$$P(A | B) = \frac{P(B | A) \times P(A)}{P(B)} \quad (6.1)$$

Le terme $P(A)$ est la probabilité *a priori* de A et le terme $P(B)$ est la probabilité *a priori* de B (non nulle). Elles sont « antérieures » au sens qu'elles précèdent toute information sur A et B, respectivement. Le terme $P(A|B)$ est appelé la probabilité *a posteriori* de A sachant B (GOLDFARB et PARDOUX, 2011, p. 140). Elle est « postérieure » au sens qu'elle dépend directement de B. La formule des probabilités totales généralise la formule de Bayes comme suit (Équation 6.2) :

$$P(B) = \sum_{n \geq 1} P(B | A_n) \times P(A_n) \quad (6.2)$$

Pour tout événement B, le terme $P(B)$ est la probabilité *a priori* de B. (A_n) constitue un système complet de n (entier naturel) événements c'est-à-dire une partition de l'ensemble des événements (appelé univers dans le vocabulaire probabiliste), tous de probabilité non nulle.

Ainsi, grâce aux opérations usuelles sur les probabilités et au théorème de Bayes, toutes les probabilités *a posteriori* dans un réseau bayésien peuvent être calculées (NAÏM *et al.*, 2011, p. 93).

6.2.1.1.2. Définition d'un réseau bayésien

Un réseau bayésien est un graphe acyclique dans lequel les **nœuds** représentent des **variables aléatoires** et les **liens** représentent des **dépendances** entre les variables (PEARL, 1988; NAÏM *et al.*, 2011, p. 73) (Figure 6.5). Ce réseau permet de calculer toutes les probabilités conditionnelles (ou *a posteriori*) d'événements reliés les uns aux autres par des relations de cause à effet (NAÏM *et al.*, 2011, p. 22). Chaque nœud peut donc prendre plusieurs valeurs.

Chaque nœud *parent* (X_1, X_2 et X_3 dans la Figure 6.5) contient une loi de probabilité et chaque nœud *enfant* (X_4, X_5 et X_6 dans la Figure 6.5) contient une description de la variable associée soit sous la forme d'une équation déterministe de ses nœuds parents, soit sous la forme d'une **Table de Probabilités Conditionnelles** (CPT pour *Conditional Probabilities Table*). A titre d'exemple, la CPT relative au

11. Bayes T. (1763). « An Essay towards solving a Problem in the Doctrine of Chances », *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*.

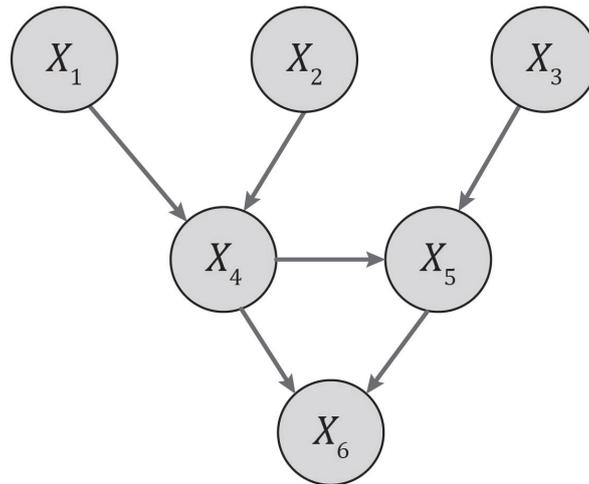


FIGURE 6.5 – Exemple de réseau bayésien contenant 6 nœuds (source : auteur)

nœud X_4 de la Figure 6.5 est présentée en Figure 6.6 ; les nœuds parents X_1 et X_2 présentent deux valeurs possibles « absent » et « présent », le nœud X_4 présente deux valeurs également qui sont « vrai » et « faux » et dont les probabilités dépendent de la valeur des nœuds parents.

		X_4	
X_1	X_2	<i>Vrai</i>	<i>Faux</i>
<i>Absent</i>	<i>Présent</i>	0,40	0,60
<i>Absent</i>	<i>Absent</i>	0,50	0,50
<i>Présent</i>	<i>Absent</i>	0,60	0,40
<i>Présent</i>	<i>Présent</i>	1	0

FIGURE 6.6 – Exemple de Table de Probabilités Conditionnelles (CPT) d'un nœud d'un réseau bayésien possédant deux nœuds parents (source : auteur)

Deux étapes sont traditionnellement nécessaires pour construire un réseau bayésien : définir le graphe du modèle avec les nœuds et les liens puis définir les tables de probabilités de chaque variable, conditionnellement à ses causes (c'est-à-dire ses nœuds parents).

6.2.1.2 Définition du graphe relatif au modèle quantitatif

6.2.1.2.1. Nœuds et arcs

Dans le cas d'un système de transport guidé implanté en aérien, en surface ou en souterrain et soumis à un risque inondation, trois catégories de nœuds sont identifiées (Figure 6.7) :

1. des **nœuds relatifs à l'aléa inondation** : ces nœuds correspondent à des grandeurs physiques permettant de caractériser l'intensité de l'aléa étudié ;
2. des **nœuds relatifs aux composants du système** : ces nœuds représentent chacun les composants constitutifs du système de transport guidé étudié (nœud « rail », nœud « caténaire », etc.) ;
3. un **nœud relatif à l'exploitation du système** : ce nœud permet de caractériser le mode d'exploitation du système, du mode nominal en situation normale à des modes dégradés en situation de crise c'est-à-dire lors de l'occurrence d'une inondation.

De plus, trois catégories de liens sont définies (Figure 6.7) :

1. une première catégorie **des nœuds de l'aléa vers les nœuds composants** : ces arcs indiquent que chaque composant peut être impacté par l'aléa ce qui correspond à une probabilité d'être défaillant. Autrement dit, les caractéristiques d'intensité de l'aléa influencent l'état de fonctionnement de chaque composant ;
2. une deuxième catégorie **parmi les nœuds composants** : ces arcs mettent en évidence les interdépendances entre les composants c'est-à-dire les relations fonctionnelles qui existent entre certains d'entre eux. Par exemple, une relation de dépendance existe entre le nœud « caténaire » et le nœud « matériel roulant » puisque si la caténaire est défaillante, elle ne fournit plus l'énergie de traction au matériel roulant qui est alors considéré défaillant de façon indirecte car il n'est plus apte à assurer ses fonctions. Les arcs se basent sur les relations de dépendance mises en avant pendant l'étape de l'analyse fonctionnelle d'un système de transport guidé (cf. chapitre 3) ;
3. une troisième catégorie **des nœuds composants vers le nœud exploitation** : ces arcs indiquent que le service fourni par le système de transport est dépendant de l'état de fonctionnement de tous les composants.

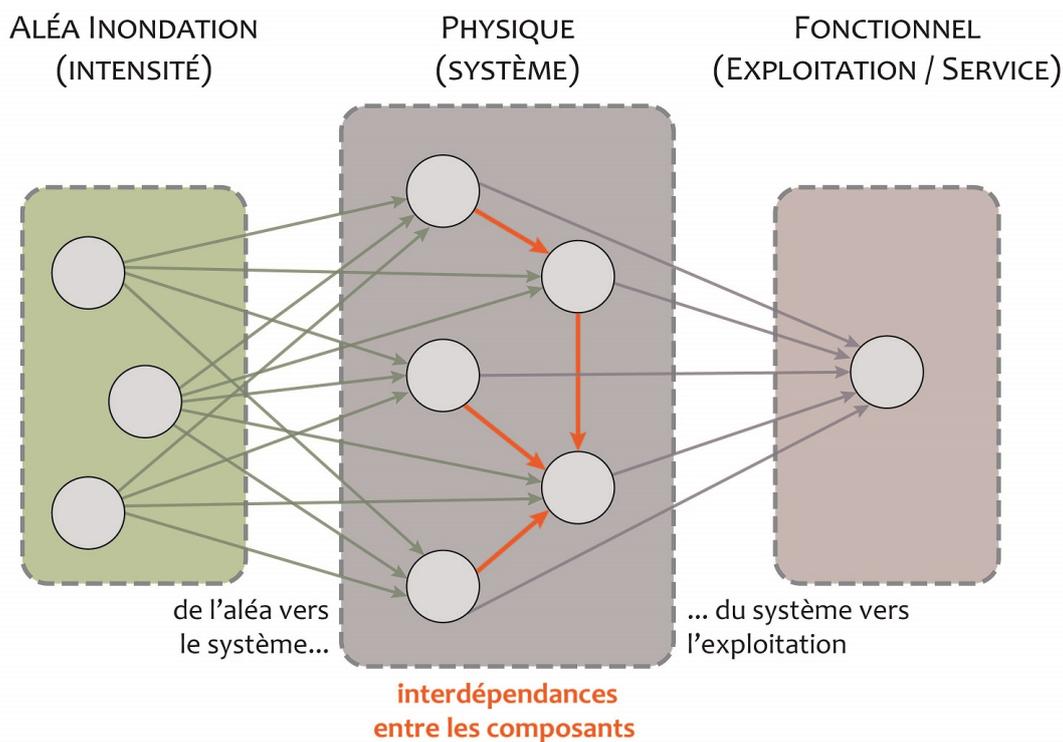


FIGURE 6.7 – Principes de construction du graphe relatif au modèle quantitatif de caractérisation de l'impact du risque inondation sur un système de transport guidé (GONZVA *et al.*, 2016e)

Une hypothèse forte qui est faite dans cette recherche est celle de l'**indépendance entre les nœuds relatifs à l'aléa**. Il est, en effet, considéré implicitement (pas de liens entre eux dans le réseau bayésien) que les paramètres qui caractérisent l'intensité de l'aléa ne sont pas liés : hauteur d'eau, durée, etc. Cette indépendance se justifie ici par le fait que ce n'est pas l'aléa qui est étudié ici mais les impacts de celui-ci sur le système. Dès lors, pour étudier ces impacts à l'échelle du système, l'indépendance de la hauteur d'eau, de la vitesse d'écoulement des eaux, de la durée d'immersion, etc. est recevable puisque ce qui importe ce sont les valeurs prises par ces paramètres et non pas leurs éventuels liens.

De plus, il est nécessaire de déterminer pour chacun des nœuds du graphe les valeurs qu'ils peuvent

prendre. Autrement dit, préciser pour chacune des variables aléatoires relatives à l'aléa, aux composants du système et aux modes d'exploitation l'ensemble des valeurs qu'elles sont susceptibles de prendre afin de permettre une caractérisation du risque.

6.2.1.2.2. Valeurs prises par les nœuds

Premièrement, pour l'aléa inondation, les nœuds suivants ainsi que les valeurs qu'ils peuvent prendre sont sélectionnés (Figure 6.8a et Figure 6.8b) :

- la **durée d'immersion** : ce nœud correspond à la durée de l'inondation du système de transport afin de traduire le délai pendant lequel celui-ci subit l'aléa. Une valeur seuil est identifiée : 24h. Cette valeur provient de dires d'experts selon lesquels plusieurs types de composants sont considérés comme défaillants au-delà de 24 heures d'immersion ;
- la **hauteur d'eau** : ce nœud correspond à la hauteur d'eau présente au niveau des composants. L'implantation d'un système de transport guidé étant variable, selon la configuration aérienne, de surface et souterraine mais aussi la topographie du terrain, il est choisi de caractériser les valeurs que peut prendre ce nœud à partir de valeurs relatives au système plutôt qu'à partir de valeurs absolues. Ces valeurs, notamment issues des référentiels techniques ferroviaires sont : inférieure au niveau bas de la banquette de ballast, égale au niveau bas de la banquette de ballast, égale au niveau bas de la traverse, égale au niveau bas du rail (le patin), égale au niveau haut du rail (le champignon), égale au niveau du quai, supérieure au niveau du quai. Ce découpage peut être amené à évoluer, en réduisant ou augmentant ces catégories, selon le niveau de détail souhaité.

H_eau	
< niv. inf. banquette	14.3
niv. inf. banquette	14.3
niv. inf. traverse	14.3
niv. inf. rail (patin)	14.3
niv. sup. rail (champ.)	14.3
niv. du quai	14.3
> niv. du quai	14.3

(a) Nœud aléa « hauteur d'eau »

D_imm	
<24h	52.4
>24h	47.6

(b) Nœud aléa « durée d'immersion »

FIGURE 6.8 – Exemple de nœuds propres à l'aléa dans le réseau bayésien relatif au modèle quantitatif de caractérisation de l'impact du risque inondation sur un système de transport guidé (source : auteur)

Il est important de signaler que les deux paramètres considérés dans cette recherche comme caractéristiques de l'intensité de l'aléa sont indépendants. Cela signifie que la distribution de probabilité des hauteurs d'eau est indépendante de la distribution de probabilité de la durée d'immersion, et inversement. Cette hypothèse prise est forte car ces paramètres d'aléa tels que la hauteur d'eau, le débit d'eau, la vitesse d'écoulement, la durée d'immersion, etc. sont ordinairement corrélés dans le domaine de l'hydrologie et de l'hydraulique. Considérer uniquement ces deux grandeurs pour caractériser le risque inondation et les étudier indépendamment peut alors se justifier de la façon suivante dans cette approche préliminaire d'usage des réseaux bayésiens : **le modèle quantitatif permet d'évaluer l'impact de « scénarios d'aléa inondation » en associant à une hauteur et une durée d'immersion données, un niveau d'endommagement matériel et un niveau d'endommagement fonctionnel du système.** La problématique du lien entre les paramètres de l'aléa n'est donc pas le rôle principal du modèle qui est bien centré sur le système et ses défaillances.

Deuxièmement, pour les composants du système, les nœuds suivants sont sélectionnés :

- rail ;

- traverse ;
- appareil de voie ;
- ballast ;
- pylône (support de caténaire) ;
- caténaire ;
- mécanisme permettant la mise en mouvement de l'appareil de voie ;
- matériel roulant ;
- détecteurs et balises de signalisation ;
- câbles de signalisation ;
- plateforme (cas de la configuration d'implantation en surface) ;
- infrastructure (cas de la configuration d'implantation en souterrain) ;
- superstructure (cas de la configuration d'implantation en aérien).

L'ensemble des 24 (ou 25) composants identifiés lors de l'analyse structurelle réalisée pour un système de transport guidé dans les trois configurations d'implantation usuelle (cf. [chapitre 2](#)) ne sont pas tous représentés dans le réseau bayésien par un nœud propre. Le choix est fait de ne conserver que les composants dont la défaillance n'entraîne pas une réponse binaire du système, à savoir le mode de fonctionnement nominal ou un arrêt total. L'objectif du réseau bayésien et plus généralement de ce modèle quantitatif probabiliste est en effet d'**obtenir une caractérisation totale du risque inondation dans une optique de formalisation d'un fonctionnement en mode dégradé, d'adaptation du service fourni par le système selon l'aléa et d'adaptation du service fourni par le système selon les composants défaillants.**

C'est donc bien cette notion de fonctionnement « intermédiaire » qui est privilégié dans une logique de résilience : la relation entre la demande de service et la capacité du système à y répondre, et la diminution de la sollicitation faite à un système pour permettre de le maintenir en fonctionnement et de le protéger afin qu'il se rétablisse plus rapidement sont autant d'éléments d'appréciation de la résilience d'un système technico-fonctionnel ([BARROCA et SERRE, 2013](#)) et autant d'axes d'amélioration de celle-ci.

De plus, deux valeurs peuvent être prises par les nœuds composants : « non atteint » et « envoyé totalement » ([Figure 6.9](#)). La première valeur correspond donc à un composant capable d'assurer sa ou ses fonctions tandis que la seconde valeur traduit un composant défaillant c'est-à-dire ne pouvant plus réaliser sa ou ses fonctions. La logique est fonctionnelle dans ce modèle quantitatif dans la mesure où une probabilité égale à 1 pour la valeur « envoyé totalement » d'un composant donné ne signifie pas que celui-ci nécessite d'être remplacé à l'identique dans une optique de remise en état. Elle indique simplement que le risque inondation est tel qu'il empêche le composant de fonctionner de façon nominale c'est-à-dire pour réaliser ses missions.

Rail	
non atteint	57.1
envoyé totalement	42.9

FIGURE 6.9 – Exemple du nœud composant « rail » dans le réseau bayésien relatif au modèle quantitatif de caractérisation de l'impact du risque inondation sur un système de transport guidé (source : auteur)

Un autre nœud relatif à la **pente longitudinale** de la voie ferrée est ajouté au modèle ([Figure 6.10](#)). En effet, ce paramètre concernant la conception du système de transport est pertinent à intégrer dans le réseau bayésien, comparativement à la vitesse d'écoulement des eaux par exemple, car le

phénomène de transport de ballast se définit plus justement à partir de relations entre hauteur d'eau et pente longitudinale (PAMS CAPOCCIONI *et al.*, 2012, 2015). Ce choix de privilégier un nœud « pente longitudinale » plutôt que « vitesse d'écoulement » n'est d'ailleurs aucunement source d'une perte d'informations dans la mesure où les équations relatives à l'hydraulique établissent des liens directs entre vitesse, hauteur et pente ainsi qu'entre débit et pente. (PAMS CAPOCCIONI *et al.*, 2015). Ce nœud peut prendre trois valeurs : une pente inférieure à 1 %, une pente comprise entre 1 % et 1,5 % et une pente supérieure à 1,5 %. Ces valeurs proviennent des résultats du projet de recherche IBER décrit précédemment (PAMS CAPOCCIONI *et al.*, 2015) (cf. paragraphe 6.1.1.2.3).

Il est à noter que dans le modèle qui est probabiliste, les valeurs de pente seront considérées sous forme de probabilité. Or, la pente longitudinale n'a pas, par exemple, une probabilité de 0,33 d'être inférieure à 1 %, 0,33 d'être comprise entre 1 % et 1,5 % et 0,33 d'être supérieure à 1,5 %. Elle est, bien entendu, un paramètre de conception déterminé. Voilà pourquoi pour plus de cohérence avec la réalité dans l'utilisation du réseau bayésien et des calculs réalisés, ce paramètre présente une des trois valeurs fixée à une probabilité égale à 1.

Pente	
< 1%	100
1% < p < 1,5%	0
> 1,5%	0

FIGURE 6.10 – Exemple du nœud « pente longitudinale » dans le réseau bayésien relatif au modèle quantitatif de caractérisation de l'impact du risque inondation sur un système de transport guidé (source : auteur)

Troisièmement, pour le nœud relatif à l'exploitation, le nœud est défini avec les valeurs sélectionnées suivantes (Figure 6.11) :

- vitesse d'exploitation nominale ;
- vitesse d'exploitation réduite à 10 km/h ;
- vitesse d'exploitation réduite à 30 km/h ;
- vitesse d'exploitation réduite à 40 km/h ;
- vitesse d'exploitation réduite à 100 km/h ;
- arrêt de l'exploitation.

ER	
arrêt	88.1
V_10	0
V_30	2.38
V_40	0
V_100	0
V_nom.	9.52

FIGURE 6.11 – Exemple du nœud correspondant à l'exploitation dans le réseau bayésien relatif au modèle quantitatif de caractérisation de l'impact du risque inondation sur un système de transport guidé (source : auteur)

Le choix est fait de décrire les dégradations du service fourni par le système de transport guidé soumis à un risque inondation au travers des **réductions de vitesses**. Ce choix est principalement guidé par les données provenant des référentiels techniques, de résultats produits à partir d'essais sur des maquettes physiques et de la connaissance experte qui associent ordinairement l'impact du risque inondation à des réductions temporaires de vitesses de circulation des trains. Au vu du peu de données relatives à l'impact fonctionnel du risque inondation, c'est donc à l'aide d'une distribution de probabilité discrète des vitesses d'exploitation que cet impact est caractérisé. Néanmoins, un fonctionnement en mode dégradé d'un système technico-fonctionnel tel qu'un système de transport guidé

revêt d'autres facettes car la dégradation du service peut prendre d'autres formes : non desserte de certaines gares, diminution du nombre de trains en circulation, etc. Cette multiplicité du fonctionnement en mode dégradé est développée de façon plus complète dans le [chapitre 7](#).

Par ailleurs, la **granulométrie** du réseau bayésien est identique à celle choisie dans l'ensemble de cette recherche : le **composant**. Ce choix donne de la cohérence à l'ensemble du travail et des modèles successivement développés. Cependant, comme c'est le cas pour le modèle d'interdépendances et le modèle d'estimation coût-délai, le modèle quantitatif basé sur un réseau bayésien peut tout aussi bien être élaboré à l'échelle plus large du sous-système ou à l'échelle plus fine du sous-composant.

Finalement l'ensemble de ce réseau bayésien est conçu avec le logiciel Netica¹² qui est considéré comme un des logiciels les plus utilisés actuellement ([JHA et KEELE, 2012](#)).

6.2.1.3 Remplissage des tables de probabilités conditionnelles (CPT)

La deuxième étape, une fois que l'ensemble des nœuds est défini ainsi que les valeurs qu'ils peuvent chacun prendre, est de remplir les CPT ([Figure 6.12](#)). Celles-ci respectent les caractéristiques suivantes :

- les CPT sont remplies à l'aide des référentiels techniques, des résultats issus d'essais sur des maquettes physiques et de la connaissance experte recueillie ;
- chaque CPT est entrée manuellement dans la mesure où la dépendance entre deux nœuds n'est jamais décrite aisément par une équation déterministe par exemple.

LAC	MR	ADV	Rail	Traverse	PF	Ballast	Signalo_detecteurs	Mecanisme_ADV	Signalo_cables	ER
OK	non atteint	non atteint	non atteint	non atteinte	non atteinte	non atteint	non atteint	non atteint	non atteint	V_nom.
OK	non atteint	non atteint	non atteint	non atteinte	non atteinte	non atteint	non atteint	non atteint	envoye totalement	V_nom.
OK	non atteint	non atteint	non atteint	non atteinte	non atteinte	non atteint	non atteint	envoye totalement	non atteint	V_nom.
OK	non atteint	non atteint	non atteint	non atteinte	non atteinte	non atteint	non atteint	envoye totalement	envoye totalement	V_nom.
OK	non atteint	non atteint	non atteint	non atteinte	non atteinte	non atteint	envoye totalement	non atteint	non atteint	V_30
OK	non atteint	non atteint	non atteint	non atteinte	non atteinte	non atteint	envoye totalement	non atteint	envoye totalement	V_30
OK	non atteint	non atteint	non atteint	non atteinte	non atteinte	non atteint	envoye totalement	envoye totalement	non atteint	V_30
OK	non atteint	non atteint	non atteint	non atteinte	non atteinte	non atteint	envoye totalement	envoye totalement	envoye totalement	V_30
OK	non atteint	non atteint	non atteint	non atteinte	non atteinte	envoye totalement	non atteint	non atteint	non atteint	V_40

FIGURE 6.12 – Exemple de la CTP correspondant au nœud exploitation dans le réseau bayésien relatif au modèle quantitatif de caractérisation de l'impact du risque inondation sur un système de transport guidé (source : auteur)

Le modèle quantitatif est donc à cette étape totalement construit pour chacune des trois configurations d'implantation du système de transport guidé ([Figure 6.13](#)).

6.2.1.4 Domaine de validité spatiale et temporelle du modèle quantitatif

Le modèle quantitatif décrit les impacts fonctionnels du risque inondation sur un système de transport guidé en fonction des réductions de vitesses. La question est de connaître la validité spatiale et temporelle de ces résultats.

En ce qui concerne l'aspect **temporel** des résultats du modèle quantitatif, le domaine de validité est **global** car il couvre la phase avant l'inondation, pendant l'innovation et après l'inondation ([Tableau 6.2](#)).

12. Netica, Norsys Software Corporation, www.norsys.com.

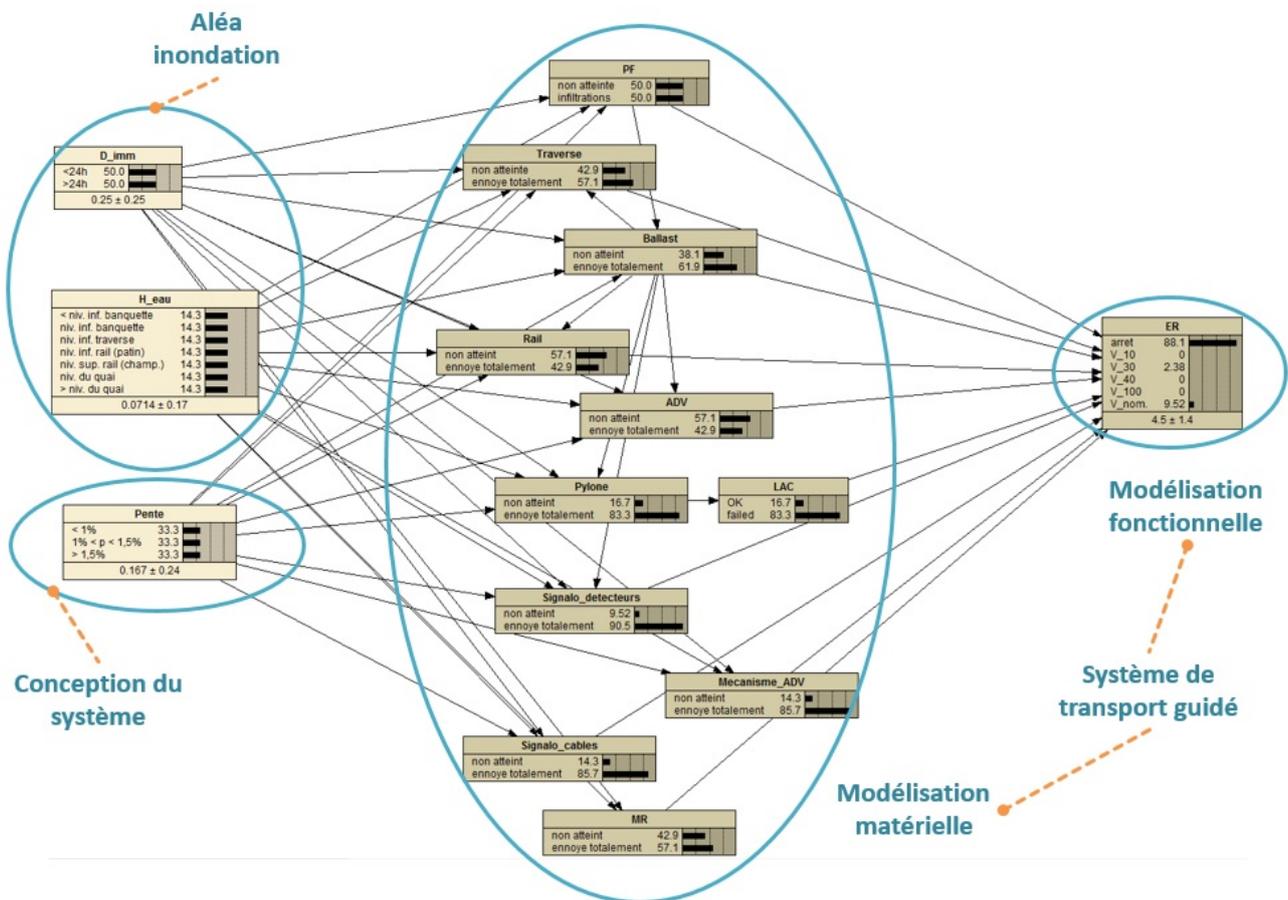


FIGURE 6.13 – Modèle quantitatif associé à la configuration d'implantation en surface (source : auteur)

Premièrement, l'utilisation du modèle en prévisionnel permet d'anticiper les dégradations de performance relatives à des réductions de vitesses avant que l'inondation ne survienne ; deuxièmement, le modèle utilisé en prévisionnel permet de modifier les paramètres de l'aléa selon ses évolutions dans le temps (par exemple : une augmentation de la hauteur d'eau en phase de crue, diminution de celle-ci en phase de décrue, augmentation de la durée de la crue et donc de la durée d'immersion du système, etc.) et ainsi de prédire les réductions de vitesses imposées par les dommages matériels ; troisièmement, le modèle utilisé en prévisionnel en fixant par exemple à 1 (ou à 0) la probabilité de défaillance (ou non) constatée de composants suite au passage de l'inondation donne un aperçu de la dégradation de service. Pour ce dernier cas, l'utilisation inverse en usage de diagnostic permet d'identifier les composants les plus susceptibles d'être défaillants lorsque sont fixées les probabilités de vitesses réduites. Cette utilisation est valide pendant l'inondation et après l'inondation dès lors, en fait, que le service ne peut plus être assuré de façon certaine (probabilité égale à 1) à vitesse nominale.

La validité **spatiale** des résultats du modèle quantitatif tant en usage prévisionnel que de diagnostic est plus complexe à appréhender que la validité temporelle. Se pose en effets la question de l'échelle spatiale sur laquelle les impacts fonctionnels, traduits en réduction de la vitesse de circulation des trains, sont valables à partir d'une série de composants défaillants de type ponctuel (pylônes supports de la caténaire, appareil de voie, etc.) et/ou linéaire (rail, caténaire, etc.). A l'inverse, l'interrogation est également de rigueur pour déterminer le zonage spatial dans lequel se trouvent les composants susceptibles d'être défaillants dès lors qu'est fixée une distribution de probabilité de vitesses d'exploitation.

L'hypothèse de validité des données d'aléa peut être faite, dans une approche préalable, à partir des données issues de retours d'expérience d'inondation sur des systèmes de transport guidé. Il est, en effet, possible de considérer que les systèmes touchés le sont ordinairement entre plusieurs centaines de mètres et plusieurs kilomètres ce qui semble suggérer que l'intensité de l'aléa, et donc ses paramètres, sont identiques sur ces échelles spatiales. Bien que les impacts des grands épisodes d'inondation sur le réseau ferré ne sont pas aujourd'hui répertoriés dans une base de données dédiée (**PAMS CAPOCCIONI *et al.*, 2013a**), quelques exemples historiques étayaient cette hypothèse de validité spatiale :

- environ 1 km de remblai endommagé sur la ligne, aujourd'hui abandonnée, de Paulhan à Montpellier suite à des inondations durant l'automne 1907 (**PAMS CAPOCCIONI *et al.*, 2013a**) ;
- environ 400 mètres de double voie électrifiée sur la ligne Narbonne-Toulouse endommagée à Villedaigne en 1999 (**VINET, 2003**, p. 122) ;
- environ 3 km endommagés sur la ligne entre La Rochelle et Rochefort en 2010 ;
- environ 100 mètres endommagés sur la ligne Toulouse à Bayonne durant la crue du Gave de Pau en 2013.

Un accès ainsi qu'une analyse fine des 300 événements remarquables à l'échelle du territoire national recensés au sein de la Base de Données Historiques sur les Inondations (BDHI) du Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie (**PAMS CAPOCCIONI *et al.*, 2013a**) permettraient de conforter cette hypothèse de travail prise dans cette recherche. Pour être plus conservatif, **l'hypothèse prise pour la validité spatiale de l'aléa et des impacts matériels et fonctionnels est donc de plusieurs centaines de mètres** pour le modèle probabiliste à la fois en usage prévisionnel et diagnostique (**Tableau 6.2**).

TABLEAU 6.2 – Domaine de validité spatiale et temporelle des données d'entrée et de sortie du modèle quantitatif

Domaines de validité	Avant l'inondation		Pendant l'inondation		Après l'inondation	
	Spatiale	Temporelle	Spatiale	Temporelle	Spatiale	Temporelle
Usage prévisionnel	centaine de mètres	total	centaine de mètres	total	centaine de mètres	total
Usage diagnostique	X	X	centaine de mètres	total	centaine de mètres	total

Synthèse

Le modèle quantitatif repose sur l'utilisation d'un réseau bayésien. Un réseau bayésien est un graphe acyclique dans lequel les nœuds représentent des variables aléatoires et les liens représentent des dépendances entre les variables. Trois types de nœuds sont définis : les nœuds relatifs à l'intensité de l'aléa inondation, les nœuds relatifs à l'état des composants du système, et un nœud relatif aux modes d'exploitation du système. Trois types de dépendance sont également définis : de l'aléa vers les composants, traduisant le fait que chaque élément est susceptible d'être touché ; entre les composants, mettant en avant leurs interdépendances ; et, des composants vers l'exploitation, pour donner un aperçu du service fourni selon l'état de l'ensemble des composants. Enfin, les règles de dépendance entre les nœuds sont établies à partir des tables de probabilités conditionnelles afin de faire « tourner » le réseau bayésien. Le réseau permet ainsi de déduire une distribution de probabilité de dégradation de l'exploitation en fonction des vitesses de circulation des trains. Cette modélisation peut être utilisée pour fournir une aide à la prévision et au diagnostic du système à toutes les phases du risque et est considérée comme valable spatialement sur des tronçons ferroviaires de plusieurs centaines de mètres environ.

6.3 Utilisation du modèle quantitatif

Le modèle est testé pour un choix arbitraire de système de transport guidé alimenté à chaque fois par ligne aérienne (caténaire) et non par troisième rail.

6.3.1 Lecture prévisionnelle

La première utilisation qui est faite du modèle quantitatif probabiliste basé sur les réseaux bayésiens est **prévisionnelle**. Le principe est, dans ce cadre, de fixer les probabilités des causes pour en déterminer celles des conséquences. Autrement dit, il s'agit de fixer les probabilités de l'aléa inondation pour en déduire les probabilités conditionnelles de dégradation du service fourni. Le réseau bayésien étant un outil dynamique calculant quasiment instantanément les probabilités, seulement quelques cas sont présentés dans une optique de démonstration des possibilités de l'outil et à des fins comparatives des trois configurations d'implantation.

Dans le sens de la prévision, le modèle quantitatif est testé avec trois distributions de probabilité de hauteur d'eau et de durée d'immersion :

- une distribution de probabilité des hauteurs d'eau centrée sur une valeur de hauteur **faible** à savoir inférieure au niveau bas de la banquette de ballast ;
- une distribution de probabilité des hauteurs d'eau centrée sur une valeur de hauteur **moyenne** à savoir au niveau inférieur du rail (patin) ;
- une distribution de probabilité des hauteurs d'eau centrée sur une valeur de hauteur **élevée** à savoir supérieure au niveau du quai ;
- une probabilité de durée d'immersion inférieure à 24h fixée à 0,8.

Dans une optique de comparaison, la pente longitudinale est fixée pour les trois configurations de système à strictement inférieure à 1 %.

Les résultats obtenus pour les probabilités conditionnelles de vitesse d'exploitation sont synthétisés en [Figure 6.14](#). Quelques conclusions peuvent être observées :

- pour une distribution de probabilité de hauteur d'eau à un niveau **faible** (inférieure au niveau bas de la banquette de ballast), **les trois configurations présentent des résultats similaires** avec en particulier une probabilité de circuler en vitesse nominale égale à 0,6 ;
- pour une distribution de probabilité de hauteur d'eau à un niveau **élevé** (supérieure au niveau du quai), **les trois configurations présentent des résultats similaires** avec une probabilité d'arrêt de la circulation quasi égale à 1 ;
- pour une distribution de probabilité de hauteur d'eau à un niveau **moyen** (niveau inférieur du rail), **les résultats sont équivalents entre surface et souterrain** avec une probabilité d'environ 0,8 de stopper le système tandis que pour l'aérien, la probabilité de continuer le service est de 0,6 avec en particulier une probabilité de 0,4 d'exploiter à 10 km/h et de 0,16 d'exploiter à 30 km/h.

La **configuration en aérien semble donc présenter un avantage comparativement aux deux autres configurations** lorsqu'il s'agit de maintenir le service, à vitesse réduite certainement, en cas d'inondation. Ce résultat est assez cohérent dans la mesure où un système positionné en aérien est mieux préservé face au risque inondation. De plus, dans les cas extrêmes de distributions centrées sur des hauteurs d'eau de niveau faible et élevé, les résultats en matière de probabilités de vitesse sont aussi tout à fait réalistes.

A noter, cependant, que pour une variation de la probabilité de la durée d'immersion du système, en maintenant les autres probabilités identiquement, cette distribution de probabilité varie fortement : pour une probabilité de durée d'immersion inférieure à 24h valant 0,5, la probabilité de continuer le service est de 0,6 et pour une probabilité de durée d'immersion inférieure à 24h valant 0,25, la probabilité de maintenir le service n'est plus que de 0,2 environ.

6.3.2 Lecture pour un diagnostic

La seconde utilisation qui est faite du modèle quantitatif probabiliste basé sur les réseaux bayésiens est la réalisation de **diagnostic**. Le principe est, dans ce cas, de fixer les probabilités des effets pour en déterminer celles des causes. Autrement dit, il s'agit de fixer les probabilités de dégradation du service fourni par l'intermédiaire des différentes vitesses d'exploitation possibles du système pour en

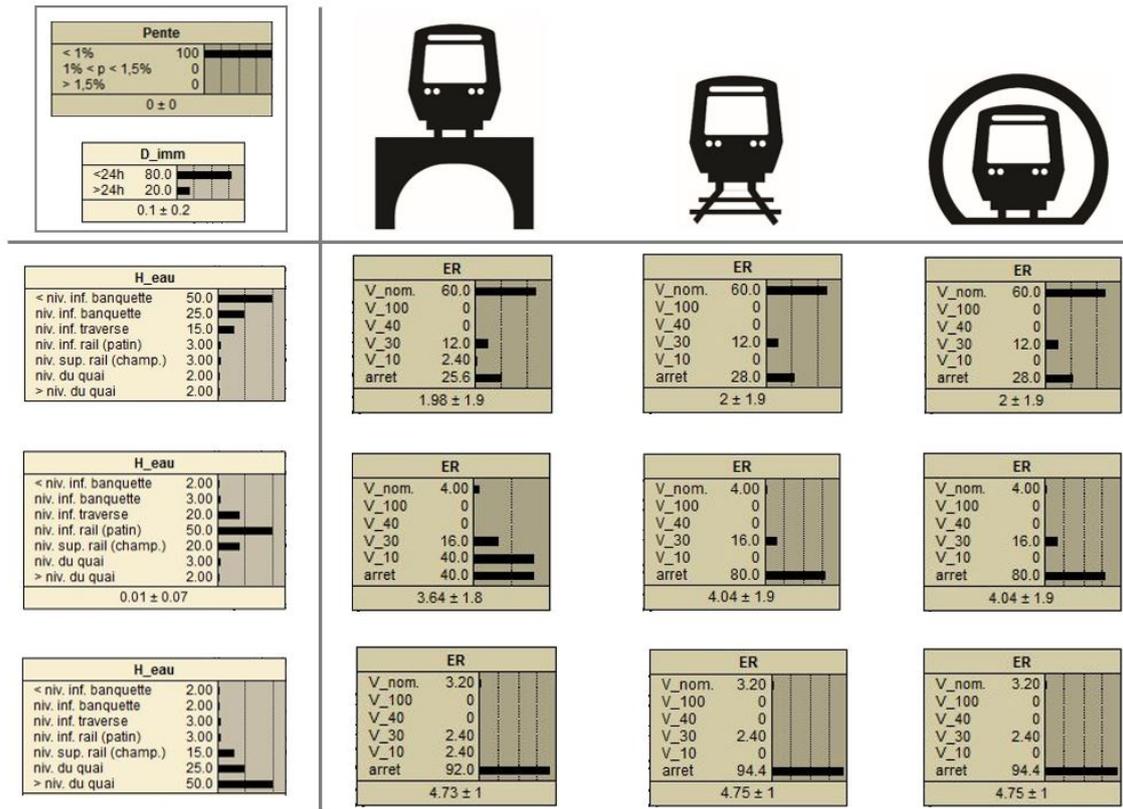


FIGURE 6.14 – Résultats obtenus par le modèle quantitatif en utilisation prévisionnelle pour les trois configurations d'implantation et pour trois distributions de probabilité de hauteur d'eau (source : auteur)

déduire les probabilités conditionnelles de défaillance des composants. Les probabilités conditionnelles de l'aléa ne sont pas relevées car le modèle est construit afin de préciser les liens entre impacts fonctionnels et impacts matériels.

Les probabilités conditionnelles étant là aussi calculer quasi instantanément, seulement quelques cas sont présentés dans une optique de démonstration des possibilités de l'outil en diagnostic et à des fins comparatives des trois configurations d'implantation.

Dans le sens du diagnostic, le modèle quantitatif est testé pour les trois configurations d'implantation avec trois distributions de probabilité des vitesses d'exploitation :

- une distribution de probabilité centrée sur une valeur **élevée** de vitesse d'exploitation à savoir la vitesse d'exploitation nominale ;
- une distribution de probabilité centrée sur une valeur **moyenne** de vitesse d'exploitation à savoir la vitesse de 30 km/h ;
- une distribution de probabilité centrée sur une valeur **faible** de vitesse d'exploitation à savoir l'interruption du système.

Dans tous les cas, la pente longitudinale est fixée là aussi pour les trois configurations de système à strictement inférieure à 1 %. Le modèle quantitatif pour la première distribution de probabilité centrée sur une valeur élevée de vitesse d'exploitation est présenté en [Figure 6.15](#). Les neuf modèles relatifs aux autres distributions de probabilité de vitesse d'exploitation et autres configurations d'implantation sont en [Annexe](#).

Quelques conclusions peuvent être déduites de ces neuf cas :

- pour une distribution de probabilité centrée sur une valeur **élevée** de vitesse d'exploitation,

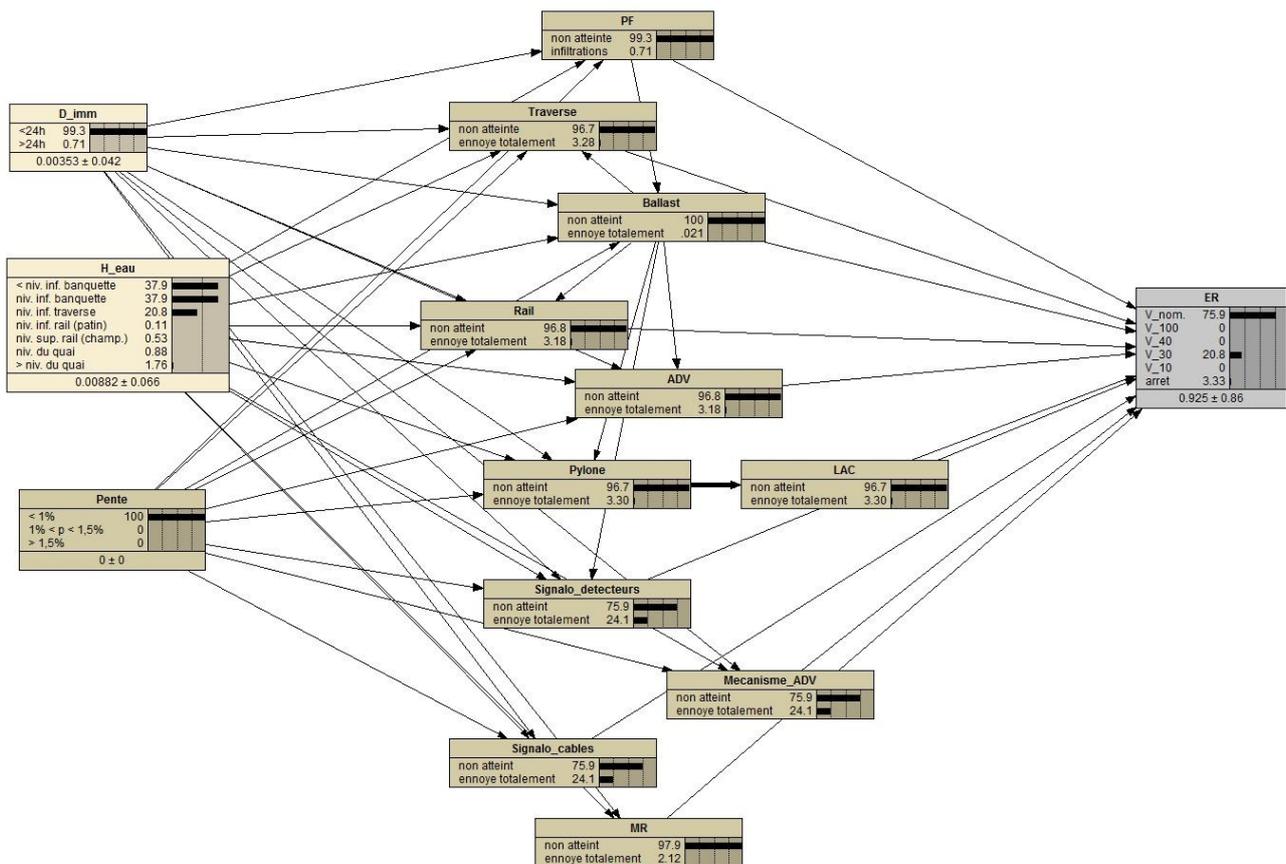


FIGURE 6.15 – Résultats obtenus par le modèle quantitatif en utilisation pour du diagnostic, pour la configuration d’implantation de surface, et pour une distribution de probabilité de vitesse d’exploitation centrée sur une valeur élevée (source : auteur)

- les probabilités conditionnelles de défaillance de composants sont **toutes très similaires pour les trois configurations**. Les probabilités de défaillance calculées comme les plus grandes sont obtenues pour les composants de signalisation (mécanisme d'appareil de voie, câbles de signalisation, détecteurs et balises) avec une valeur d'environ 0,25 pour l'état « ennoyé totalement » ;
- pour une distribution de probabilité centrée sur une valeur **moyenne** de vitesse d'exploitation, les probabilités conditionnelles de défaillance de composants sont **toutes très similaires pour les trois configurations**. Les probabilités de défaillance calculées comme les plus grandes sont obtenues pour les composants de signalisation (mécanisme d'appareil de voie, câbles de signalisation, détecteurs et balises) avec une valeur d'environ 0,87 pour l'état « ennoyé totalement » ;
 - pour une distribution de probabilité centrée sur une valeur **faible** de vitesse d'exploitation, les probabilités conditionnelles de défaillance de composants sont :
 - **similaires pour le souterrain et la surface** avec, en particulier, les probabilités les plus grandes de défaillance obtenues pour les composants de signalisation (mécanisme d'appareil de voie, câbles de signalisation, détecteurs et balises), d'énergie (pylône et caténaire) et d'infrastructure (rail et appareil de voie) et valant respectivement 0,95, 0,72 et 0,70 ;
 - **différentes dans le cas de l'aérien** avec les probabilités les plus grandes de défaillance obtenues pour les composants de signalisation (mécanisme d'appareil de voie, câbles de signalisation, détecteurs et balises), d'énergie (pylône et caténaire) et d'infrastructure (rail et appareil de voie) et valant respectivement 0,95, 0,90 et 0,47.

Par conséquent, ces résultats font apparaître le rôle prépondérant des défaillances des composants du sous-système **contrôle-commande et signalisation** dans la dégradation de l'exploitation du système. Autrement dit, l'état des composants de ce sous-système semble conditionner fortement le service qu'est capable de fournir le système. Dans une optique de maintien de service à une performance élevée, ce sont donc ces composants en particulier qui nécessitent une stratégie de fiabilisation renforcée.

Synthèse

Dans une approche résolument comparative entre souterrain, surface et aérien, trois réseaux bayésiens sont construits. Ces modèles sont utilisés selon les deux sens de lecture que permettent les réseaux bayésiens : en prévisionnel c'est-à-dire qu'il s'agit de fixer les probabilités de l'aléa inondation pour en déduire les probabilités conditionnelles de dégradation du service fourni, et en diagnostic c'est-à-dire qu'il s'agit de fixer les probabilités de dégradation du service fourni par l'intermédiaire des différentes vitesses d'exploitation pour en déduire les probabilités conditionnelles de défaillance des composants. Dans les deux sens de lecture, les modèles ont été testés afin de mettre en avant leur puissance et leur pertinence en matière de gestion du risque inondation sur les systèmes de transport guidé. Les conclusions théoriques semblent confirmer la pertinence et la puissance des modèles car ils sont cohérents avec les situations observées dans la pratique.

6.4 Limites et perspectives d'amélioration du modèle quantitatif

Si les résultats issus du modèle à la fois dans un usage de prévision et de diagnostic font apparaître des valeurs cohérentes, réalistes et pertinentes dans une démarche de quantification des effets globaux du risque inondation, ce modèle laisse apparaître un certain nombre de limites.

6.4.1 Diversité des données d'entrée

Le premier problème que pose la **multiplicité des sources de données** différentes qu'il est possible d'inclure au sein d'un réseau bayésien est celui des incertitudes qui pèsent sur une telle diversité. Un manque de vigilance sur la compatibilité de ces sources disparates de données peut, en effet, conduire à des résultats erronés quant à la réponse estimée du système¹³ (DRUZDZEL et DíEZ, 2003). Néanmoins, la littérature ne mentionne pas tant le risque de combiner de la connaissance provenant de sources diverses et variées que celui de ne pas prendre en compte de manière suffisamment fine les propriétés structurelles majeures d'un modèle (DRUZDZEL et DíEZ, 2003) telles que les interdépendances entre éléments par exemple, aspect que le modèle développé dans cette recherche a la qualité d'intégrer.

6.4.2 Intégrer les incertitudes dans le modèle

Les **incertitudes** dans le modèle quantitatif sont potentiellement nombreuses. Il est courant que certaines probabilités conditionnelles soient difficilement évaluables car les événements sont représentés par très peu d'occurrences¹⁴ (DRUZDZEL et DíEZ, 2003). De plus, le recours à la connaissance experte pour alimenter un réseau bayésien en tant que source supplémentaire voire unique de données est nécessairement accompagné de biais heuristiques pouvant altérer la vraisemblance des probabilités subjectives émises par les experts : le biais de disponibilité, de représentation, de sur-confiance et d'ancrage (MORGAN et HENRION, 1990). Les données quantitatives brutes issues de mesures, d'observations, de calculs ou de documents techniques sont également entachées de plusieurs types d'imperfections : des incertitudes, des imprécisions et des incomplétudes (VUILLET, 2012, p. 282).

Un travail plus approfondi sur le modèle présenté précédemment permettrait donc de proposer des moyens d'inclure les imperfections et les biais des données récoltées. Cet aspect n'est pas traité dans cette recherche, essentiellement centrée sur la démonstration de la pertinence et de la puissance des réseaux bayésiens pour évaluer dans une approche unique les conséquences à la fois matérielles et fonctionnelles d'une inondation touchant un système technico-fonctionnel urbain.

6.4.3 Validité spatiale et temporelle du modèle

La question de la validité des résultats obtenus par le modèle probabiliste est de rigueur sur le plan spatial et temporel.

13. "Lack of attention to whether the sources are compatible and whether they can be combined can lead to erroneous behavior of the resulting model".

14. "It is not uncommon that some of the configurations required for conditional probability distributions – which in the case of discrete variables are conditional probability tables (CPTs) – are only represented by a small number of cases, if any".

Concernant la validité **temporelle**, l'idée selon laquelle les réseaux bayésiens sont pertinents pour caractériser la réponse d'un système face à un aléa naturel à la fois avant l'occurrence de cet aléa et après celui-ci est admise. (BENSI, 2010, p. 245), qui mobilise les réseaux bayésiens pour démontrer leur apport en ce qui concerne l'évaluation d'une section de ligne à grande vitesse en Californie soumise au risque sismique, remarque que les réseaux bayésiens offrent un outil puissant pour modéliser les risques posés aux systèmes critiques aussi bien avant qu'après l'occurrence de l'aléa ¹⁵.

Concernant la validité **spatiale**, la question est en revanche toute autre. Si l'hypothèse de domaine de validité qui est prise dans cette recherche se fonde sur des incidents passés d'inondation sur le réseau ferré français, d'autres formulations sont possibles. Premièrement, à partir d'un raisonnement élémentaire essentiellement hydraulique, la longueur sur laquelle les résultats issus du modèle sont valides pourrait être prise comme la distance entre deux points hauts topographiquement de la voie. L'hypothèse consisterait donc à considérer que les phénomènes hydrologiques sont globalement similaires sur cette longueur et qu'ainsi, les impacts matériels et fonctionnels déduits par le réseau bayésien sont valables sur cette distance élémentaire. Ce raisonnement approximatif peut être amélioré grandement par une approche spatialisée plus globale.

C'est l'objet de la seconde formulation possible du domaine de validité à considérer. En effet, deuxièmement, le développement de la **cartographie spatiale** de l'aléa hydrologique de ruissellement appliquée au réseau ferroviaire est une piste intéressante pour évaluer l'emprise spatiale des dommages. La méthode de cartographie du ruissellement IRIP (Indicateur du Ruissellement Intense Pluvial) vise, en effet, à détecter sur des grands territoires les zones où le processus de ruissellement est le plus probable et permet de déterminer sur des territoires plus réduits les enjeux à risque tels que le réseau ferré et de poser des diagnostics (DEHOTIN *et al.*, 2014). Plus généralement d'ailleurs, la spatialisation représente un enjeu majeur pour les réseaux bayésiens et des rapprochements méthodologiques récents avec les Systèmes d'Information Géographique (SIG) voient le jour. (LUNA *et al.*, 2015) opèrent le rapprochement théorique en considérant, d'une part, le SIG comme une plateforme logicielle essentielle pour la représentation des caractéristiques spatiales des inondations et des enjeux exposés et en mettant en avant, d'autre part, que des modèles analytiques de risque sont nécessaires pour estimer d'un point de vue probabiliste les potentiels dommages de ces enjeux soumis à des inondations.

Un cas étudié relatif aux équipements électriques endommagés par les inondations provoquées par le passage de l'ouragan Sandy aux Etats-Unis en 2012 teste l'apport des réseaux bayésiens couplés à des SIG. Plus spécifiquement, le SIG fournit les données d'entrée de type spatial à un réseau bayésien qui les traite et calcule alors les niveaux de risque estimés aux localisations étudiées. Ces niveaux de risque sont ensuite renvoyés au SIG qui les représente alors spatialement (Figure 6.16 et Figure 6.17). SIG et réseaux bayésiens permettent ainsi de **relier de nombreuses informations relatives au risque inondation** : contexte territorial, impacts sur les réseaux critiques et spatialisation de ces impacts.

Finalement, l'objectif de ce modèle quantitatif basé sur les réseaux bayésiens est de **constituer un outil pertinent pour la caractérisation totale du risque inondation** sur un système de transport guidé, des impacts matériels aux impacts fonctionnels. Les réseaux bayésiens permettent de représenter des connaissances de diverses natures dans un même modèle (expertise, données de retour d'expériences, apprentissage, règles logiques, équations, observations, etc.), de façon très lisible grâce à la modélisation graphique et conviviale. Les logiciels existants sont « tout-en-un » et offrent une saisie

15. "The Bayesian network provides a powerful tool for modeling risks posed to infrastructure systems both before and after a hazard event."

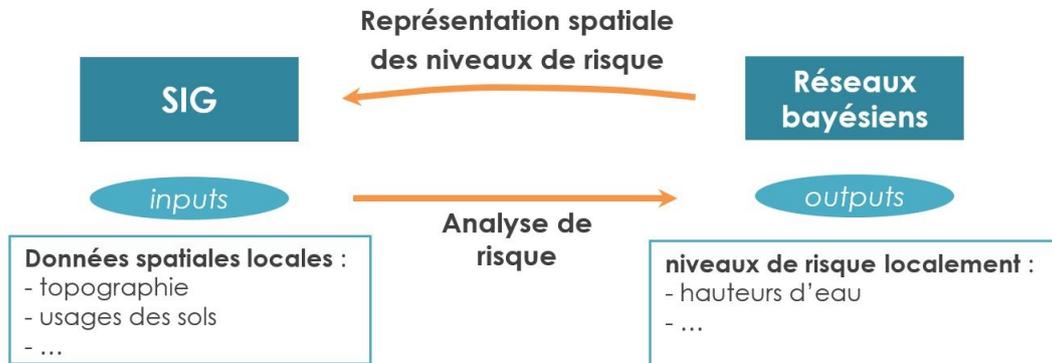


FIGURE 6.16 – Principes du rapprochement théorique entre SIG et réseaux bayésiens tel qu’opéré par (LUNA *et al.*, 2015)



FIGURE 6.17 – Cartographie des niveaux de risque d’ennement d’équipements électriques estimés par un réseau bayésien suite à un risque inondation (LUNA *et al.*, 2015). Les cercles verts, de taille différente, représentent les différentes valeurs des probabilités calculées.

intuitive du modèle et des évaluations rapides à l'aide de calculs quasi-instantanés (PÉRÈS, 2005). C'est exactement dans cette optique que les réseaux bayésiens sont appliqués dans cette recherche à la caractérisation du risque inondation affectant les systèmes de transport guidé positionnés en aérien, en surface et en souterrain.

Synthèse

Si l'usage d'un modèle quantitatif basé sur des réseaux bayésiens afin de caractériser de façon globale les effets d'une inondation sur un système de transport guidé qu'il soit souterrain, de surface ou aérien a démontré sa puissance et sa pertinence, il n'en demeure pas moins plusieurs limites. Premièrement, le fait que les réseaux bayésiens soient capables d'intégrer des données issues de sources différentes est un atout qui présente néanmoins l'inconvénient de poser la question de la compatibilité de toutes ces données au sein d'un même modèle calculatoire. Deuxièmement, les incertitudes attachées aux probabilités calculées ne sont pas prises en compte et nécessiteraient de l'être afin de connaître la confiance qu'il est raisonnable d'accorder à ces résultats probabilistes. Troisièmement, la question se pose sur la validité spatiale et temporelle des probabilités calculées dans la mesure où les aléas naturels tels que les inondations présentent des spécificités spatiales et temporelles très fortes. Des pistes sont proposées afin de contrôler et d'améliorer les domaines de validité spatiale et temporelle en utilisant, notamment, les Systèmes d'Information Géographique.

6.5 Conclusion du chapitre 6

Le chapitre 6 met en avant l'apport de la quantification pour offrir une caractérisation complète des effets du risque inondation : de l'occurrence de l'aléa, avec ses paramètres d'intensité donnée, des dommages directs et indirects c'est-à-dire provoqués par des effets domino jusqu'aux effets sur l'exploitation et donc sur le service fourni par le système.

Cette quantification est permise par la construction d'un modèle dit quantitatif basé sur les réseaux bayésiens. Ce chapitre démontre la pertinence d'une telle approche probabiliste car elle répond aux exigences posées par cette recherche :

- **comparer les effets** d'une inondation pour les trois configurations classiques d'implantation d'un système de transport guidé ;
- **lier** aléa, endommagements matériels et conséquences fonctionnelles ;
- **permettre la prévision** des effets d'une inondation sur le système et **offrir un modèle de diagnostic** d'un système fonctionnant partiellement car certains de ses composants sont endommagés ;
- et plus généralement, proposer un **outil d'aide à la réflexion** en matière de dégradation de service dans un contexte de risque inondation.

Ce dernier point mérite un approfondissement à plusieurs niveaux. Il révèle la possibilité d'un mode de fonctionnement intermédiaire d'un système de transport guidé soumis à une inondation lorsque certaines de ses parties sont défaillantes. Le système est donc capable d'assurer son service de façon

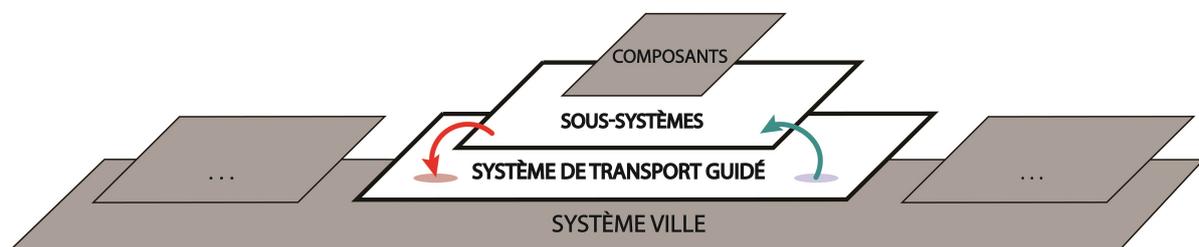
partielle, c'est-à-dire en le dégradant. Ainsi, cette notion de fonctionnement en mode dégradé pose plusieurs interrogations d'ordre définitionnel et pratique qui sont discutées dans le chapitre suivant.

Chapitre 7

Des stratégies de fonctionnement en mode dégradé pour une amélioration de la résilience des systèmes de transport guidé

« La situation est paradoxale sur notre Terre. Les interdépendances se sont multipliées. La communication triomphe, la planète est traversée par des réseaux, fax, téléphones portables, modems, Internet. La conscience d'être solidaires dans leur vie et dans leur mort devrait lier désormais les humains les uns aux autres. Et pourtant, l'incompréhension demeure générale. Il y a certes de grands et multiples progrès de la compréhension, mais les progrès de l'incompréhension semblent encore plus grands. »

Edgar Morin, *Les sept savoirs nécessaires à l'éducation du futur*, p. 103, Editions du Seuil, 2000



L'approche probabiliste mobilisée précédemment a permis la construction d'un modèle quantitatif par une utilisation des réseaux bayésiens. Ce modèle quantitatif est précédé d'un modèle d'interdépendances qui identifie les dynamiques des défaillances par effet domino qui se produisent ordinairement au sein d'un système lors de l'occurrence d'un risque inondation. Il est également précédé d'un modèle d'estimation du coût et du délai de remise en état matériel d'un système endommagé par une inondation c'est-à-dire le coût et le délai que représente la reconstruction des éléments défaillants. Dans la continuité de ces deux modélisations, le modèle probabiliste représente l'étape finale de la démarche de caractérisation globale du risque en ce sens qu'il lie les conséquences matérielles analysées grâce aux modèles d'interdépendances et d'estimation coût-délai avec les conséquences fonctionnelles sur l'exploitation du système (Tableau 7.1). Les résultats de ce modèle révèlent donc une possibilité de fonctionnement intermédiaire du système, autre qu'un arrêt total, lorsque certaines de ses parties sont défaillantes suite à l'occurrence d'une inondation. Le système semble pouvoir assurer un service partiel qui consiste à dégrader son fonctionnement nominal « à 100 % ».

TABLEAU 7.1 – Synthèse des trois modélisations successives développées dans cette recherche

Modélisation	Objectif	Résultats
Modèle d' interdépendances (Chapitres 3 et 4)	→ Caractériser la vulnérabilité systémique par une démarche qualitative	Profils comportementaux des éléments du système
Modèle d' évaluation coût-délai (Chapitre 5)	→ Caractériser la vulnérabilité systémique par une démarche quantitative	Base de données de coût et délai de remise en état des éléments du système
Modèle probabiliste (Chapitre 6)	→ Rendre opérationnelle la résilience par une mise en action dans les pratiques de conception, d'exploitation et de maintenance	Modes dégradés d'exploitation

Or, la notion de fonctionnement en mode dégradé pose de nombreuses interrogations d'ordre conceptuel et pratique. Ces interrogations trouvent leurs réponses au travers des liens entre cette notion et le concept de résilience qui se tissent fortement depuis les dernières années. L'exercice EU SEQUANA 2016 en est sans doute l'exemple récent le plus concret dans lequel l'association entre mode dégradé et résilience est centrale.

Cet exercice, en lien avec le soutien de l'Union européenne, a en effet permis de simuler la montée des eaux de la Marne et de la Seine et leur débordement, entraînant des inondations, dans le but de tester la coordination des acteurs de la gestion de crise ainsi que la chaîne de prise de décision et les moyens déployés sur le terrain (PRÉFECTURE DE POLICE, 2016). Dans ce cadre, « être résilient, [...] pour une ville ou un territoire, c'est sa capacité à absorber une perturbation puis à récupérer ses fonctions à la suite de celle-ci. La capacité à absorber une perturbation consiste dans les faits à réussir à fonctionner du mieux possible dans des conditions dégradées »¹. La résilience est donc abordée, sur un plan définitionnel, de façon similaire à l'acception prise dans le cadre de cette recherche ; et, sur un plan opérationnel, cette définition oriente immédiatement la résilience comme la possibilité pour un système urbain à maintenir son fonctionnement même de façon partielle et même sur une durée temporaire. Cette capacité semble d'ailleurs passer avant celle de la remise en état rapide et complète car ce qui prime, c'est la continuité de service à toutes les phases de l'aléa plutôt qu'un

1. www.prefecturedepolice.interieur.gouv.fr/Sequana/La-Seine-en-crue/Un-risque-majeur-en-Ile-de-France/La-resilience

arrêt de service. Ce fut par exemple le cas aux Etats-Unis suite au passage de l'ouragan Sandy après lequel la reprise de l'activité économique était conditionnée, selon les entreprises new-yorkaises, par le redémarrage à tout prix même s'il fallait pour cela reconstruire d'abord du temporaire (TOUBIN, 2014, p. 280). D'un point de vue global, un arrêt total du service fourni par un système urbain, en particulier au vu des multiples interdépendances existantes, entraînerait potentiellement l'arrêt de service d'autres systèmes et ainsi de suite jusqu'à ce que finalement « *d'autres déséquilibres ne fassent basculer la situation dans une ornière plus profonde* » (QUENAULT, 2013a). A l'inverse, un maintien de service même partiel de certains systèmes critiques urbains limite les risques d'interruptions d'autres systèmes dépendants à cause d'effet domino. Par voie de conséquence, ces derniers peuvent alors eux aussi passer dans un fonctionnement en mode dégradé sans stopper leur fonctionnement.

Néanmoins, « *une telle vision de la gestion des risques conduit à se focaliser presque exclusivement sur la résilience réactive de court terme, destinée à améliorer la "capacité à faire face" du système urbain envisagé à un aléa* » (QUENAULT, 2013a). C'est la raison pour laquelle il est essentiel de concevoir les systèmes avec à l'esprit la possibilité de pouvoir les faire fonctionner de manière dégradée de façon simple et efficace² (IRGC, 2006, p. 12). Dès lors, le fonctionnement en mode dégradé s'intègre dans une démarche de résilience proactive en anticipant les aléas pouvant endommager le système, et sur le long terme en rendant pertinent le déclenchement d'un tel mode de fonctionnement durant toute la durée de vie du système urbain considéré.

Le chapitre 7 est centré sur la notion de fonctionnement en mode dégradé pour un système de transport guidé, quelle que soit sa configuration d'implantation. Le fonctionnement en mode dégradé est étudié dans un contexte multi-risques, c'est-à-dire que le travail de recherche n'est plus spécifique au risque inondation comme les chapitres précédents mais s'ouvre à d'autres risques naturels. Un cadrage de la notion de fonctionnement en mode dégradé à la fois de façon qualitative et quantitative puis spatiale et temporelle est nécessaire pour caractériser précisément ce qu'elle recouvre. A l'issue des trois modèles successivement élaborés dans cette recherche, ce chapitre vise à vérifier le postulat suivant : le fonctionnement en mode dégradé de systèmes technico-fonctionnels tels que des systèmes de transport guidé représente un éventail pluriel de mesures permettant l'opérationnalisation de la résilience face au risque inondation.

2. "Designing systems so that capabilities are degraded in a 'graceful' fashion."

7.1 Caractérisation de la notion de fonctionnement en mode dégradé

7.1.1 Circonscrire la notion pour des systèmes urbains

Avant même de la définir, il est important de délimiter les usages existants de la notion de fonctionnement en mode dégradé relative à des systèmes technico-fonctionnels.

Si cette notion apparaît dans des domaines variés que sont la *resilience engineering*, la maîtrise des systèmes complexes, l'élaboration d'une culture de la sécurité dans le milieu industriel (JOHNSON *et al.*, 2009) ou encore l'ergonomie dans le milieu industriel (KERBAL, 1990), elle ne bénéficie pas de définition unique. Il est en fait difficile de dégager des définitions précises d'un « mode dégradé d'exploitation » dans la mesure où des systèmes même critiques sont ordinairement exploités avec certaines de leurs fonctionnalités dégradées sur une courte période de temps sans affecter la continuité du service assuré³ (JOHNSON et SHEA, 2007c). Il est donc difficile de définir des caractéristiques précises d'une exploitation d'un ou de plusieurs systèmes critiques, au sens d'infrastructures critiques (ROBERT et MORABITO, 2009), en mode dégradé⁴ (JOHNSON *et al.*, 2009, p. 3). Cette situation de flou définitionnel est qui plus est renforcée par le fait qu'à l'échelle européenne, il n'existe pas de consensus quant aux systèmes urbains capables de fonctionner ou non en mode dégradé comme c'est le cas par exemple pour la gestion du trafic aérien. Certains pays considèrent, en effet, que si des composants donnés deviennent hors-service alors ils conduisent à une dégradation de la performance du système global tandis que d'autres pays considèrent que pour ces mêmes composants, leur arrêt a un effet non significatif sur le système (JOHNSON *et al.*, 2009, p. 3).

De plus, si la notion de fonctionnement en mode dégradé d'un système ne bénéficie pas de définition communément admise et partagée, c'est aussi parce qu'elle interfère avec d'autres notions et concepts connexes tels que la résilience. En effet, « *les systèmes sociotechniques complexes qui sont amenés à opérer régulièrement en mode dégradé évoluent naturellement non pas vers des organisations performantes mais plutôt vers des configurations qui sont de plus en plus aptes à répondre aux perturbations potentielles de leur environnement* » (PAVARD *et al.*, 2009). Ce lien qui est mis en avant entre fonctionnement en mode dégradé et aptitude à s'adapter face aux perturbations d'un environnement extérieur au système est tout à fait en lien avec le concept de résilience qui intègre justement cette idée. Parmi les modèles dominants qui existent, relatifs au concept de résilience (cf. chapitre 1), la *resilience engineering* met en exergue l'importance d'exploiter différemment le système à partir du moment où il a été reconnu que son environnement a changé (HOLLNAGEL *et al.*, 2006). Cet ajustement de l'exploitation ou capacité à savoir quoi faire (« *what to do* ») (DEKKER *et al.*, 2008, p. 54) peut donc tout à fait prendre la forme d'une dégradation du service assuré et d'une exploitation réalisée de manière restreinte. En outre, selon le point de vue de (PAVARD *et al.*, 2009), la capacité à savoir fonctionner en mode dégradé et à le faire de façon régulière constitue en soi une démarche de construction et d'amélioration de la résilience du système considéré. Cette réflexion est d'autant plus intéressante qu'elle offre une vision positive du fonctionnement en mode dégradé qui est ordinairement connoté négativement car il implique, dans le cas d'un système de transport guidé par exemple, une réduction de la capacité d'une ligne et de fait des retards pour les usagers.

3. "It can be difficult to derive precise definitions of what is meant by a "degraded mode of operation". Few safety-critical systems can provide continued services over long periods of time without suffering minor equipment failures. Hence most applications are routinely operated for short periods of time with some form of "degraded" functionality."

4. "It can be difficult to define the precise characteristics of degraded modes of operation both within and between complex safety-critical systems."

Néanmoins, tout fonctionnement en mode dégradé d'un système n'est pas nécessairement possible. En effet, des incidents et accidents sont susceptibles de se produire justement car le système fonctionne de façon dégradée : « *l'analyse des grands accidents nous apprend qu'ils prennent toujours naissance dans une situation ou un état dégradé. Jamais — en dehors des attentats -- un accident ne se produit en situation normale, c'est-à-dire lorsque le système fonctionne conformément à ce qui a été prévu et que tous les équipements sont opérationnels* » (NICOLET, 2008). De tels événements surviennent aussi dans le cas de systèmes de transport ferré exploités dans des modes dégradés tels que des collisions de trains suite à des signaux défaillants ou encore des déraillements permis par des vitesses d'exploitation trop élevées (JOHNSON et SHEA, 2007b). Or, le problème est que le passage d'un mode de fonctionnement nominal à un autre mode de fonctionnement dégradé ne se fait pas à risque égal : « *plus la situation se dégrade, plus les risques encourus augmentent, plus on s'éloigne du risque résiduel accepté en conception* » (NICOLET, 2008). Pour cette raison, les normes relatives aux systèmes ferroviaires tels que le réseau britannique distinguent plusieurs types d'exploitation d'un système de transport selon l'état dans lequel celui-ci se trouve (ORR, 2005, p. 12) :

- exploitation *normale* : correspond au mode d'exploitation pour lequel le système est conçu, en incluant notamment les variations régulières de la demande ;
- exploitation *dégradée* : correspond à un mode d'exploitation restreint du système à cause de la défaillance d'un ou plusieurs composants ;
- exploitation *anormale* : correspond à un mode d'exploitation dans des conditions extrêmes telles que des retards sur une partie du réseau affectant d'autres parties du réseau ;
- exploitation *de crise* : correspond à un mode d'exploitation dans le cas d'un événement imprévu impliquant une situation de risque vital ou de dommages élevés, tel qu'un incendie par exemple.

La dégradation par rapport au fonctionnement nominal est donc bien entendue dans ces cas comme la difficulté à maintenir la continuité de service sans le fonctionnement sous-jacent de composants structurels clés du système⁵ (JOHNSON *et al.*, 2009).

Ainsi, malgré l'absence de définition unique, à l'échelle d'un système urbain et à partir d'une bonne connaissance de celui-ci sur le plan matériel, fonctionnel et dysfonctionnel face à une perturbation donnée comme une inondation, il est possible d'approcher la notion dans ses dimensions quantitatives et qualitatives.

7.1.2 Définir la notion dans le cas d'un système de transport guidé

La défaillance d'éléments, qu'ils soient des ressources utilisées, fournies par le système ou des composants propres au système, a des conséquences fonctionnelles c'est-à-dire qu'elle implique un mode d'exploitation dégradée par rapport au mode nominal. Par exemple, la défaillance de composants de signalisation dans le cas de systèmes de transport guidé tels que les métros ou les lignes de transport régionales impliquent de réduire les vitesses de circulation des trains. En effet, si les signaux ne fonctionnent pas ou indiquent des informations erronées, les conditions de sécurité d'exploitation ne sont plus respectées : espacement entre les trains, manœuvres particulières de trains au niveau des aiguillages ou des zones de remisage, etc. De fait, les trains ne peuvent alors circuler qu'à faible allure dégradant ainsi l'exploitation.

5. "These "degraded modes" occur when operators struggle to maintain levels of service without the underlying support of key elements in their infrastructure."

Ces conséquences conduisent à un endommagement fonctionnel du système ou d'une partie du système, sans pour autant d'ailleurs que celui-ci ait été endommagé matériellement (MESCHINET DE RICHEMOND et REGHEZZA, 2010) : une ligne de transport devra suspendre son exploitation parce que la sous-station électrique qui lui fournit le courant est sous les eaux, sans que la ligne elle-même ne soit inondée. Cependant, la notion de fonctionnement en mode dégradé nécessite d'être clairement définie car elle possède une dégradation qui peut être qualitative et aussi quantitative (TOUBIN, 2014, p. 159). Elle peut donc prendre plusieurs formes en particulier dans le cas des systèmes de transport guidé (GONZVA *et al.*, 2016f).

7.1.2.1 Une dégradation d'ordre quantitatif

Le fonctionnement en mode dégradé d'un système se conçoit à partir de la définition première du terme de *dégradation*, à savoir celle **d'endommagement, de détérioration**⁶. Cet axe revêt alors une dégradation d'ordre quantitatif du service fourni par le système.

Si le système présente un fonctionnement en mode dégradé, cette situation peut implicitement s'interpréter comme l'existence de plusieurs états de fonctionnement du système. De cette façon, une perturbation peut engendrer une variation d'état du système c'est-à-dire le faire passer d'un état de fonctionnement à un autre. (ROBERT *et al.*, 2009, p. 21) définissent cinq états dans lesquels peut être un système afin de caractériser son degré de perturbation. Ces cinq états, listés ci-dessous, dépendent eux même de l'état dans lequel se trouvent les intrants, c'est-à-dire les ressources utilisées, et les extrants, c'est-à-dire les ressources fournies, du système. Le système présente alors les cinq états suivants (ROBERT *et al.*, 2009) :

- état de *référence* : état théorique de fonctionnement nominal du système, c'est-à-dire l'état pour lequel il a été conçu ;
- état *normal* : le système est performant car il remplit correctement sa mission de fourniture de l'extrait, c'est-à-dire de ressource fournie ;
- état *perturbé* : l'un des extrants est dans l'état perturbé. Grâce à des actions mises en place, le délai de livraison de l'extrait ou encore les dégradations de qualité de l'extrait restent acceptables permettant au système de continuer à remplir sa mission, mais il n'est plus performant ;
- état *défaillant* : malgré les actions mises en place, les dégradations de l'extrait deviennent inacceptables engendrant alors la cessation de l'aptitude du système à accomplir sa ou ses missions ;
- état *hors-service* : cessation complète de toute activité.

Pour un système de transport guidé, l'extrait peut être assimilé au service rendu par le système à savoir assurer la mobilité des usagers. La mise en fonctionnement en mode dégradé du système correspond à l'état perturbé défini par (ROBERT *et al.*, 2009, p. 21), qui met d'ailleurs en avant l'existence d'actions mises en place pour un tel fonctionnement dégradé. Autrement dit, **un système ne peut fonctionner en mode dégradé que s'il existe un certain nombre de stratégies ou d'actions qu'elles soient d'ordre matériel ou organisationnel donnant concrètement la possibilité à ce fonctionnement dégradé.**

Certains auteurs associent cette première forme quantitative de fonctionnement en mode dégradé d'un réseau de transport guidé avec l'existence d'un grand nombre de chemins alternatifs à un iti-

6. Dégradé : qui a éprouvé une détérioration matérielle (Dictionnaire Littré, 2015).

néraire initial donné (REGHEZZA et GLEYZE, 2007). En effet, « lorsqu'un réseau de transport est endommagé, le trafic va se reporter sur des chemins alternatifs à l'itinéraire initial. Plus ses chemins sont nombreux et divers, moins la perturbation est ressentie. Ce sont ces alternatives qui permettent la continuité du service et permettent le fonctionnement du réseau en mode dégradé » (SERRE, 2015a). Ce raisonnement est tout à fait valable mais restreint en fait les possibilités de fonctionnement en mode dégradé d'un système de transport à des considérations topologiques de réseau. Or, le fonctionnement en mode dégradé ne se limite pas à cela. D'une part, un fonctionnement en mode dégradé se décline en fait en plusieurs types de dégradation possible. Il est donc plus juste de parler de fonctionnement **dans plusieurs modes dégradés**, avec comme mode dégradé ultime l'arrêt total du service porté par le système. Et, d'autre part, ces modes dégradés d'un système de transport guidé ne sont pas nécessairement portés par des alternatives matérielles ou infrastructurelles.

Parmi ces possibles modes dégradés à mettre en place, certains sont fonctions de la criticité des composants défaillants, vue dans le sens de fortement influent pour le fonctionnement général du système. Un matériel roulant défaillant peut vraisemblablement être remplacé par un autre et ne provoquer qu'un retard alors qu'une infrastructure défaillante peut contraindre l'exploitant à interrompre la circulation sur la section concernée. Ils sont aussi fonction de l'intensité de l'aléa. Le modèle probabiliste (cf. chapitre 6) l'a démontré dans le cas de différentes distributions de probabilité de hauteur d'eau ou de durée de l'inondation. L'ampleur spatiale de la zone d'aléa joue également un rôle important sur la possibilité de faire fonctionner le système de transport de manière dégradée.

Ces modes dégradés peuvent ensuite se traduire en mesures organisationnelles de plusieurs types : une réduction de la vitesse d'exploitation, du nombre de stations desservies par les trains, du nombre de trains qui circulent réduisant de fait le nombre de passagers qu'il est possible de transporter, etc. Ils peuvent concerner un ou plusieurs systèmes de transport dans le cas d'interconnexions.

7.1.2.2 Une dégradation d'ordre qualitatif

Le fonctionnement en mode dégradé des systèmes de transport peut se présenter sous d'autres configurations, moins traditionnelles et qui sont liées à une autre signification du terme de *dégradation* : celui de **gradations, d'évolutions**⁷. Ces modes dégradés portent alors sur une qualification autre du système de transport.

L'exemple des ouragans Katrina et Rita qui ont frappé tous deux les Etats-Unis en 2005 illustre bien l'intérêt d'une dégradation qualitative d'un système de transport. À partir de 2006, la *Transportation Security Administration* (TSA) rattachée au Département de la Sécurité intérieure, s'est activement associée à l'élaboration des plans de préparation à des catastrophes naturelles à travers leur *Surface Transportation Security Inspection Program* (STSIP). Et, parmi ces procédures, **l'utilisation des systèmes de transport ferré pour évacuer les personnes avant la crise** est envisagée et prise très au sérieux. L'évacuation par rail a, en effet, de multiples avantages (GORDON et SECREST, 2006) :

- réduire le nombre de véhicules et donc le risque important de congestion du trafic sur les axes routiers majeurs ;
- possibilité d'utiliser des trains à moteur Diesel, c'est-à-dire fonctionnant avec une source d'énergie autre que l'énergie électrique qui sera sans doute fournie irrégulièrement durant la crise ;

7. Dégradation : fait de présenter des degrés successifs (Dictionnaire Littré, 2015).

- fournir un moyen de transport aux personnes mobiles mais non véhiculées afin de les mettre hors de danger ;
- fournir un moyen de transport aux personnes mobiles ayant besoin d'assistance médicale spécifique ;
- proposer une offre de transport alternative à l'évacuation par le réseau routier potentiellement endommagé voire détruit sur des axes stratégiques tels que des ponts par exemple.

Néanmoins, cette possibilité très prometteuse requiert un travail global et multi-acteurs de préparation très important. La TSA liste, dans ce contexte, les enjeux majeurs pour une évacuation par rail des populations dans un temps court et tout en assurant la sécurité des personnes transportées (GORDON et SECREST, 2006) :

- définir précisément qui déclenche la procédure d'évacuation des populations par voies ferrées et quand ;
- identifier des lieux stratégiques de pré-positionnement des trains dédiés à l'évacuation sur le réseau ferré afin d'accroître la réactivité de cette procédure et pour maximiser le nombre de personnes pouvant être évacuées. Ce travail pose d'ailleurs la question du moment, non défini clairement pendant la phase pré-aléa, à partir duquel ces trains sont à envoyer sur ces positions dédiées ;
- assurer une communication et une coordination fiable malgré des risques de coupure d'électricité ou tout du moins de fourniture sporadique d'électricité au réseau ferré ;
- gérer les populations à évacuer afin de savoir précisément qui doit être évacué et qui a été évacué. Les phases de montée et descente dans les trains doivent être faites dans un temps court afin de maximiser les allers et retours de ces trains d'évacuation.

Bien que l'évacuation par rail semble nécessiter un travail important de préparation, coordination et de pilotage, l'évacuation des populations représente un véritable enjeu qui mérite un tel travail lorsque le constat est fait que, par exemple dans le cas de l'ouragan Katrina en 2005, entre 200 000 et 300 000 personnes (WOLSHON, 2002) n'étaient pas en mesure d'assurer personnellement leur évacuation. A la lumière de cet exemple et des échecs rencontrés (Figure 7.1), l'hypothèse selon laquelle une mobilisation beaucoup plus large et diversifiée des modes de transport, en intégrant tout particulièrement les systèmes de transport guidé, est nécessaire pour assurer l'évacuation des populations apparaît donc raisonnable.

La TSA aborde également les trains de **fret** dans ses plans de préparation à des catastrophes naturelles. En effet, parmi les usages possibles durant la période post-crise notamment, le fret peut servir à (GORDON et SECREST, 2006) :

- apporter tout type de matériel et d'équipements nécessaires à la reconstruction ;
- fournir des biens de première nécessité, tant alimentaires que médicaux, aux populations ;
- offrir une alternative au réseau routier potentiellement endommagé et dont la reconstruction peut être longue. Les ouragans Rita et Katrina ont, en effet, démontré que le réseau ferré a été moins endommagé que le réseau routier. Ce fait prouve alors le rôle potentiellement important que peut aussi jouer le réseau ferré dans la phase de reconstruction post-aléa.

D'autres usages peuvent, voire doivent, être d'ailleurs aussi envisagés pour les trains de fret durant la période post-crise. Par exemple, assurer l'**évacuation des déchets post-aléa** dont la gestion est un réel problème actuel du fait de la grande quantité produite et des dommages éventuels aux équipements qui réduisent les capacités de collecte et de traitement (BERAUD, 2013). Il est possible d'imaginer

Transportation
<ul style="list-style-type: none">• Failure to have an effective evacuation plan for nondrivers• Failure to prioritize evacuation to ensure that the most vulnerable (residents of the riskiest areas and people with special needs) leave first• Failure to understand and address the reasons that discourage people from evacuating• Failure to offer free or subsidized evacuation transport to people who need it• Failure to prioritize evacuation traffic to favor buses, HOVs, and service vehicles• Failure to implement a transit and school bus “evacuation action plan”• Failure to use counterflow lanes and road shoulders for evacuation traffic in some cases where it was possible• Failure to coordinate vehicle rentals, fuel distribution, and services along evacuation route• Failure to accommodate pets

FIGURE 7.1 – Exemples de défaillances en matière de transport et d'évacuation des populations lors de l'ouragan Katrina aux États-Unis en 2005 (LITMAN, 2006)

que les trains de fret puissent évacuer de grands volumes de déchets vers les lieux de traitement de ces derniers. Cet usage diversifié du système de transport guidé peut apparaître possible même si le système lui-même est partiellement endommagé dans la mesure où les critères de sécurité d'exploitation d'une ligne peuvent raisonnablement être revus à la baisse lorsqu'il s'agit de transporter, par exemple, des déchets par comparaison au transport de personnes dont les niveaux de sécurité sont, à juste titre, élevés.

Enfin, un autre type de stratégie de fonctionnement en mode dégradé d'ordre qualitatif plutôt anecdotique mais qui montre l'éventail des possibles : la proposition du cabinet d'architectures suédois Jägnefält Milton de **ville mobile exploitant les voies ferrées** inutilisées d'Åndalsnes en Norvège⁸. Le projet, qui a obtenu la troisième place du concours international pour le *master plan* de transport d'Åndalsnes, se base sur des modules répondant à de nombreux besoins urbains tels que le logement (Figure 7.2). Dans le cas d'une ville ayant été touchée par une inondation, de tels modules pourraient y être envoyés *via* l'infrastructure ferroviaire afin de loger ou encore soigner les populations durant la phase de reconstruction.

Finalement, la notion de fonctionnement en mode dégradé se décline en stratégies opérationnelles qui traduisent la notion de dégradation de l'exploitation de façon qualitative et quantitative (Figure 7.3).

8. <http://www.jagnefaltmilton.se/rolling-masterplan/>



FIGURE 7.2 – Projet de ville mobile se servant des voies ferrées et imaginé par les architectes du cabinet de Jägnefält Milton (source : cabinet Jägnefält Milton)

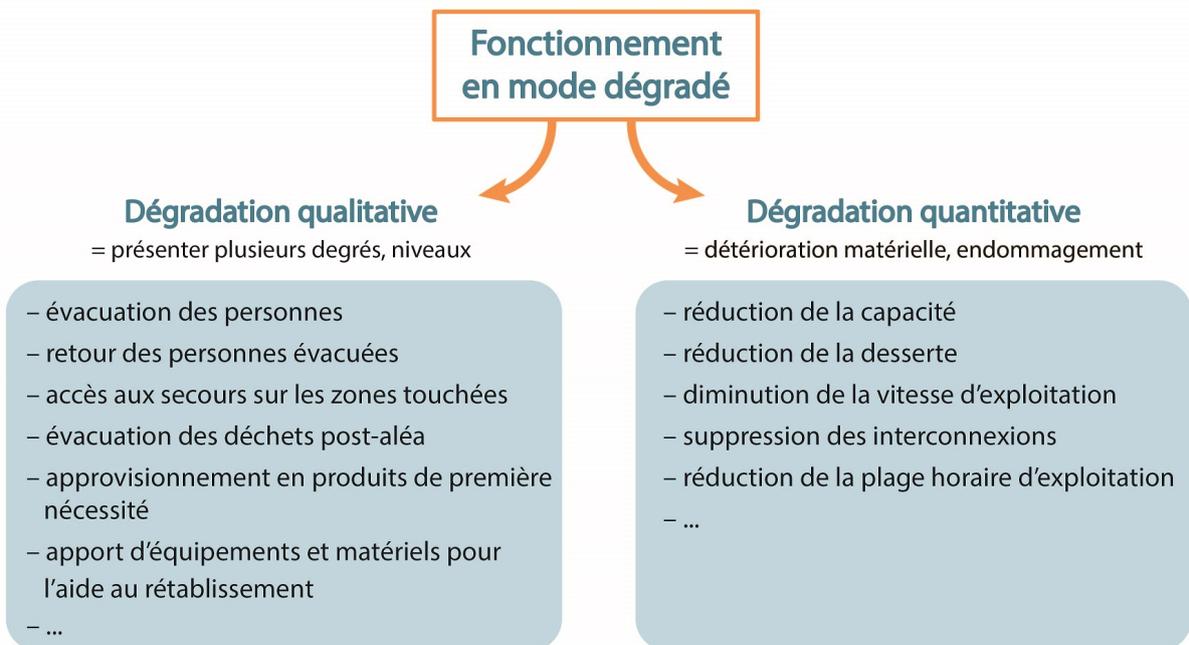


FIGURE 7.3 – Caractérisation qualitative et quantitative du fonctionnement en mode dégradé d'un système de transport guidé (source : auteur)

7.1.3 Aspect temporel : une dimension inhérente au fonctionnement en mode dégradé

Cette double caractérisation du fonctionnement en mode dégradé d'un système de transport guidé soumis à un risque met en évidence une dimension sous-jacente : la dimension **temporelle** intrinsèque à tout mode dégradé.

Premièrement, l'aspect **temporel** d'un mode dégradé se matérialise par le moment où celui-ci est déclenché par le gestionnaire du système ou par toute autre autorité. Or, l'instant où un service tel que le service de transport doit amorcer un mode dégradé est ordinairement incertain, notamment car il n'est pas toujours planifié. La fiabilité de l'alerte entraîne donc des conséquences importantes pour un service qui décide ou non de lancer son plan d'action (TOUBIN, 2014, p. 167) : s'il réagit trop tôt, le service commence à dégrader sa performance avant l'arrivée de la perturbation impliquant alors des perturbations prématurées pour les usagers ainsi que pour les autres systèmes dépendants ; à l'inverse, si le service n'anticipe pas suffisamment l'inondation et ne parvient pas à réaliser les actions nécessaires pour le protéger ou l'adapter, les dommages peuvent être supérieurs et entraîner un rétablissement plus long (Figure 7.4). L'anticipation est fondamentale car pour un mode dégradé qui consiste à interrompre une section considérée à risque d'un système de transport guidé, les mesures de mise en place et de déclenchement prennent un certain temps. Par exemple, la *Metropolitan Transportation Authority* (MTA) en charge de la gestion des transports publics dans la ville de New-York et son agglomération a tiré de l'expérience de l'ouragan Irène en 2011 que 12 heures sont nécessaires pour la fermeture du métro et 8 heures pour le réseau de bus (HCFDC, 2013, p. 53).

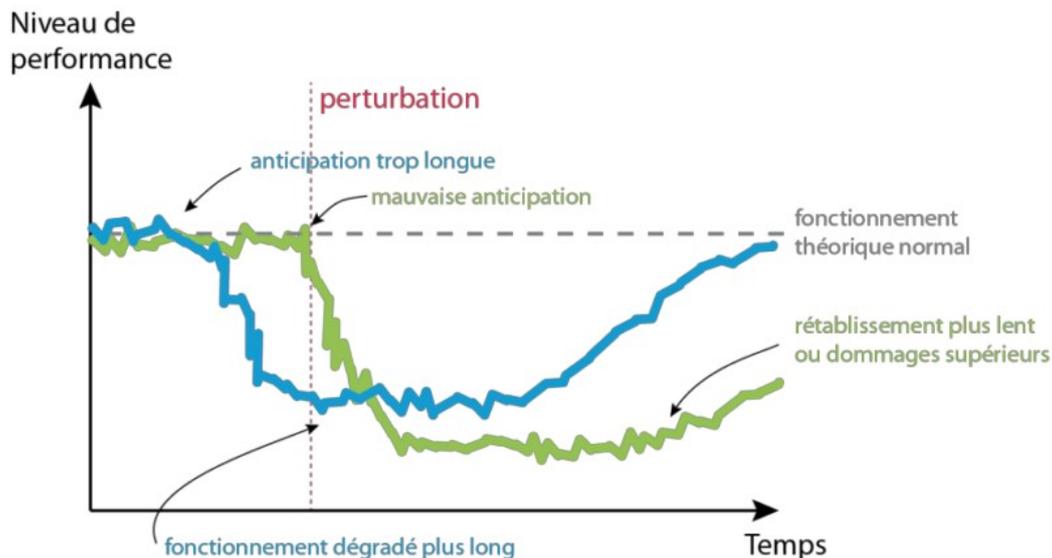


FIGURE 7.4 – Enjeux de l'anticipation d'une perturbation pour le déclenchement du fonctionnement en mode dégradé d'un système (TOUBIN, 2014, p. 167)

Un fonctionnement en mode dégradé, quel que soit son type, ne s'improvise donc pas. C'est la raison pour laquelle l'enjeu de fonctionnement en mode dégradé d'un système est proche de celui de la gestion en temps réel d'un risque lorsqu'il survient : toutes les procédures de mise en place du mode dégradé choisi ont-elles été suivies et menées à leur terme ? Si oui, le système est-il prêt pour passer dans ce mode dégradé de fonctionnement ? Si oui, à quel moment déclencher ce mode dégradé ? Or, la gestion en temps réel est particulièrement stressante pour celles et ceux qui doivent la piloter (MICHEL-KERJAN, 2003). Il est donc essentiel que tout fonctionnement en mode dégradé soit préparé **hors crise** sous peine de ne pouvoir être déclenché à temps ou alors dans une situation

non pertinente. Par conséquent, l'aspect temporel d'un mode dégradé est également présent dès la planification de celui-ci, en amont de son possible déclenchement.

Deuxièmement, l'aspect temporel d'un mode dégradé se conjugue avec deux notions connexes : l'**inertie** et l'**autonomie** de fonctionnement d'un système.

Un mode dégradé peut concerner la réduction voire l'arrêt de l'approvisionnement d'une ressource nécessaire au fonctionnement du système. Des sous-stations électriques d'alimentation du système positionnées tout au long de la ligne et permettant l'approvisionnement en énergie de traction sont susceptibles d'être coupées préventivement en cas d'annonce d'une inondation afin de préserver les équipements ou, dans le pire des cas, d'être endommagées si elles sont impactées par l'inondation. Or, les trains sont dépendants de l'énergie de traction pour fonctionner car c'est une ressource pour le système. Deux cas de figure peuvent alors vraisemblablement se produire dans le cas d'une interruption, volontaire ou non, d'une sous-station électrique :

- l'approvisionnement électrique n'étant plus assuré, l'effet immédiat est l'arrêt du système de transport. Aucune **autonomie** n'est donc possible pour le matériel roulant à partir du moment où le système dont il dépend est stoppé ;
- à défaut de l'énergie électrique de traction, une partie du service peut être assurée à partir de trains tractés par des véhicules fonctionnant avec des moteurs Diesel (tel qu'envisagé, comme vu précédemment, par la *Transportation Security Administration* aux Etats-Unis). Dans ce cas, le système de transport guidé possède une certaine **inertie** pour fonctionner de façon dégradée avant le retour de la ressource électrique.

Cet exemple simple illustre que **tout système tel qu'un système de transport guidé présente intrinsèquement des capacités d'autonomie et d'inertie de fonctionnement** en l'absence d'une ressource ou d'un autre système dont il dépend. Ce lien entre autonomie, inertie et mode dégradé est relevé et formalisé par (TOUBIN, 2014, p. 137) et par (PAIRET, 2009). Ce dernier définit, en effet, le « délai d'affectation » qui est le temps mis par la dégradation d'un intrant, c'est-à-dire une ressource utilisée, au système pour engendrer la dégradation d'un extrant, c'est-à-dire une ressource fournie par le système. Ce délai d'affectation se dissocie en (Figure 7.5) :

- un « délai avant défaillance » qui est le délai qui sépare le début de la dégradation d'un intrant donné du système et la défaillance d'un ensemble fonctionnel du système ;
- et, un « délai intrinsèque » qui est le délai entre le début de la défaillance d'un ensemble fonctionnel donné du système et la dégradation d'un extrant du système.

Pour dresser un parallèle, le délai avant défaillance est donc comparable à l'autonomie et le délai intrinsèque est équivalent à l'inertie.

Troisièmement, l'aspect temporel d'un mode dégradé comprend un aspect de choix dans le processus de déclenchement : le mode dégradé est-il **volontaire** ou **imposé**? En effet, dans le cas où une partie critique du système, au sens d'éléments dont la défaillance engendre des conséquences immédiates et/ou significatives sur la mission assurée par le système (PAIRET, 2009, p. 67), est touchée et endommagée par l'inondation, la dégradation de service est subie ; dans le cas où, en revanche, ce même élément critique est interrompu préventivement afin de limiter les risques d'impact irréversible, le mode dégradé est volontaire.

Le premier cas s'inscrit dans une logique **réactive** dans la mesure où de nombreux incidents dus à un risque inondation sur un système de transport guidé provoquent une dégradation du service su-

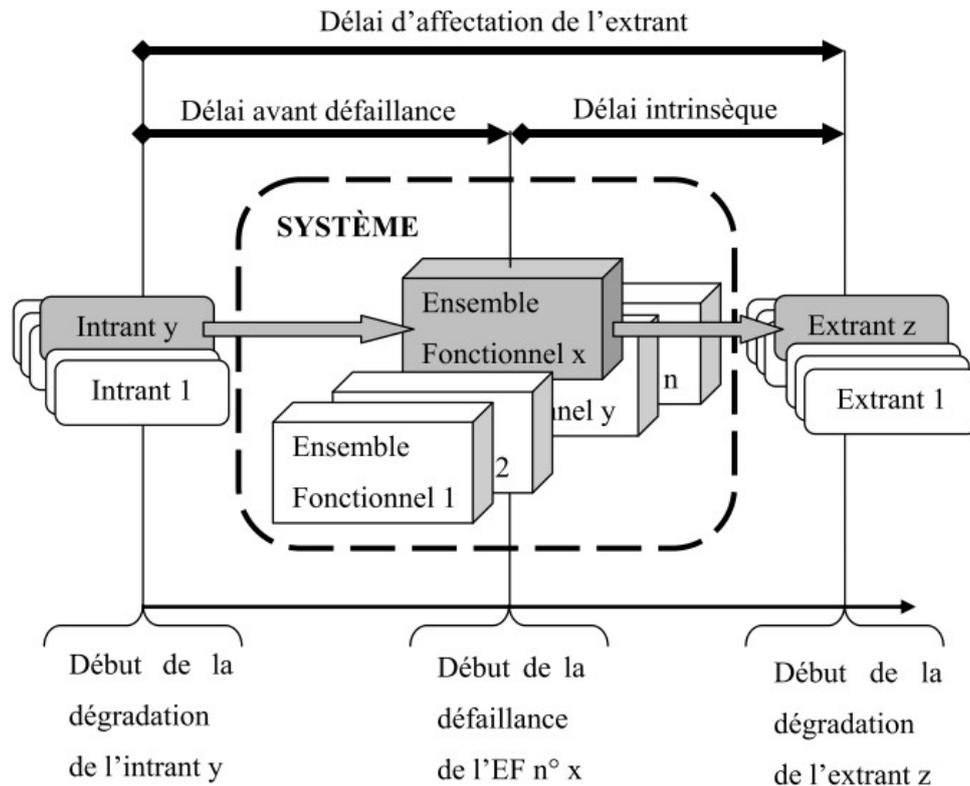


FIGURE 7.5 – Délai d'affectation, délai avant défaillance et délai intrinsèque dans le cas d'un fonctionnement en mode dégradé (EF : Entité Fonctionnelle) (PAIRET, 2009, p. 58)

bie et obligent alors à exploiter le système dans la mesure du possible : interruption d'une section du système car l'infrastructure a été endommagée, fermeture d'une gare ayant été inondée, etc. Le second cas s'inscrit dans une logique, à l'inverse, **proactive** car elle offre la possibilité de planifier, d'anticiper le risque inondation et les dommages potentiels. Cette logique est même salutaire car elle permet de préserver l'ensemble des composants dont certains pourraient fonctionner temporairement sous des conditions d'inondation avec, néanmoins, le risque de les endommager de façon définitive. Une voie ferrée sous les eaux peut par exemple être, selon la réglementation en vigueur sur les réseaux ferrés en France et à l'international pour la plupart, exploitée à vitesse réduite tant que le haut des rails est visible ; cependant, faire circuler des trains sur une telle voie aux caractéristiques mécaniques diminuées à cause de la présence non prévue d'eau risque d'endommager de façon irréversible la plateforme et la banquette de ballast. Cet exemple élémentaire met en exergue le rôle de préservation de l'intégrité physique d'un système urbain que recouvre le principe de dégradation du fonctionnement.

7.1.4 Aspect spatial : une autre dimension inhérente au fonctionnement en mode dégradé

La dimension **spatiale** est intrinsèque à toute stratégie qui vise à dégrader le fonctionnement d'un système de transport guidé dans un contexte de gestion du risque inondation.

Du rôle amplificateur des changements climatiques sur les risques naturels (QUENAULT, 2013b) à l'exposition manifeste et connue des populations à des risques tels que le risque inondation (MEDDE, 2012), l'argumentaire est long en faveur de méthodologies d'analyse des risques qui affectent les sys-

tèmes urbains. Pour être pertinentes, ces méthodologie doivent, qui plus est, être inscrites spatialement (GONZVA *et al.*, 2016d). Cette réflexion est valable pour les stratégies ou actions visant à la mise en fonctionnement dégradé d'un système de transport guidé ; elles répondent, en effet, à un besoin lié à la gestion des risques qui touchent ces systèmes. Ces stratégies d'exploitation dégradée ont nécessairement une attache spatiale car la dégradation fonctionnelle du système est usuellement relative à une section voire à une ligne donnée d'un réseau plus global, par exemple une ligne ferroviaire régionale inondée qui fonctionne en mode dégradé au sein d'un réseau national.

Dans ce contexte, la construction d'un modèle relationnel de données géographique se révèle à-propos afin de caractériser la vulnérabilité d'un système de transport guidé soumis à un risque d'inondation (GONZVA *et al.*, 2016d). A partir d'une spatialisation d'un modèle fonctionnel et dysfonctionnel du système, il est en effet théoriquement possible de concevoir un outil d'évaluation de la vulnérabilité d'un système de transport guidé face à une inondation. Plus précisément, cet outil permet de déterminer les éléments du système qui sont impactés par effet en cascade à partir de la défaillance d'un élément initial en intégrant le modèle d'interdépendances développé dans les chapitre 3 et chapitre 4. Ainsi, **l'information géographique rend possible le croisement entre un zonage spatial de l'aléa avec une position spatiale du système de transport guidé, permettant ainsi de déterminer de quelle façon le système est impacté** : quels composants sont touchés par l'aléa ? Quelle est l'incidence sur d'autres composants qui sont alors touchés indirectement ? Comment est-il possible d'exploiter le système de façon dégradée connaissant l'ensemble des composants impactés ? Finalement, l'analyse de risque effectuée pour identifier ces composants du système directement et indirectement défaillants gagne en consistance en orientant la gestion des risques vers une approche englobante et spatialisée qui intègre l'aléa, les systèmes urbains et leurs usages, et le territoire.

7.1.4.1 Synthèse

Dans un contexte de gestion des risques, le fonctionnement en mode dégradé peut être considéré comme un principe d'exploitation d'un système technico-fonctionnel. Ce principe est implémenté, mis en action grâce à des stratégies qui formalisent de façon quantitative, qualitative, spatiale et temporelle la forme que prend la dégradation du service assuré par le système. Tout mode dégradé peut ainsi être planifié ou subi (TOUBIN, 2014, p. 185) et tout mode dégradé doit donc être construit à partir des quatre **dimensions-clés** proposées dans cette recherche que sont ses caractéristiques **quantitatives, qualitatives, spatiales et temporelles** (Figure 7.6).

Les exemples de dégradation qualitative et quantitative de l'exploitation démontrent que les systèmes de transport guidé sont des **systèmes dégradables** c'est-à-dire des « *systèmes sûrs fonctionnant en mode opérationnel avec une performance optimisée lorsqu'il n'y a pas de pannes, mais pouvant montrer une dégradation de leur performance en présence de dysfonctionnements ou de pannes de leurs composants, tout en continuant à fonctionner* » (ABO, 2011, p. 11). Certaines définitions de la résilience sont, d'ailleurs, construites à partir de cette capacité pour des systèmes à être ou non fonctionnellement dégradables. Par exemple, (LAPRIE, 2008) propose une définition de la résilience d'un système comme sa capacité à continuer à délivrer un service raisonnablement fiable lorsqu'il fait face à des perturbations ou des changements⁹.

Cependant, il existe des **obstacles** importants à l'élaboration et à la mise en place concrète de stratégies de fonctionnement en mode dégradé.

9. "The persistence of service delivery that can justifiably be trusted, when facing changes."

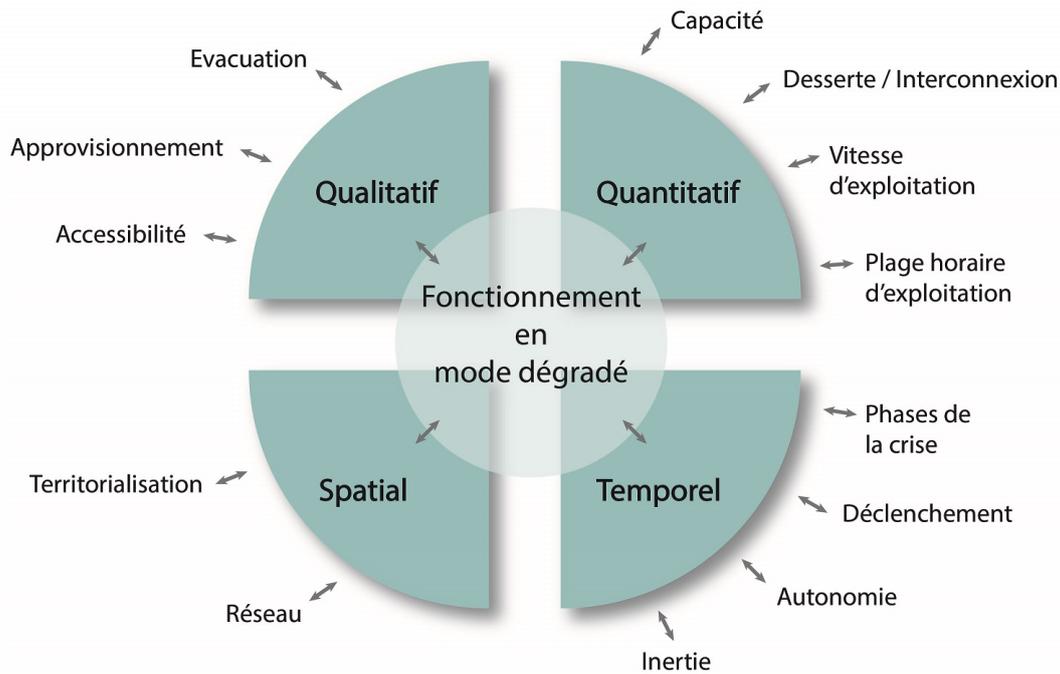


FIGURE 7.6 – Quatre dimensions-clés proposées pour caractériser toute stratégie de fonctionnement dégradé et pistes ou d’actions concrètes (source : auteur)

Premièrement, l’exploitation en mode dégradé **potentialise la réalisation d’incidents ou d’accidents**, par rapport à la situation où le système est exploité normalement. L’exploitation de façon dégradée crée, en effet, des faiblesses au sein du système ou des conditions latentes qui favorisent l’apparition de défaillances, d’incidents ou d’accidents. Ce principe fait référence au célèbre « modèle de Reason » ou « modèle du fromage Suisse » qui représente tout accident comme une combinaison d’un ensemble de défaillances, organisationnelles, humaines ou techniques, issues de conditions latentes au sein des dispositifs de défense du système qui permettent, finalement, l’émergence d’une trajectoire accidentelle (LAROUZEE *et al.*, 2014) (Figure 7.7). Cette situation nécessite alors d’adopter une conduite irréprochable à l’égard des modes dégradés d’exploitation en :

- **évaluant le risque** que représente toute stratégie de fonctionnement du système de façon dégradée. Il est, en effet, essentiel d’intégrer que tout mode dégradé d’exploitation dégrade en conséquence les marges de sécurité qui assurent en exploitation nominale le bon fonctionnement du système¹⁰ (JOHNSON *et SHEA*, 2007a). De ce fait, tout mode dégradé doit faire l’objet d’une analyse de risque globale afin de déterminer si une telle stratégie d’exploitation ne compromet pas la sécurité des usagers transportés et l’intégrité du système à des niveaux inacceptables. Comme l’indique (NICOLET, 2008), « *plus on se trouve en situation de fonctionnement dégradé, plus la priorité doit être donnée à la sécurité par rapport à la production, car — ne l’oublions pas — tout accident prend naissance en mode dégradé* » ;
- **développant une « culture de sécurité »** (JOHNSON *et SHEA*, 2007a; JOHNSON *et al.*, 2009) permettant à tous les acteurs d’être formés à adopter le comportement adéquat lorsque le système est en mode dégradé. En effet, des retours d’expériences d’incidents et accidents démontrent en fait que le risque est accru lorsqu’un système de transport ferré fonctionne en mode dégradé car les procédures existantes sont inadéquates à ce mode particulier d’exploitation ou encore que les opérateurs ne sont pas suffisamment formés à exploiter les composants et sous-systèmes autrement que dans le mode nominal¹¹ (MCINERNEY, 2001, p. 43). Les modes dégra-

10. "Degraded modes eroded the safety margins that usually protected normal operating practices."

11. "Many accidents described as a degraded mode of occur during what is operation [...] [because] the risk of accidents

dés d'exploitation ne présentent pas en eux-mêmes un risque supplémentaire si tant est que tous les opérateurs bénéficient d'une connaissance et d'un savoir-faire appropriés pour faire face à de potentiels dangers associés à un fonctionnement en mode dégradé¹² (JOHNSON et SHEA, 2007a) ;

- **développant une « culture de la dégradation »** afin que les usagers, et plus généralement la société, soient en mesure d'accepter que le service fourni par un système technico-fonctionnel tel qu'un système de transport guidé soit temporairement réduit. Les obstacles sociétaux et culturels sont, en effet, très grands à l'égard de toute dégradation même mineure de la qualité du service rendu par un équipement public. Or, « *la continuité de service n'est pas toujours la priorité. Il faudra par exemple, décider si l'on préfère avoir un service interrompu pendant dix jours, ou si l'on préfère avoir un service interrompu pendant deux jours mais dégradé pendant deux mois.* » (TOUBIN, 2015).

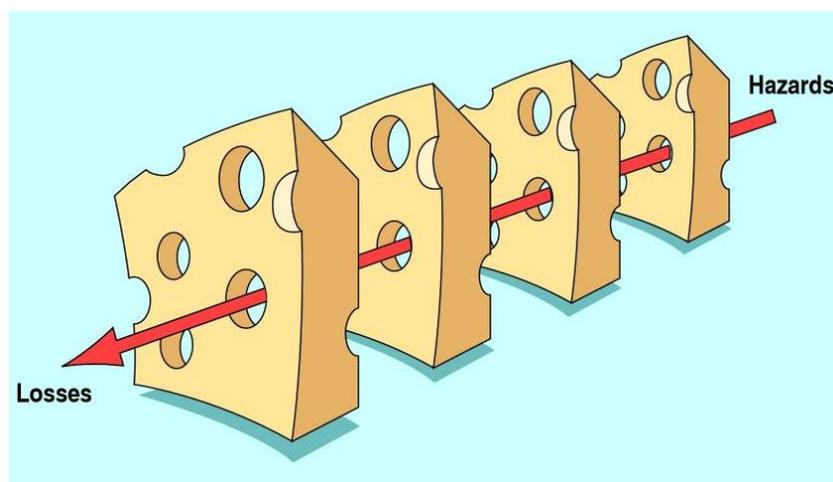


FIGURE 7.7 – Représentation du modèle de Reason ou « modèle du fromage suisse » (REASON, 2000)

Deuxièmement, ce qu'appelle (LAGADEC, 2009) le « facteur-réseau » est un obstacle fort à la mise en place d'un fonctionnement en mode dégradé pour tout type de système urbain actuel : « *la place vitale des réseaux, l'interdépendance entre ces réseaux et la dépendance totale vis-à-vis des réseaux [...] dans les sociétés contemporaines où le "juste-à-temps" généralisé a été consacré comme principe et moteur de l'efficacité économique* » fait que « *les possibilités de retour sur des modes dégradés sont quasiment inexistantes* » (LAGADEC, 2009, p. 9), même de façon transitoire. Par conséquent, le fonctionnement en mode dégradé diffère selon que l'échelle considérée soit celle d'un système urbain ou de plusieurs systèmes urbains connectés par un réseau d'interdépendances. Plus l'échelle considérée en matière de système technico-fonctionnel est importante et plus la mise en place d'un fonctionnement global en mode dégradé est complexe : problématique d'échelles imbriquées, multiplicité des analyses à mener à des niveaux différents, etc.

is increased if the procedures or training are inadequate or if there is a lack of an appropriate safety culture."

12. "However, lack of appropriate knowledge and skills may have undermined the engineers' or drivers' attempts to cope with the failures that were associated with these degraded modes."

Synthèse

La notion de fonctionnement en mode dégradé d'un système ne bénéficie pas de définition unique. Cela tient au fait que ce qui est entendu par « dégradation » de l'exploitation peut être très variable et que, de surcroît, le fonctionnement en mode dégradé n'est pas toujours attractif car propice à l'occurrence de risques. Néanmoins, face à une perturbation telle qu'une inondation, le mode dégradé peut représenter un atout pour le système en permettant un maintien de l'exploitation par une réduction quantitative ou qualitative du niveau de service fourni. Une dégradation d'ordre quantitatif correspond en général à des mesures traduisant un état de détérioration du système. Ces mesures sont de plusieurs types : réduction de la vitesse de circulation, des stations desservies, etc. Une dégradation d'ordre qualitatif repose quant à elle sur des services différents du système par rapport au service nominal pour lequel il est conçu. Ces mesures revêtent un rôle essentiel à une échelle d'ailleurs plus large que le système : évacuation des populations à l'approche d'une inondation, accès aux secours, etc. Deux autres aspects sont importants pour caractériser le fonctionnement en mode dégradé : l'aspect temporel et l'aspect spatial. Le premier est relatif au moment où une mesure de dégradation est enclenchée et est voisin des notions d'inertie et d'autonomie. Le second est relatif à la zone sur laquelle est déployée une mesure de dégradation : une section de ligne de transport, une ligne complète, une partie d'un réseau, etc. Ainsi, ces quatre dimensions sont proposées pour former un cadre de définition et de mise en œuvre de toute stratégie de fonctionnement dégradé.

7.2 Le fonctionnement en mode dégradé, un éventail pluriel de mesures pour la continuité d'activité

Après avoir défini et déterminé les dimensions essentielles de toute stratégie visant à faire fonctionner un système urbain en mode dégradé avant, pendant et après une perturbation telle qu'une inondation, l'objectif est d'identifier des exemples concrets d'exploitation dégradée. Ces exemples démontrent, qui plus est, de quelle manière la capacité à fonctionner en mode dégradé est une composante importante de la résilience (LHOMME *et al.*, 2010, p. 91 ; TOUBIN, 2014, p. 137) en orientant résolument la démarche d'amélioration de la résilience vers la continuité d'activité¹³ d'un système.

7.2.1 D'une volonté stratégique de continuité d'activité...

Le fonctionnement en mode dégradé d'un système de transport sous-tend l'idée de maintenir son activité, à savoir fournir un service permettant la mobilité des personnes avant une inondation, pendant et après celle-ci. Cette continuité d'activité de services dits d'*importance vitale* (CODE DE LA DÉFENSE, 2007), correspondant au service que fournissent les infrastructures critiques, constitue un enjeu crucial en phase de crise et de post-crise. En effet, la résilience d'un système est directement

13. Dans cette recherche, la *continuité d'activité*, la *continuité de service* ou encore la *continuité du service assuré* sont des expressions utilisées avec la même signification.

liée à son degré de préparation en matière de continuité d'activité lors d'un évènement perturbateur en : réduisant les répercussions de la crise à court, moyen et long terme, en raccourcissant la phase d'inactivité et en facilitant le retour à une activité dite normale (COMMISSARIAT GÉNÉRAL AU DÉVELOPPEMENT DURABLE, 2013, p. 21). La continuité d'activité donne au concept de résilience une portée collective qui dépasse l'échelle du système urbain ou du système de systèmes urbains. C'est la raison pour laquelle l'enjeu national de résilience, en France, « renvoie de manière centrale aux capacités de continuité d'activités développées en propre par le citoyen, par les organisations privées et publiques ainsi qu'à la prise en compte de leurs relations dans cette perspective » (COURSAGET et HAAS, 2014a).

Le *Livre Blanc pour la Défense et la Sécurité Nationale* traduit cet enjeu de résilience collective en France en présentant la sécurité des activités d'importance vitale comme un élément de renforcement de résilience sur le territoire national (REY, 2015, p. 30). Un socle réglementaire définit d'ailleurs explicitement les obligations des **Opérateurs d'installations d'Importance Vitale** (OIV), en charge d'un service d'importance vitale comme les transports, qui doivent contribuer, à leurs frais, à la protection de ces installations, en appliquant des mesures de sécurité contenues dans un plan particulier de protection (COURSAGET, 2010). L'ensemble de ce dispositif est décrit dans le décret n° 2006-212 du 23 février 2006 relatif à la sécurité des activités d'importance vitale, codifié aux articles R.1332-1 et suivants du Code de la Défense. (COURSAGET, 2010) souligne l'importance du vocable choisi d'« importance vitale » : « l'expression d'"activités d'importance vitale" a été retenue en évitant les mots "infrastructures critiques" pour insister sur la notion de services à maintenir et non d'infrastructures physiques à protéger ».

Dans le cas du réseau ferré national qualifié d'OIV, des **Points d'Importance Vitale** (PIV) ont été identifiés. Ces éléments appartiennent à l'OIV et peuvent correspondre à un établissement, une installation ou un ouvrage situé sur le territoire national. Le réseau ferré national regroupe une trentaine de PIV (DURVILLE *et al.*, 2013, p. 22) dont :

- deux relèvent de SNCF-Réseau (ex RFF) : centres de télécommunications ;
- les autres ont été attribués à SNCF (SNCF-Mobilités) : sous-stations, commande des postes d'aiguillage, tunnels et autres ouvrages souterrains.

Dans le cas de la RATP, classée également comme OIV, cinq PIV sont identifiés parmi lesquels les trois postes de contrôle de trafic situés à Bastille, Vincennes et Denfert-Rochereau (DURVILLE *et al.*, 2013, p. 23).

En plus de cette vision réglementaire, des **normes** cherchent à définir la continuité d'activité. La gestion de la continuité d'activité est, en effet, considérée comme un « processus de management holistique qui identifie les menaces potentielles pour une organisation, ainsi que les impacts que ces menaces, si elles se concrétisent, peuvent avoir sur les opérations liées à l'activité de l'organisation, et qui fournit un cadre pour construire la résilience de l'organisation, avec une capacité de réponse efficace préservant les intérêts de ses principales parties prenantes, sa réputation, sa marque et ses activités productrices de valeurs » (AFNOR, 2012). Là encore, le lien entre continuité d'activité et résilience est mis en avant.

Or, cet enjeu global de continuité d'activité sous-jacent à l'enjeu d'amélioration de la résilience nécessite un important travail de **planification** en amont. Cette planification ne doit cependant pas conduire à une mise en œuvre trop complexe ou trop rigide mais doit plutôt être conçue « comme une boîte à outils permettant de réagir "en mode réflexe" et d'adapter rapidement les procédures ainsi que l'organisation à une situation spécifique et évolutive » (COURSAGET et HAAS, 2014a). La planifica-

tion permet ainsi de « *décliner la stratégie et l'ensemble des dispositions qui sont prévues pour garantir à une organisation la reprise et la continuité de ses activités à la suite d'un sinistre ou d'un événement perturbant gravement son fonctionnement normal* » (SGDSN, 2013). Dans ce contexte, des **Plans de Continuité d'Activité (PCA)** existent pour justement concrétiser les stratégies de maintien des activités d'importance vitale en période de crise.

7.2.2 ... vers des Plans de Continuité d'Activité (PCA)

Le PCA est l'outil qui, définissant et mettant en place les moyens et les procédures nécessaires, guide la réorganisation permettant d'assurer le fonctionnement des missions essentielles du service public en cas de crise (CEPRI, 2011a, p. 13), notamment une inondation.

Le travail de construction d'un PCA ne s'improvise pas. Pour cette raison, des guides existent.

Le Secrétariat général de la défense et de la sécurité nationale a, en effet, produit en 2013 un guide dont l'objectif est de fournir une démarche méthodologique permettant l'élaboration concrète d'un PCA en identifiant plusieurs étapes à suivre (Figure 7.8) (SGDSN, 2013). La méthode proposée se veut simple et repose sur cinq étapes, à la fois séquentielles et itératives et est destinée aux organisations publiques et privées. Cette publication librement accessible met en cohérence les normes et approches existantes (COURSAGET et HAAS, 2014b). Cette cohérence est un enjeu essentiel afin que l'ensemble des PCA élaborés à l'échelle de tous les OIV se complètent et s'alimentent. (MOATY, 2015, p. 404) parle justement de « *mettre en réseau* » les PCA pour « *éviter les prises de décision contradictoires entre deux ou plusieurs enjeux interdépendants directement ou indirectement* ». Ainsi, ce guide, dans cette optique, vise à « *mettre en cohérence [...] les différentes approches et documentations existantes, dans le cadre d'une démarche qui amène le secteur public et le secteur privé à renforcer la résilience nationale de manière complémentaire* » (SGDSN, 2013, p. 5). La dimension collective et la mise en complémentarité sont donc bien le moteur de la construction d'une continuité d'activité globale à l'échelle de la ville.

DÉMARCHE D'ÉLABORATION D'UN PLAN DE CONTINUITÉ

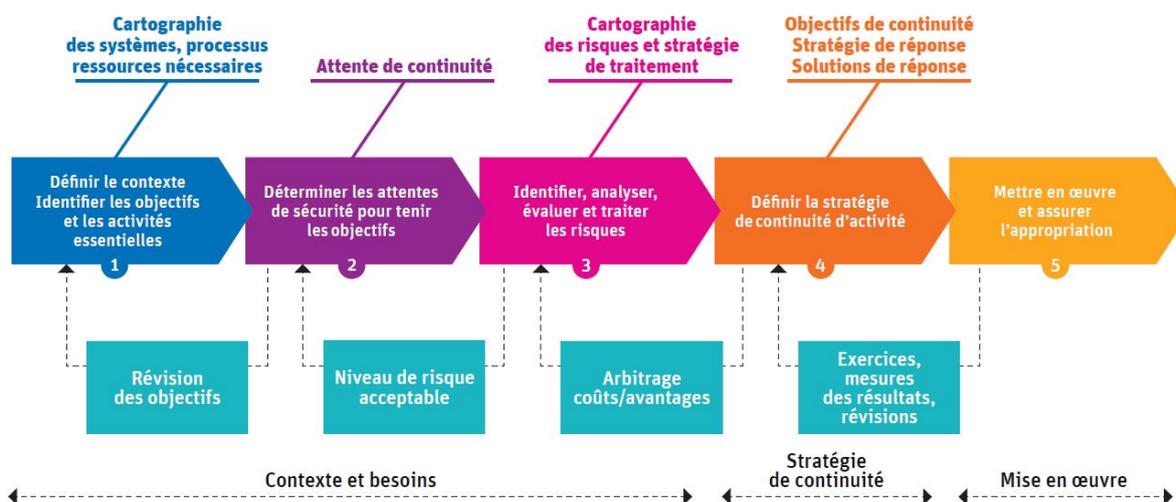


FIGURE 7.8 – Démarche méthodologique d'élaboration d'un Plan de Continuité d'Activité (PCA) selon le guide réalisé par le Secrétariat général de la défense et de la sécurité nationale (SGDSN, 2013)

Le Centre Européen de Prévention du Risque d'Inondation a produit également un guide méthodolo-

gique similaire pour l'élaboration d'un PCA et constitué des grandes étapes suivantes (CEPRI, 2011a, p. 17) :

1. Phase préliminaire : établissement du pilotage et de l'animation ;
2. Détermination des scénarios d'inondation ;
3. Choix des missions prioritaires ;
4. Analyse des besoins et des ressources disponibles pour réaliser les missions prioritaires ;
5. Détermination des orientations et objectifs pour l'élaboration du PCA ;
6. Opérationnalisation du PCA ;
7. Faire vivre le PCA.

Il est important de mentionner que certains PCA rappellent la composante majeure identifiée précédemment (cf. 7.1.4.1) d'information et de formation des équipes, au sein de l'organisme gestionnaire du service d'importance vitale, aux tâches particulières qu'ils auront à réaliser lors de l'activation du PCA (CEPRI, 2011a, p. 42). Un tel plan n'a donc de sens que si tous les acteurs de l'organisme sont capables de le mettre en œuvre.

7.2.3 Exemples de Plans de Continuité d'Activité (PCA) appliqués aux systèmes de transport dans le cas du risque inondation

7.2.3.1 Cas de la RATP

7.2.3.1.1. *Éléments de définition de la gestion de crise*

De façon plus générale et non spécifique au risque inondation, la gestion de crise au sein de la RATP peut se résumer à une action sur deux domaines considérés comme essentiels (GAUTIER, 2016) :

- la *prévention* : identifier les points de vulnérabilité de l'entreprise et les menaces associées ; prévoir les moyens d'action ;
- l'*intervention*.

Pour ces deux domaines, la RATP a mis en place une gestion de la communication de crise intéressante à développer. En effet, (GAUTIER, 2016) dresse les principes généraux d'une communication, vis-à-vis de l'interne et vis-à-vis de l'externe, en temps de crise :

- stratégie digitale : la maîtrise des réseaux sociaux est mentionnée comme indispensable au vu de « *l'instantanéité et de la rapidité qui les caractérisent* ». En particulier, les risques de *bad buzz* et d'informations erronées diffusées largement doivent être maîtrisés par la RATP ;
- communiquer rapidement : ce principe consiste à diffuser des messages dès les premières heures de la crise. Il s'agit d'un premier message « *à dimension humaine, de compassion et d'empathie à l'égard des victimes et tout personne touchée* » complété par des informations témoignant de la mobilisation des équipes en cours ou à venir, des actions en cours ou à venir. Pour cela, un porte-parole doit être nommé dans le but de porter des messages cohérents et uniques ;
- coordonner sa communication, maîtriser ses messages : le principe est celui de centraliser toute action de communication afin de vérifier les informations délivrées en interne et en externe, de déterminer le bon moment pour la diffusion des messages, etc. ;
- sortir de la crise : l'idée essentielle est de maintenir un niveau de veille quant à la diffusion de messages dans le but de rétablir la confiance, du personnel comme des usagers, vis-à-vis de la

RATP. Est mentionnée également l'importance de tirer des leçons sur cette gestion de crise afin d'identifier certaines lacunes, ce qui a été bien fait, etc.

7.2.3.1.2. Cas de la gestion d'une inondation

Le réseau métropolitain exploité par la RATP représente un enjeu majeur pouvant être fortement endommagé dans le cas d'une crue de la Seine. Pour cette raison, en 2002, la RATP a mis en place un plan de protection de son réseau contre le risque inondation. Le plan prévoit la mise en œuvre rapide d'actions suivant différents seuils relatifs à la montée des eaux (GAUTIER, 2016).

Suite à ce plan de protection, un PCA concernant le risque inondation a été élaboré afin que la RATP soit apte à gérer son activité en situation dégradée c'est-à-dire après constat des dégâts et avec des effectifs réduits. De façon plus précise, les objectifs du PCA sont de (BOURGUIGNON, 2013) :

- garantir la sécurité des personnes et la protection des installations fixes et du matériel roulant ;
- disposer de systèmes d'information opérationnels ;
- revenir le plus vite possible à une production normale de service.

Pour ce dernier point, le PCA inondation de la RATP inclut un **Plan de Reprise d'Activité (PRA)** en fin de crue.

Un plan de communication du risque inondation existe également. Il se décline là aussi en actions selon plusieurs seuils relatifs à la montée des eaux et selon les événements identifiés dans le PCA (GAUTIER, 2016) : fermeture de gares, d'axes ferroviaires, etc. En particulier, la mise en place d'un poste de commandement communication (PC COM) y est prévue, comme détaillé ci-après.

(GAUTIER, 2016) présente la procédure générale lors du déclenchement d'une situation de crise à la RATP :

- Trois structures permanentes se mobilisent :
 - la *permanence générale* (PG) qui supervise la gestion des incidents au niveau du réseau de transport ;
 - le *PC sécurité* qui assure la sécurisation et protection du réseau ainsi que les échanges avec les forces de police ;
 - les *centres opérationnels* qui sont constitués des postes de commandement des lignes de transport, des postes de commandement des sites de maintenance, etc.
- Trois structures temporaires sont mises en place :
 - la *cellule présidence* dont le rôle est de déterminer les orientations stratégiques globales : gestion de l'exploitation, communication externe, etc. ;
 - le *PC COM* (poste de commandement communication) qui assure la mise en action de la stratégie de communication de crise ;
 - la *cellule de crise* qui pilote de façon concrète les prises de décision issues de la cellule présidence.

Enfin, la RATP insiste également sur la « *culture d'exercice* » qu'il est essentielle d'avoir afin que les plans soient « *testés, éprouvés et ainsi sans cesse revus pour améliorer la réactivité de l'entreprise* » (GAUTIER, 2016). Parmi ces exercices, certains consistent à monter des protections au niveau des éléments critiques pour la gestion de crise tels que le siège de la RATP situé à proximité de la Seine. L'objectif est d'entraîner les équipes à monter des batardeaux de protection en un temps donné, en l'occurrence 4 heures maximum¹⁴ (Figure 7.9).

14. http://www.ratp.fr/fr/ratp/r_84151/la-ratp-protege-son-reseau-en-cas-de-crue



FIGURE 7.9 – Exercice de montage d'aqua-barrières ou batardeaux réalisé le 29 janvier 2013 (source : RATP)

Pour conclure, la continuité d'activité, et plus généralement la gestion de crise, fait l'objet d'importants travaux de planification par la RATP. L'enjeu de protection des systèmes ferroviaires est très clair dans le cas particulier du risque inondation. Quelques interrogations peuvent, cependant, être émises. Premièrement, la prise en compte des interdépendances entre l'ensemble des systèmes ferroviaires semble faible. Il est, en effet, fort probable que toute la planification amont proposée par la RATP ne soit pas applicable aussi simplement que prévue car le risque inondation peut vraisemblablement être différent des scénarios imaginés ; or, cette situation peut amener par exemple à devoir prioriser la protection de certains composants faute de temps, de moyens, de ressources. Quelle réaction observée si les mille employés de la RATP appelés à intervenir¹⁴ ne peuvent pas se rendre sur leur lieux d'intervention car ils habitent hors de Paris et que le réseau routier est inondée ? Quelle réaction avoir dans le cas où les 273 bétonnières prévues¹⁴ pour l'édification de murs de protection ou encore les 173 groupes électrogènes¹⁴ ne peuvent pas être acheminés sur les sites d'implantation car une partie du réseau routier est fermée préventivement à l'inondation ? Cet aspect ne semble pas apparaître clairement dans les procédures proposées par la RATP. Deuxièmement, en corollaire à la question générale des interdépendances, la dépendance de la RATP vis-à-vis d'autres réseaux est très forte. Sans le bon fonctionnement du réseau routier, par exemple, une grande partie des procédures et des actions semble irréalisable. Une articulation est donc indispensable entre la gestion de crise planifiée par la RATP et la gestion de crise planifiée par les autres opérateurs.

7.2.3.2 Cas de SNCF

L'exemple de la gestion de crise de SNCF est développé dans cette section. Le traitement de la continuité d'activité, de la reprise d'activité, de la protection des systèmes ferroviaires est intéressant, complet et a surtout le mérite d'avoir été testé dans un cas récent de crue de la Seine ayant eu des effets sur le réseau de transport ferré exploité par SNCF. C'est la raison pour laquelle cette recherche propose de retenir l'exemple de SNCF comme une démarche très pertinente en matière de gestion d'un risque inondation. En particulier, la notion d'articulation entre actions à mettre en œuvre vis-à-vis des différents composants ferroviaires semble être clairement prise en compte, comme précisé ci-après.

SNCF élabore une démarche de continuité d'activité relative à la région parisienne et au risque inondation dû à d'éventuelles crues de la Seine. La proximité avec la Seine de plusieurs lignes exploitées et gérées par SNCF dont certaines sont d'ailleurs âgées requiert donc un travail important de protection des systèmes avant et pendant la crue, et de remise en fonctionnement après la crue.

Les informations contenues dans une telle démarche sont confidentielles dans la mesure où elles

concernent notamment les vulnérabilités précises des systèmes. Ce paragraphe expose donc les principes de construction et de mise en œuvre de la démarche au sein de l'entreprise ferroviaire.

7.2.3.2.1. *Éléments de structuration et d'organisation de SNCF*

Quelques éléments de contexte et de fonctionnement de SNCF sont préalablement nécessaires pour comprendre la démarche de continuité d'activité mise en place. Depuis le 1er janvier 2015, SNCF est organisée en trois Etablissements Publics à caractère Industriel et Commercial qui sont SNCF (l'EPIC de tête), SNCF Réseau et SNCF Mobilités. SNCF Réseau est le gestionnaire du réseau ferré national tandis que SNCF Mobilités est l'exploitant ferroviaire. SNCF Réseau réunit plusieurs compétences au sein de cinq directions opérationnelles :

- *Ingénierie et Projets* : réalise les études et la conception des infrastructures ferroviaires pour des systèmes de transport en France et dans le monde ;
- *Accès au réseau* : en charge de la répartition des sillons¹⁵ en définissant l'usage optimisé des voies ferrées du réseau ;
- *Circulation* : en charge de la gestion du trafic en temps réel (opérations de régulation de la circulation, traitement des incidents) et de la mise en place de mesures de protection des équipes de maintenance lors des plages de temps réservées à la maintenance ;
- *Maintenance et travaux* : en charge de la surveillance, de l'entretien, de la modernisation et du développement du réseau national avec des missions diverses notamment de génie civil (construction d'ouvrages d'art, maintenance de la voie, régénération et construction de lignes) et de génie électrique (maintenance des caténaires et électrification de lignes) ;
- *Île-de-France* : faisant partie des 12 directions territoriales de SNCF Réseau, la direction Île-de-France est structurée de la même façon que l'EPIC c'est-à-dire avec une entité en charge de l'accès au réseau, une entité en charge de la circulation, une entité en charge de la maintenance et des travaux et une entité en charge des projets (Figure 7.10).

Le périmètre d'action de la direction Île-de-France est également scindé en six *territoires de production* : Paris Nord, Paris Est, Paris Sud Est, Ouest Parisien, Paris Rive Gauche et Paris Saint Lazare. Au sein de chacun de ces territoires de production, il existe des établissements locaux de production dont notamment les *InfraPôles*, les *InfraLogs* et les *Etablissements Infra Circulations* (EIC). Ces territoires de production reprennent en fait à leur tour la même structure d'entités dédiées à la maintenance et aux travaux (InfraPôles et InfraLogs), à la circulation (EIC) et à l'ingénierie et aux projets (directions ou agences).

7.2.3.2.2. *Problématique posée par le risque inondation en Île-de-France*

Le sujet du risque inondation que posent les crues de la Seine en région parisienne touche tous ces niveaux au sein de SNCF Réseau. En 2014, la ville de Paris a demandé à chaque opérateur de réseau, dont SNCF, d'élaborer son Plan de Protection Contre les Inondations (PPCI) afin de préciser les conséquences d'une inondation sur le service assuré par l'opérateur. La référence est celle de la crue de 1910 de la Seine. SNCF avait réalisé des études au sujet de ce risque de crue de la Seine depuis le milieu des années 2000 (SNCF, 2015). Suite à cette demande émanant de la ville de Paris, SNCF a créé une Mission Inondations à l'échelle nationale animée par des établissements régionaux au travers d'une démarche de planification de la continuité d'activité.

C'est à l'échelle locale des territoires de production franciliens et des établissements qu'ils incluent qu'est mise en place la démarche de PCA Île de France vis-à-vis du risque inondation représenté par la

15. créneaux horaires pour faire circuler les trains d'un point à un autre sur le réseau ferré national

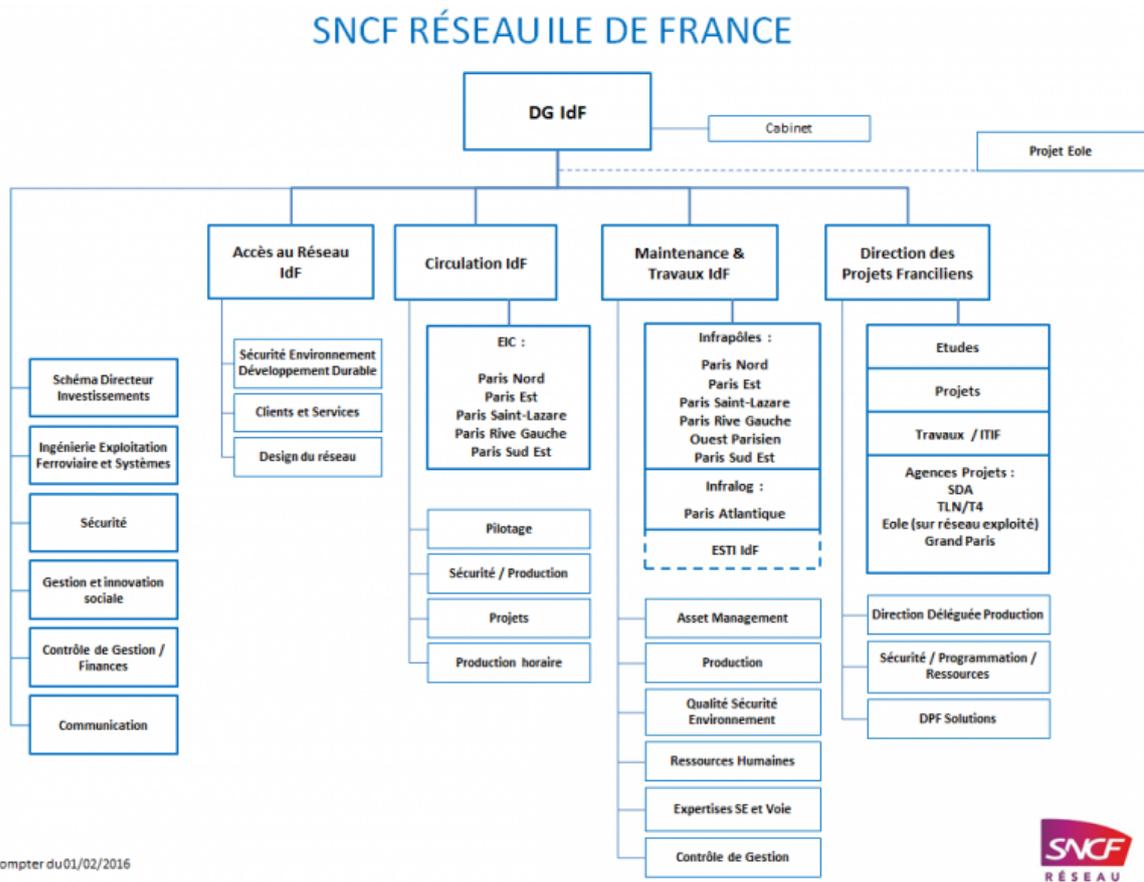


FIGURE 7.10 – Organigramme de la Direction Île-de-France de SNCF Réseau (source : SNCF)

Seine. Deux grands principes guident l'élaboration de ces PCA : la **construction** de PCA pour chaque établissement et la **mise en cohérence** de ces PCA à l'échelle du territoire de production.

7.2.3.2.3. Construction d'un PCA au sein de SNCF

L'exemple du PCA réalisé par l'InfraPôle de Paris Rive Gauche est présenté pour illustrer l'élaboration d'un tel plan à l'échelle d'un établissement appartenant à un territoire de production ¹⁶.

Deux volets principaux sont traités :

- une première partie centrée sur une analyse du risque qui permet d'identifier les vulnérabilités du réseau pour chaque élément constitutif et d'établir un diagnostic des éléments les plus sensibles ;
- une seconde partie centrée sur les procédures et actions de protection avant et pendant l'inondation pour guider les équipes.

Dans le premier volet, la stratégie est fondamentalement basée sur un **diagnostic global du réseau**. L'objectif est de connaître la vulnérabilité du réseau composant par composant. Dans cette optique, des méthodes telles que présentées dans les précédents chapitres apparaissent pertinentes et appropriées dans la pratique afin de comprendre précisément les phénomènes de défaillances susceptibles de survenir. Cette stratégie est très bien détaillée en ce qui concerne la phase pré-inondation et durant l'inondation. En revanche, elle l'est moins pour la phase de retour à la normale post-inondation. Pour celle-ci, cependant, la philosophie reste la même : avoir un diagnostic le plus précis et le plus global des éléments touchés. Dans ce contexte, des tournées spécifiques d'équipes sont prévues, des listes de contrôle et de vérification d'éléments critiques sont établies. Parmi ces contrôles, il est particulièrement indispensable de vérifier la bonne géométrie des voies qui a pu être altérée par la présence d'eaux pendant plusieurs jours, de désoxyder les rails pour des problématiques de bonne détection de la présence de trains et de contrôler le bon fonctionnement des composants électriques, tout cela afin de reprendre la circulation en toute sécurité (SNCF, 2016b). La démarche est donc bien construite sur la base de diagnostics des éléments affectés par l'inondation plutôt que de scénarios d'inondation (eaux à 4 mètres, eaux à 5 mètres, etc.).

Dans le second volet, **cinq phases de crise sont définies** dans ce PCA selon les hauteurs d'eau de la Seine. Pour autant, l'ambition n'est pas de réfléchir par scénarios de référence et identifier l'impact sur le réseau d'une montée des eaux de 4 mètres, de 5 mètres, de 6 mètres, etc. Ces hauteurs d'eau définies servent en fait à élaborer les plans d'actions dans le cadre de la protection du réseau et répondent alors aux interrogations suivantes : quelles actions mener si la montée des eaux de la Seine est de 4 mètres ? de 5 mètres ? de 6 mètres, etc. En quelque sorte, le PCA se fonde donc sur des **hauteurs d'eau d'action** plutôt que sur des **hauteurs d'eau d'impact**. Cependant, une telle approche nécessite une parfaite connaissance de la dynamique de la crue. La dépose des composants électriques ou la mise en place de batardeaux amovibles dans les gares sont autant d'actions à mener qui peuvent nécessiter de 24h à 72h. Il est donc essentiel d'avoir des prévisions fiables quant à la vitesse de montée des eaux afin de déclencher au bon moment les procédures et actions à mener.

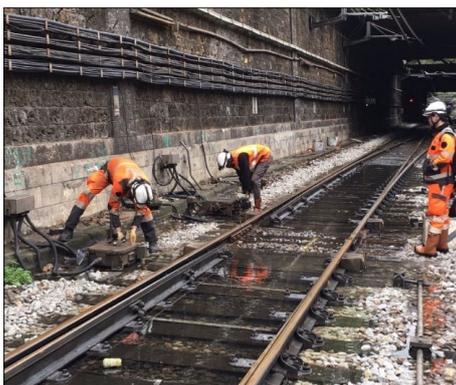
Ces deux volets font l'objet de **mises à jour** régulièrement. La première partie concernant l'identification des vulnérabilités du réseau est actualisée selon les travaux de rénovation réalisés tels que le renforcement de structures de génie civil par exemple (cas des travaux CASTOR pendant les étés sur le RER C) ou le remplacement de composants âgés par des composants neufs. La seconde partie

16. L'essentiel de ce paragraphe se base sur les fructueux échanges réalisés avec Madame Aïda Mortaziq, responsable du Plan de Continuité d'Activité Inondation au niveau de l'InfraPôle de Paris Rive Gauche

est, par voie de conséquence, également actualisée car les actions à réaliser en amont de l'inondation peuvent évoluer avec, par exemple, l'abandon de la mise en place de protection provisoire type batardeau au profit d'un renforcement pérenne (rehausse de mur).

Les **retours d'expérience** et **exercices de préparation** sont aussi des sources très importantes d'informations par rapport à la vulnérabilité du réseau et aux actions de protection et de continuité d'activité à entreprendre. La crue de la Seine entre le 3 juin 2016 et le 10 juin 2016 a permis d'adapter les procédures à appliquer en amont et pendant l'inondation. Les hauteurs d'eau de la Seine à partir desquelles certaines procédures sont déclenchées ont ainsi pu être précisées. De plus, l'exercice SEQUANA 2016, du 7 au 18 mars, a permis de simuler la montée des eaux de la Marne et de la Seine entraînant des inondations afin de tester les capacités de gestion de crise des acteurs et de s'assurer des moyens à déployer sur le terrain. D'autres exercices du même genre, dans le cadre d'un maintien de l'activité et d'une reprise de celle-ci dans un contexte d'inondation, ont donné l'occasion à SNCF de tester ses procédures de protection du réseau et les temps d'installation associés : fermeture des 49 baies d'aération situées au niveau des murs entre les voies du RER C et la Seine (SNCF, 2016a) (Figure 7.11), dépose des éléments sensibles tels que les composants de signalisation, etc.

Les exercices permettent aussi de se connaître avec les acteurs de la crise (Réseau de Transport d'Électricité, Ville de Paris, etc.), de partager les procédures de gestion de crise prévues par chacun, pour éviter les surprises et maîtriser le plus possible les processus.



(a) Démontage des moteurs d'appareils de voie pour les protéger de la montée des eaux de la Seine



(b) Exercice de protection du RER C contre les inondations avec la mise en place de panneaux pour fermer les baies d'aération, 20 janvier 2016

FIGURE 7.11 – Stratégies de protection du RER C en cas de crue de la Seine (source : SNCF)

7.2.3.2.4. Mise en cohérence des PCA au sein de SNCF

Comme indiqué précédemment, chaque établissement présent au sein des territoires de production élabore son PCA. Pour que la démarche de PCA Île de France vis-à-vis du risque inondation dû aux crues de la Seine soit efficace, un travail d'**articulation** entre tous les PCA est indispensable.

Pour ce faire, à l'échelle d'un établissement (Infrapôle, EIC, etc.) des réunions de mise en cohérence sont organisées. Elles permettent de mettre à jour le PCA selon les derniers travaux de rénovation ou de renforcement des systèmes ferroviaires et de partager l'actualisation de procédures avec les différents métiers en cas d'inondation.

Puis, à l'échelle d'un territoire de production, un correspondant au sein de chaque établissement est désigné. Un travail similaire de partage et d'articulation des PCA de chaque établissement est fait. De cette façon, un PCA inondation est formalisé pour Paris Rive Gauche, notamment.

De même, des correspondants de chaque territoire de production se réunissent régulièrement pour

articuler tous ces PCA et ainsi produire un PCA cohérent, pragmatique et mis à jour relatif au risque inondation à l'échelle de l'Île-de-France.

Ce travail d'articulation des PCA repose également sur la problématique suivante : l'existence d'interdépendances fortes entre l'ensemble des établissements (Infrapôle, EIC, etc.) présent en Île-de-France. Pour chaque établissement, les objets à protéger sont différents, mais participent tous ensemble à la circulation des trains. Des arbitrages concertés sont faits pour prioriser la protection et la remise en service de composants ferroviaires par rapport à d'autres ; par exemple, entre une gare et un tronçon de tunnel. Ces interdépendances nécessitent, par conséquent, d'être extrêmement bien anticipées par des procédures claires à l'échelle de l'Île-de-France.

Finalement, l'exemple du PCA inondation à l'échelle de la région démontre que la continuité et la reprise d'activité est une démarche qui doit être **pragmatique, opérationnelle, établie à un instant t donné** et sans cesse **actualisée**.

7.2.4 Limites existantes à la planification de la continuité et de la reprise d'activité

Quelques limites et pistes d'amélioration peuvent être dressées quant aux PCA concernant leur champ réel d'action.

Premièrement, si les PCA sont des outils importants de planification pour la gestion de crise et de la post-crise, ils restent limités à la **phase de reconstruction** à proprement parler (MOATY, 2015, p. 62). Plus exactement, les PCA permettent « *d'anticiper la transition entre la gestion de crise et les phases de réhabilitation et reconstruction* » : recensement des organismes publics et privés essentiels pour un retour rapide à une situation de fonctionnement nominal de la ville, identification des ressources nécessaires pour les maintenir en fonctionnement même de façon dégradée, etc. En phase de reconstruction, ils facilitent donc essentiellement la mise en œuvre des opérations de remise en état (MOATY, 2015, p. 62). Cependant, ce propos peut être nuancé avec le développement de **Plans de Reprise d'Activité** (PRA), comme composante des PCA, tels qu'à la RATP dans un contexte de risque inondation. Orienté vers le redémarrage du service de façon graduelle, le PRA a pour objet principal d'activer des ressources de secours ou de repli, d'identifier l'ordre de reprise de certaines fonctions d'un système, de gérer concrètement le dispositif d'intervention et de restauration des fonctions selon les priorités de reprise établies (SGDSN, 2013, p. 60). Il n'en reste pas moins vrai que même les PRA restent très sommaires à l'égard de la reconstruction à proprement dite : coûts et délais associés aux opérations de reconstruction, pilotage de la reconstruction, etc. Pour ce premier point, le **modèle d'estimation du coût global et du délai global de remise en état** d'un système de transport touché par une inondation prend tout son sens et démontre son intérêt. Il apparaît comme une source pertinente et importante de connaissances dans le cadre de la planification en amont d'une situation de crise.

Deuxièmement, « *les PCA sont aussi trop centrés sur une échelle locale sans prendre en compte les effets dominos liés au fonctionnement en réseau sur des territoires plus vastes que ceux de la collectivité territoriale* » (MOATY, 2015, p. 62). La prise en compte et même l'identification préalable des interdépendances est un des enjeux majeurs d'une continuité d'activité globale urbaine. Le risque, en effet, est que chaque PCA soit réalisé **de façon sectorielle** c'est-à-dire par chacun des OIV sans connaissance aucune du PCA élaboré par un autre OIV ayant pourtant des relations d'interdépendances. (TOUBIN, 2014) traite essentiellement de cette problématique fondamentale en mettant, notamment, en avant

la complexité du partage d'informations confidentielles entre les acteurs. Cette problématique est indispensable pour une imbrication pertinente de ce travail de planification à **l'échelle globale** mais peut, en parallèle, être source de forte réticence auprès des opérateurs ne souhaitant pas forcément indiquer toutes les vulnérabilités précises des réseaux dont ils sont gestionnaires. La collaboration entre opérateurs semble alors possible à partir d'une analyse globale des interdépendances, ne nécessitant pas une trop grande quantité d'informations critiques (TOUBIN, 2014, p. 72). Cette collaboration est d'autant plus cruciale que les PCA de chaque opérateur, et plus globalement les documents qui ont trait à la gestion de crise, sont fondés sur l'hypothèse que les autres réseaux fonctionnent : « la réflexion sur la "résilience" d'un opérateur, en matière de catastrophe naturelle, devrait être fondée sur une hypothèse "zéro service extérieur" : plus d'internet, plus de courant, plus de transports, plus de réseaux bancaires » (DURVILLE *et al.*, 2013, p. 6). Le rapport de 2013 du Conseil général de l'Environnement et du Développement durable relatif à la vulnérabilité des réseaux d'infrastructures aux risques naturels recommande, en effet, aux opérateurs de « réaliser les études de résilience en cas de crise [...] en fonctionnement autonome par rapport aux autres réseaux ».

Cela oriente d'ailleurs les processus de gestion des risques vers une approche proactive, préventive et coopérative contrairement au « comportement attentiste » des opérateurs que met en avant ce rapport à l'égard de certains risques. En tout état de cause, la mise en commun ou **mise en réseau** de l'ensemble des PCA voire la possibilité d'une **co-construction** de ces documents de planification primordiaux pour la continuité d'activité et la reprise d'activité pendant et après une inondation revêt une importance capitale pour l'amélioration de la résilience urbaine face au risque inondation

Troisièmement, il est très probable que la plupart des PCA qui ont été élaborés par les OIV, plus de 200 actuellement en France¹⁷, n'aient jamais été **testés** en situation réelle c'est-à-dire lorsque survient l'aléa auquel ces plans répondent, comme c'est le cas de l'aléa inondation. Il semble donc important d'avoir à l'esprit que dans le cas réel d'une inondation, la continuité d'activité prévue à un niveau de dégradation donnée sur la base d'hypothèses donne en fait lieu à un niveau de dégradation plus important. Cette situation n'est pas nécessairement problématique en tant que telle puisque l'activité du système urbain étudiée sera de toute manière maintenue. En revanche, la dégradation de service réelle sera sans doute plus importante que la dégradation envisagée.

Par ailleurs, un axe important d'amélioration des PCA est de dépasser l'aspect trop souvent **statique** de ce type de planification pour mettre en place, au contraire, un dispositif **évolutif**. En ce sens, prenant exemple de l'expérience de l'ouragan Sandy de 2012 ayant frappé les États-Unis, (GARRIGUES, 2015) affirme qu'« on s'aperçoit maintenant qu'on ne parle plus de PCA : le PCA est dépassé ; il est nécessaire, mais il faut maintenant entrer dans un système de management pour le retour à la normale, c'est-à-dire un état d'esprit, une mentalité, une méthodologie. » Prenant également l'exemple de l'ouragan Katrina ayant de même touché les États-Unis en 2005, (GARRIGUES, 2015) indique plus généralement que les plans, exercices et simulations sont indispensables mais qu'ils doivent être considérés comme une « *acculturation permettant d'être plus réactif plus rapidement* ». Autrement dit, les plans tels que les PCA nécessitent d'être sans cesse **adaptés**, même durant la crise telle qu'une inondation, afin **d'actualiser la stratégie en fonction des données réelles de l'aléa en cours** et non plus des données prises de façon hypothétique en amont. Dans ce contexte, les modèles probabilistes au fonctionnement dynamique tels que le **réseau bayésien construit précédemment** s'actualisent aisément avec les données réelles de l'aléa. Pour pousser le raisonnement de façon extrême, ces plans peuvent être d'une certaine façon des cadres théoriques recensant de façon exhaustive tous les éléments-clés à

17. <http://www.ssi.gouv.fr/administration/protection-des-oiv/protection-des-oiv-en-france>

intégrer pour gérer une crise et les réponses associées, qui devront être alimentés lors de l'occurrence de l'aléa par des données spécifiques à celui-ci. Par conséquent, la souplesse et l'adaptabilité sont des composantes indispensables à toute planification de continuité d'activité d'un système urbain faisant face à un aléa naturel.

Dans les sociétés contemporaines actuelles où l'interdépendance est omniprésente parmi l'ensemble des systèmes urbains, les PCA demeurent essentiels puisqu'ils visent, de fait, à « *la diminution des besoins d'un territoire en assistance extérieure pour libérer des capacités d'intervention pour d'autres zones impactées* » (MOATTY, 2015, p. 62). Autrement dit, les PCA permettent d'identifier le juste nécessaire en matière de ressources humaines, financières, matérielles pour le maintien d'un service d'importance vitale dans un fonctionnement en mode dégradé. Ce rôle est majeur dans les situations post-crisis où les ressources de tous types sont rares et doivent donc, de fait, être mobilisées avec parcimonie.

Synthèse

Le fonctionnement en mode dégradé est un principe d'exploitation d'un système technico-fonctionnel qui consiste à réduire le service qu'il est capable de fournir par rapport au niveau de service nominal pour lequel il est conçu. Ce principe est mis en œuvre grâce à des actions qui, dans le contexte de la gestion des risques affectant les systèmes technico-fonctionnels, orientent la démarche de résilience vers la continuité d'activité. Dans ce cadre, les opérateurs de systèmes urbains regroupent l'ensemble de ces actions, des procédures et moyens associés au sein d'un Plan de Continuité d'Activité basé de façon générale sur un maintien de service *via* une dégradation acceptable de celui-ci. Le PCA couvre la période de crise (maintien) et aussi la période post-crise (reprise). Les PCA de la RATP et de SNCF offrent deux exemples intéressants de démarche de continuité et de reprise d'activité dans le cas où les réseaux dont ils ont respectivement la charge sont touchés par une inondation. La démarche de SNCF est très proche de celle prônée dans cette recherche. Par ailleurs, ces démarches de planification de la continuité et reprise d'activité présentent quelques limites. Ils sont, notamment, conçus à des échelles locales et de façon sectorielle c'est-à-dire à l'échelle d'un système sans nécessaire prise en compte d'interdépendances existantes et parfois clairement connues avec d'autres systèmes. De plus, le cadre d'actions inclu dans un PCA est souvent rigide car propres à des scénarios d'aléas envisagés. Or, l'expérience montre que les aléas qui surviennent réellement peuvent dépasser en intensité ces scénarios envisagés mettant alors en défaut les procédures et actions contenues dans le PCA.

7.3 L'inscription territoriale et temporelle des stratégies de fonctionnement en mode dégradé

Parmi les limites développées dans le paragraphe précédent concernant les stratégies de continuité d'activité des systèmes technico-fonctionnels en fonctionnement dégradé lors de l'occurrence d'une inondation, la **cohérence globale de la planification** apparaît comme un enjeu majeur d'amélio-

ration. Ces stratégies de réponse face au risque inondation trouvent leur force et leur intérêt dans la transversalité dans la mesure où la gestion des risques doit intégrer les enjeux de multiplicité d'échelles, d'opérateurs, de systèmes, de risques, de périmètres d'intervention, etc. La cohérence et l'articulation ne peuvent donc être une option dans la gestion des risques affectant les systèmes urbains.

La construction d'une articulation concrète dans les stratégies de continuité de service grâce à une exploitation des systèmes en mode dégradé peut se décliner en plusieurs axes : une cohérence spatiale qui prône un maintien d'activités des services fournis par les systèmes, une cohérence temporelle (TOUBIN, 2014, p. 107) entre les stratégies de continuité pendant la crise et après la crise (court terme) et les stratégies de reconstruction et de rétablissement (long terme).

7.3.1 Gestion territorialisée de la continuité d'activité des systèmes technico-fonctionnels en fonctionnement dégradé

La cohérence à l'échelle territoriale du maintien de l'activité au sens large (économique, sociale, etc.) en cas d'inondation soulève deux enjeux primordiaux pour sa mise en pratique.

Le premier enjeu est celui de la nécessité d'une **régulation**. Autrement dit, pas de cohérence territoriale stable de la continuité d'activité sans une régulation territoriale. La notion de régulation fait référence à l'ensemble des règles et des contraintes d'ordre juridique, technique et socio-économique qui sont explicites ou implicites et qui encadrent l'action (REYNAUD, 1989). Par régulation est entendue une approche organisationnelle des systèmes urbains et des services qu'ils produisent. Elle est indispensable pour que toute stratégie de continuité et de reprise d'activité, élaborée face à un risque donné et par un opérateur présent sur un territoire, soit confrontée à la stratégie construite par un autre opérateur sur ce même territoire afin qu'elles s'imbriquent sans se télescoper. C'est en ce sens que la régulation est pertinente car elle « *tend à annuler progressivement les dysfonctionnements des systèmes urbains, non pas en interdisant ou en sanctionnant la survenue d'incidents, mais en s'appuyant sur eux pour les contrôler et éviter l'occurrence de risques globaux* » (GRALEPOIS, 2008, p. 317). Elle est d'autant plus capitale au vu de la croissance en nombre et en complexité des interdépendances entre systèmes critiques. Seule une régulation portée par une entité précisément définie peut permettre d'harmoniser, voire de rendre tout simplement possible, à l'échelle globale de la ville une continuité des services. La régulation conduit donc à rendre efficace les stratégies de maintien et de reprise de l'activité post-crise et, ainsi, à accroître la résilience du territoire considéré.

L'interrogation que pose en corollaire cet enjeu de régulation urbaine est celle du **pilotage** d'une telle régulation : à qui incombe-t-il ? Selon l'Institut National des Hautes Études de la Sécurité et de la Justice (INHESJ), la régulation, dont le rôle est essentiel pour impulser et faire vivre la cohérence territoriale, ne revient pas aux institutions publiques exclusivement : « *la dérégulation récente de certains secteurs d'activités économiques d'utilité publique (télécom, énergie, eau...) conduit au constat que la coordination, le partage, le soutien, la priorisation, la connaissance des moyens et des ressources ne se fera pas dans le cadre classique d'un pilotage institutionnel. Un nouveau cadre mieux adapté à ces enjeux mérite donc d'être défini.* » (INHESJ, 2015, p. 34). Est alors préconisée une régulation à une échelle plus pertinente que « *le cadre actuel "État-centré"* » (INHESJ, 2015, p. 35) : celle des métropoles. En particulier pour celles implantées sur des territoires où le risque inondation est important, elles disposent en effet d'une « *capacité de mobilisation importante qui confère une réelle légitimité à leur participation active dans le processus de gestion de crise aux côtés des acteurs institutionnels tra-*

ditionnels » (INHESJ, 2015, p. 35). Si l'échelle de la métropole est discutable, elle rejoint bien l'idée d'une échelle globale de régulation de l'activité en situation de crise : préparation, maintien, reprise. En supplément, l'INHESJ propose une implication forte des fédérations professionnelles afin que cette régulation, nécessaire au maintien et à la reprise de l'activité, associe secteur public et secteur privé.

Le deuxième enjeu, en continuité avec celui de régulation, est celui de la possibilité d'**actions spontanées**. L'hypothèse est la suivante : au sein des processus planifiés en amont d'une inondation dans le but de structurer à la fois la réponse d'un système en implémentant un fonctionnement en mode dégradé et son retour à un fonctionnement en mode nominal, il est essentiel de laisser la possibilité à des mécanismes d'auto-organisation d'apparaître. Autrement dit, toute planification de réponse d'un système lors d'une crise ne doit pas être **rigide** mais doit, au contraire, rendre notamment possible des actions de **solidarité**, de **volontariat** et d'**entre-aide**. Deux exemples relatifs à des systèmes critiques lors de l'ouragan Sandy et de l'ouragan Katrina étayaient cette hypothèse.

Dans le cas de Katrina, une majeure partie de l'infrastructure des systèmes de télécommunication a été détruite isolant les populations victimes de la catastrophe et réduisant à néant les capacités institutionnelles de coordination (PAVARD *et al.*, 2009). En Louisiane et au Mississippi, Katrina a détruit 2,8 millions de lignes téléphoniques et 1 600 relais de téléphones sans fil (FORDAHL, 2005). Or, les acteurs institutionnels n'étaient pas capables de gérer un tel endommagement du système de télécommunication. Il a été, qui plus est, mis en avant un manque de coordination et de coopération entre ces institutions aux responsabilités et rôles éclatés pour tenter de maintenir le système en place même partiellement (COMFORT et HAASE, 2006). Face à cette situation, des acteurs ont alors spontanément et par le biais de coopérations locales reconstruit, quelques heures après les endommagements, un système de télécommunication grâce aux technologies Wi-Fi et WiMAX et à la distribution d'ordinateurs portables : possibilité d'envoi d'e-mails, d'envoyer des messages instantanés et même d'utiliser les téléphones *via* une connexion Internet¹⁸ (Figure 7.12).

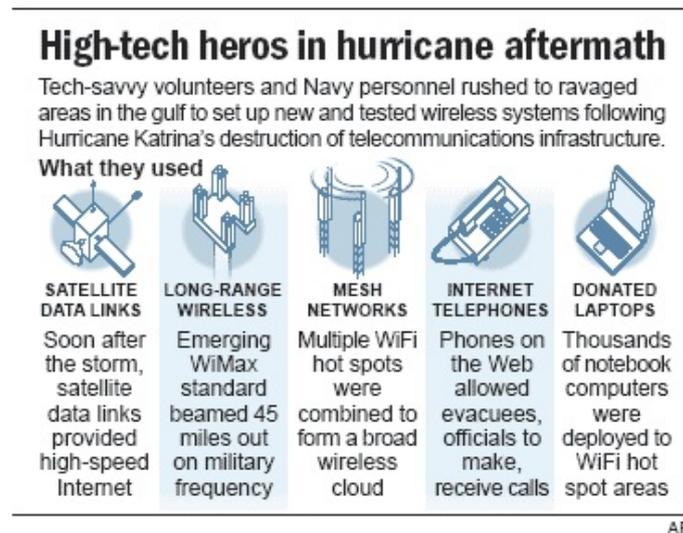


FIGURE 7.12 – Technologies mises en place après le passage de l'ouragan Katrina par des volontaires afin de recréer temporairement un système de communication (FORDAHL, 2005)

18. "Teams from large companies, private groups and the military converged on the Gulf Coast in ad hoc fashion to set up wireless networks, all the while battling bureaucracies that didn't seem to understand the agility and flexibility of the technologies being marshaled. [...] « We need to move toward a system where people are empowered to do what they can do. » "

La planification, ou dans ce cas l'absence de planification, quant à maintenir le service de communication a été supplantée par des actions non formelles issues d'une auto-organisation des populations. Cette situation démontre que les mécanismes d'auto-organisation peuvent présenter une dynamique meilleure que les mécanismes institutionnels (Figure 7.13) (PAVARD *et al.*, 2009).

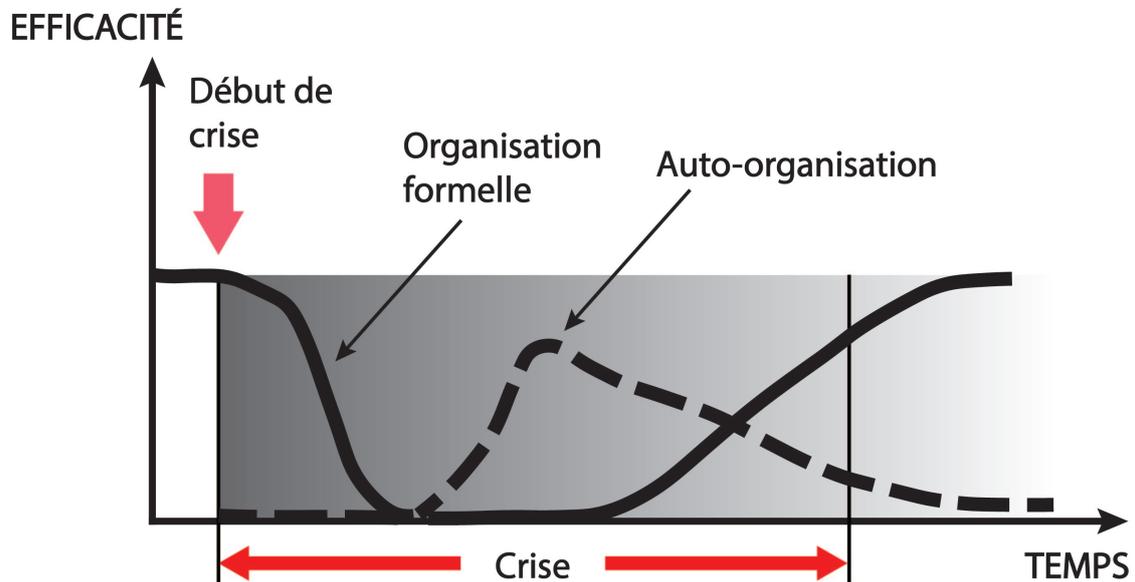


FIGURE 7.13 – Comparaison entre la dynamique des mécanismes d'auto-organisation et des mécanismes institutionnels dans le cas du rétablissement du système de télécommunication suite à l'ouragan Katrina (PAVARD *et al.*, 2009)

Dans le cas de Sandy, l'expérience a démontré que la définition des modes dégradés des systèmes de transport guidé a tout intérêt à s'appuyer sur l'existence des systèmes de transport non guidé. En effet, la *Metropolitan Transportation Authority* (MTA) en charge de la gestion des transports publics dans la ville de New-York et de son agglomération a mis en œuvre un réseau temporaire de navettes, les « *bus-bridges* », de Brooklyn à Manhattan comme substituts des lignes de métros, inondées, pour traverser l'East River. L'adaptabilité des habitants a également permis de maintenir un haut niveau de mobilité dans la région touchée par l'utilisation de vélos, de ferry, de véhicules partagés parmi les habitants ou tout simplement par la marche (Figure 7.14) (KAUFMAN *et al.*, 2012, p. 25). La mobilisation de bus de substitution, de véhicules deux-roues ou encore la mise en place d'un dispositif de covoiturage sont donc autant de mesures qui ont permis de maintenir l'activité de la zone pourtant fortement touchée.

Ainsi, ces dynamiques d'auto-organisation des populations de façon locale et spontanée ne peuvent se suffire à elles-mêmes pour une continuité d'activité ou pour une reprise de l'activité. En revanche, leur émergence représente un complément parfois hautement significatif pour la gestion territorialisée du maintien d'activité des systèmes urbains en fonctionnement dégradé. La souplesse et l'agilité de telles initiatives doivent donc être permises par les documents classiques de planification de la réponse des systèmes urbains. Il est, par ailleurs, intéressant de mentionner que ces phénomènes d'auto-organisation peuvent être à l'origine de nouvelles fonctions du système car « *la situation de crise peut aboutir [...] à un réajustement des valeurs, des intérêts des acteurs et de leur interaction avec l'environnement* » (PAVARD *et al.*, 2009). Ces mécanismes d'autorégulation, par opposition aux mécanismes classiques de régulation par la conservation des fonctions assurées par un système, peuvent donc être une source de nouveaux types de fonctionnement par une dégradation d'ordre qualitatif.

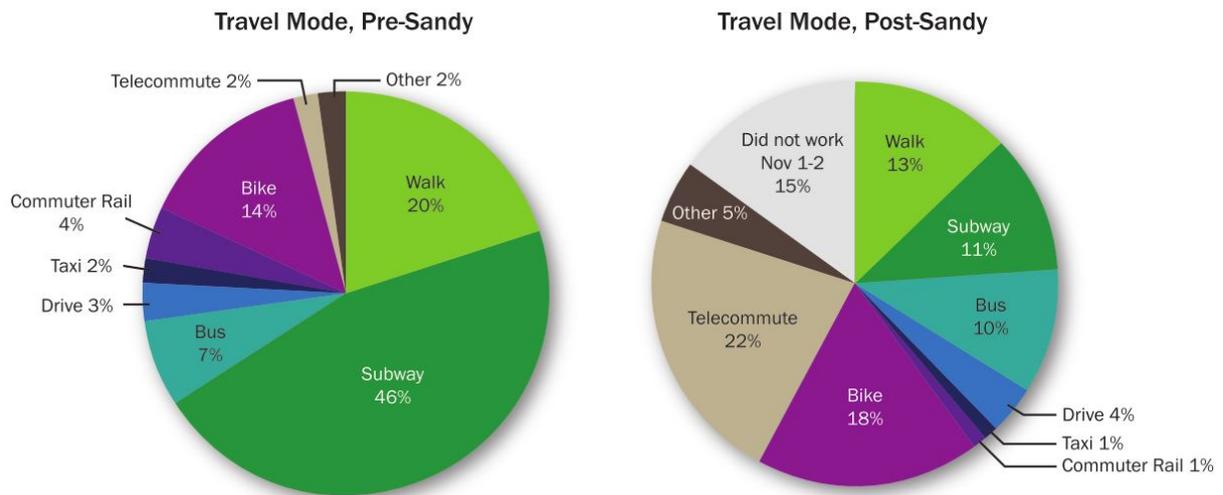


FIGURE 7.14 – Redistribution des modes de transport des personnes avant Sandy et après Sandy (KAUFMAN *et al.*, 2012, p. 25)

7.3.2 Cohérence temporelle dans la gestion de la continuité d'activité des systèmes technico-fonctionnels

La cohérence temporelle joue un rôle central pour la pertinence et l'efficacité des stratégies de continuité de service fournis par les systèmes urbains. Les données élaborées n'ont, en effet, pas toujours la même portée : stratégies de court et moyen terme pour la gestion de la crise et les opérations de reconstruction, stratégies de long terme pour un apprentissage face à des événements courants et une adaptation du système face à des événements tels que le changement climatique. Or, il est nécessaire d'assurer une **cohérence** à toutes ces mesures pour réussir à passer de plans de prévention à une gestion de crise, puis, à un rétablissement (TOUBIN, 2014, p. 107). En d'autres termes, il ne peut y avoir de réelle portée des mesures, au-delà de la gestion de l'urgence pendant la crise ou peu de temps après, sans **articulation** entre celles-ci.

7.3.2.1 Principe et nécessité de cohérence temporelle

Le cas des systèmes de transport guidé est révélateur de cet axe double de planification à court terme et à long terme qui distinguent les opérateurs et gestionnaires de systèmes urbains.

D'une part, les actions à mettre en place en amont de la crise et pour assurer la gestion de crise sont élaborées. C'est le cas du risque d'inondation avec une démarche faite par les gestionnaires souvent très complète : identification des points de vulnérabilité des réseaux, détermination des zones de stockage de matériel et d'équipements pour la protection en amont des composants, identification des ressources humaines nécessaires pour intervenir rapidement et efficacement, exercices d'entraînement, etc. Dans le cas du réseau métropolitain de la RATP, cette démarche est évaluée à environ 6 millions d'euros, soit 1 000 fois moins que le coût de reconstruction qu'entraînerait une inondation des systèmes par une crue de la Seine¹⁹. L'ensemble de ce travail porte donc sur du court terme c'est-à-dire de la gestion de crise et de la remise en route.

D'autre part, des mesures d'adaptation sont envisagées et réalisées pour assurer la pérennité des systèmes **face au changement climatique**. C'est en tout cas face à ce phénomène d'évolution du climat que porte aujourd'hui la plupart, sinon toutes, des stratégies d'amélioration de la résilience à long

19. http://www.ratp.fr/fr/ratp/r_84151/la-ratp-protège-son-réseau-en-cas-de-crue

terme concernant les systèmes de transport guidé. Dans leur cas, la notion d'adaptation bénéficie d'une définition faisant l'objet d'un consensus assez clair en France et à l'international. Il s'agit, en effet, de l'ensemble des évolutions d'organisations, de localisations et de techniques que les sociétés devront opérer pour limiter les impacts négatifs du changement climatique et en maximiser les effets bénéfiques (EEA, 2014). Ces réflexions se font à des échelles nationales avec des projets de recherche de grande ampleur tels que le projet *Tomorrow's Railway and Climate Change Adaptation* (TRaCCA) au Royaume-Uni. L'objectif général de TRaCCA est de déterminer comment améliorer la résilience du réseau ferroviaire britannique face à des aléas naturels plus fréquents et plus intenses suite aux effets du changement climatique. L'enjeu est également d'évaluer les coûts des adaptations des sous-systèmes face aux effets du changement climatique et de prioriser les sous-systèmes à adapter et cela jusqu'à horizon 2040 (RSSB, 2016). Tous les sous-systèmes sont passés en revue, infrastructure, matériel roulant, contrôle-commande et signalisation, etc. afin de déterminer de quelles manières faire évoluer ces éléments pour les rendre moins vulnérables face à l'intensification des aléas naturels.

Plus globalement, l'Agence Européenne pour l'Environnement résume les enjeux d'adaptation des systèmes de transport, tous confondus, en Europe et en dresse un bilan actuel (EEA, 2014, p. 5-6) :

- malgré le rôle essentiel de ces systèmes et les défis que posent le changement climatique, **l'adaptation n'est aujourd'hui pas assez considérée par les acteurs du secteur** comparative-ment à d'autres enjeux tels que la réduction des émissions de gaz à effet de serre qui bénéficient de mesures concrètes et mises en œuvre ;
- l'ampleur du changement climatique, difficile à prévoir, et de ses conséquences socio-économiques incitent à penser les options possibles d'adaptation en envisageant **les plus innovantes, les plus disruptives et les plus ambitieuses** avec une vision globale et long terme ;
- l'adaptation de ces systèmes nécessite indiscutablement des investissements très importants dont seule l'**anticipation** qui commence dès à présent permettra de les garder dans des proportions raisonnables ;
- des mesures d'adaptation **à moindre coût** existent telles que l'augmentation de l'intermodalité mais nécessitent un important travail de coopération et de synergie entre les acteurs du transport ainsi que de construction d'une culture de l'adaptation pour les usagers ;
- si des politiques de planification et des actions concrètes commencent déjà à être entreprises, **l'évaluation de leur efficacité** doit être mise à l'agenda des prochaines années afin de pouvoir déterminer si la voie amorcée en ce qui concerne l'adaptation au changement climatique est correcte.

Pour ce dernier point, les actions déjà engagées en faveur d'une démarche d'adaptation à long terme des systèmes de transport méritent une attention, forte et internationale, de l'ensemble des parties prenantes du secteur du ferroviaire car « *un travail de cette ampleur ne peut être mené isolément* » (JOURDAN *et al.*, 2013).

7.3.2.2 Exemples de stratégies long terme pour la continuité d'activité des systèmes de transport dans un contexte de changement climatique

Les entreprises ferroviaires ont commencé à définir des stratégies sur le long terme pour assurer l'activité face aux évolutions à venir du climat.

Au **Royaume-Uni**, par exemple, il est évalué à 550 milliards de livres c'est-à-dire environ 610 milliards d'euros les dépenses associées à l'évolution des infrastructures d'ici 2050 pour les adapter au

changement climatique. En particulier, un milliard de livres devra être consacré à la protection contre les inondations d'ici à 2035, une augmentation de plus de 80 % des dépenses actuelles dans ce domaine (JOURDAN *et al.*, 2013). Si la volonté d'adaptation est donc indéniable, ce milliard de livres d'ici 2035 reste tout de même une proportion extrêmement faible des 550 milliards estimés d'ici 2050. Ces valeurs démontrent, en particulier, que les coûts liés à l'adaptation des infrastructures face au changement climatique sont colossaux ce qui argumente en faveur d'une prise en compte des potentiels effets du changement climatique dès la conception de ces infrastructures.

En **Espagne**, l'ADIF, gestionnaire des infrastructures ferroviaires, a identifié et évalué les risques posés par l'augmentation de la fréquence des inondations due au changement climatique ; elle a également déterminé le degré d'urgence des actions correctives éventuellement nécessaires. (KADDOURI, 2014) indique que, dans ce contexte, onze études de risques d'inondation dans différentes régions ont été réalisées, et dans chaque cas, un zonage de l'aléa a été effectué afin de connaître les portions de lignes affectées par ce risque. Une analyse détaillée a ensuite été menée sur certains composants majeurs tels que les ouvrages d'art afin d'examiner l'impact d'une inondation sur ces structures et de mettre en œuvre les différentes stratégies et mesures pour prévenir ou atténuer les impacts.

En **France**, SNCF a suivi les étapes suivantes pour définir les orientations stratégiques d'adaptation de son activité : identification des impacts du changement climatique, de leurs échéances et de la vulnérabilité de certaines zones du réseau, identification des mesures d'adaptation prioritaires en fonction des impacts identifiés, évaluation des mesures prioritaires et sélection de ces mesures (KADDOURI, 2014). Il est intéressant de mentionner que les stratégies opérationnelles envisagées par SNCF sont des mesures qualifiées de « *sans regret* » c'est-à-dire « *des mesures dont le bilan coût/bénéfice demeure favorable quel que soit le rythme d'évolution du climat* » (JOURDAN *et al.*, 2013). L'approche est pertinente dans la mesure où elle oriente fondamentalement la réflexion en termes de délais plutôt qu'en termes de coûts (HALLEGATTE, 2011). La temporalité est essentielle pour l'adaptation car il s'agit de mettre en œuvre des mesures à temps, c'est-à-dire suffisamment en avance pour tester leur pertinence et non tardivement pour ne pas qu'elles soient inopérantes.

7.3.2.3 Synthèse

Finalement, toutes ces stratégies, qu'elles soient sur du court terme ou sur du long terme, répondent à l'enjeu d'amélioration de la résilience des systèmes de transport face aux risques naturels. Plus précisément, elles permettent d'exprimer la résilience par différents processus, sur différentes phases et différents états d'un système (LHOMME, 2012, p. 79) : d'une part, la résilience de temps court qui correspond à la résilience d'un système suite à une perturbation telle qu'une inondation et une résilience de temps long qui intègre l'apprentissage et l'adaptation du système suite aux perturbations que celui-ci a pu subir au cours de son histoire (Figure 7.15).

Cette temporalité est inhérente au concept de résilience et les mesures visant à améliorer la résilience des systèmes de transport guidé doivent l'intégrer. L'incident survenu à Sarry le démontre, par exemple.

Suite à l'incident survenu en 2000 au niveau de la commune de Sarry en France sur une ligne à grande vitesse après un fort orage qui a emporté le ballast par débordement des eaux du drainage longitudinal, SNCF a dû interrompre la ligne pour gérer l'incident et reconstruire la section endommagée (PAMS CAPOCCIONI *et al.*, 2012). Cette opération, qui a eu pour conséquence l'arrêt du système pendant plusieurs heures, peut être considérée comme un processus de résilience de temps court où

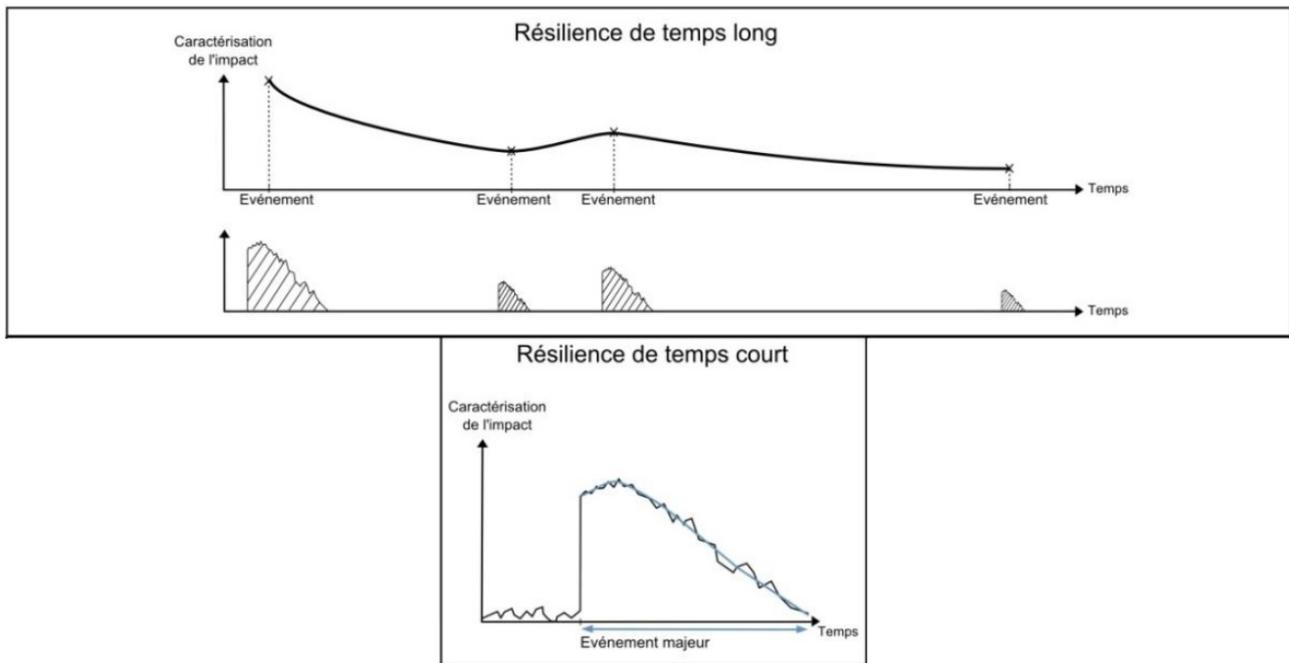


FIGURE 7.15 – Le concept de résilience décliné selon une échelle temporelle (adaptée de (LHOMME, 2012))

l'objectif est la remise en état.

Après cet incident, SNCF a d'une part mis en place un important programme de régénération des ouvrages hydrauliques afin de supprimer le risque d'un incident similaire sur les sites les plus exposés du réseau national (PAMS CAPOCCIONI *et al.*, 2015). D'autre part, le référentiel technique pour la réalisation de lignes à grande vitesse a été modifié en adaptant les règles de dimensionnement relatives aux ouvrages hydrauliques afin de supprimer, là aussi, le risque d'un tel incident (PAMS CAPOCCIONI *et al.*, 2015).

Ce double travail d'adaptation des systèmes existants et d'apprentissage de l'incident passé par modification des référentiels de conception s'inscrit donc dans un processus de résilience de temps long.

Synthèse

La cohérence globale de la planification de continuité et de reprise d'activité sur un territoire est un enjeu majeur de résilience. En effet, il est indispensable que chaque PCA propre à un opérateur de service d'importance vitale tel que le transport soit articulé avec les autres PCA existants. Sans cette articulation de l'approche, la continuité et la reprise d'activité globale sur un territoire lors d'une inondation peuvent être compromises. Parmi les éléments essentiels à une transversalité de la continuité et de la reprise d'activité, il y a la dimension spatiale qui permet une approche territoriale. Il y a également la dimension temporelle qui se base sur des actions à deux niveaux : à court terme c'est-à-dire pendant la crise, et à long terme c'est-à-dire après la crise et représentant alors un travail d'adaptation et d'apprentissage des systèmes pour mieux faire face au risque inondation à l'avenir. Cette réflexion vis-à-vis du long terme est primordiale pour des phénomènes tels que le changement climatique qui sont susceptibles de perturber les systèmes technico-fonctionnels sur une longue durée.

7.4 Conclusion du chapitre 7

La notion de fonctionnement en mode dégradé est devenue centrale dans le niveau de résilience des systèmes technico-fonctionnels urbains. Sans une capacité à maintenir un fonctionnement partiel, il n'y a pas de réelle résilience du système et *a fortiori* du territoire sur lequel il est implanté. Néanmoins, faire de la notion de fonctionnement en mode dégradé la traduction opérationnelle du concept de résilience comme cela semble de plus en plus être le cas du côté des organismes publics, des gestionnaires de systèmes urbains, et des opérateurs de services d'importance vitale ne va pas de soi. Le périmètre de cette notion étant large, il implique la construction d'une définition théorique d'une part, et un cadrage pratique pour rendre opérationnel ce principe d'exploitation.

Quatre dimensions-clés sont proposées pour caractériser toute stratégie de fonctionnement dégradé :

- un aspect **quantitatif** : cette propriété caractérise le fonctionnement en mode dégradé comme une diminution du niveau de service que peut fournir le système par rapport à la situation nominale où le système est considéré assurer son activité à 100 % ;
- un aspect **qualitatif** : cette propriété est associée à des pratiques envisagées voire actuellement réalisées lors des processus de gestion de crise. Ces pratiques consistent à utiliser le système hors de son cadre nominal, pour des usages autres (évacuation des populations, accès aux secours, etc.) ;
- une **temporalité** : cette dimension est fondamentale car toute stratégie visant à exploiter un système de façon dégradée est confrontée aux aspects temporels de façon globale que ce soit pour le déclenchement d'un mode dégradé, la reprise du mode nominal, l'inertie ou l'autonomie du système lors de la crise ;
- une **spatialité** : cette propriété spécifie l'ampleur spatiale d'un mode dégradé d'un système urbain, ces systèmes ayant classiquement une configuration réticulaire sur tout un territoire.

Ces quatre dimensions ne fournissent pas à proprement parler une acception théorique et commune de la notion mais orientent en fait vers la mise en action de celle-ci. C'est un parti pris qui consiste à

construire un cadre à cette pratique courante, devenant même une obligation d'ordre réglementaire, de maintien de l'activité. C'est, en effet, ce à quoi répond essentiellement ce principe de fonctionnement en mode dégradé : offrir un panel de stratégies organisationnelles pour le maintien de l'activité des systèmes critiques pendant la crise et pour la reprise de l'activité de ces mêmes systèmes après la crise. Ces processus nécessitent une importante planification en amont de la crise. Ce travail de planification revêt trois caractéristiques importantes :

- une **cohérence d'ordre spatial** : en lien avec l'interdépendance existante entre systèmes critiques pouvant générer des perturbations par effet domino à partir d'un impact initial, toute volonté de maintien et de reprise de l'activité doit s'inscrire dans un contexte territorial et d'intégration de tous les opérateurs de systèmes concernés. A l'image des Plans Intercommunaux de Sauvegarde²⁰, des **Plans Intercommunaux ou Interopérateurs de Continuité d'Activité** pourraient être pertinents afin d'intégrer le risque d'effet domino entre systèmes dépendants et d'articuler la continuité de service à l'échelle d'un territoire susceptible d'être touché par un risque connu ;
- une **cohérence d'ordre temporel** : les événements susceptibles d'avoir un impact sur le fonctionnement des systèmes technico-fonctionnels peuvent survenir ponctuellement, comme une inondation, et peuvent également être progressifs comme les effets du changement climatique. Face à cette situation, la planification doit essentiellement s'articuler sur la base de deux axes : à la fois sur le court terme pour la gestion de crise et le rétablissement des services, et sur le long terme pour l'adaptation des systèmes face à des risques promis à l'intensification. Cet axe double concourt donc respectivement à l'amélioration de la résilience à court terme et à long terme des systèmes considérés ;
- une **flexibilité théorique et pratique** : la prévisibilité totale des aléas étant impossible, toute planification ne peut fournir une gestion de crise parfaitement adaptée. Pour cette raison, les processus de gestion de crise tels que le maintien de l'activité ou la reprise de l'activité des systèmes critiques doivent être modifiables en temps réel par les acteurs concernés et doivent également rendre possible des actions spontanées de solidarité, de volontariat et d'entre-aide ayant démontré par le passé leur efficacité.

Ce dernier élément de souplesse est nécessaire pour l'amélioration de la résilience puisqu'il est lui-même considéré comme un critère de résilience d'un système. Il permet par ailleurs d'éviter le **risque « scélérat »** c'est-à-dire un phénomène menaçant dont l'annonce peut passer inaperçue parce qu'il prend une apparence normale (DEDIEU, 2009). Il est, en effet, à la fois hors-cadre mais possède pourtant des caractéristiques familières. Et, de par son ampleur exceptionnelle plutôt que sa nature inconnue, il dépasse les capacités ordinaires de prévention et de planification : il n'existe alors plus réellement de mesures préventives adaptées à ce type de risque (DEDIEU, 2009). Ainsi, la souplesse des cadres de planification de la continuité et de la reprise d'activité prend alors du sens face à ce type de risque à l'ampleur particulière.

20. L'article 13 de la loi N°2004-811 du 13 août 2004 définit le Plan Communal de Sauvegarde (PCS), sous l'autorité du maire, comme l'organisation prévue par la commune pour assurer l'alerte, l'information, la protection et le soutien de la population au regard des risques connus. Le PCS établit un recensement et une analyse des risques à l'échelle de la commune. La loi autorise et encourage l'élaboration de Plan InterCommunal de Sauvegarde (PICS) qui est un regroupement des PCS de toutes les communes complété par le plan interne de la structure intercommunale elle-même. Le PICS permet notamment d'harmoniser l'organisation du territoire face à l'occurrence de risques connus et de mutualiser des ressources.

Chapitre 8

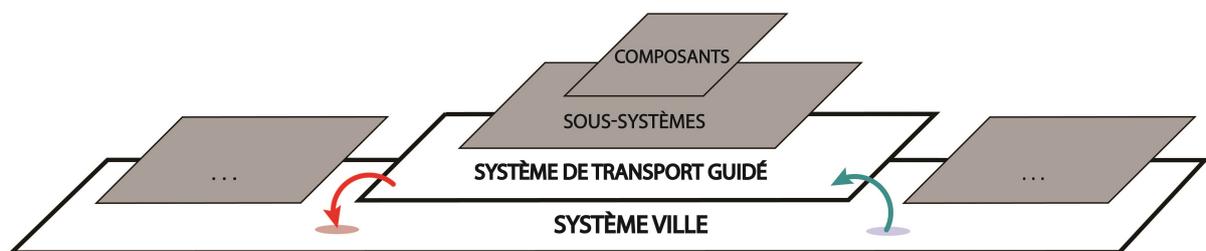
Perspectives de recherche

« ... the City of Vancouver is exploring a range of options to anticipate future sea level rise.

“We haven’t nailed down whether it’s going to be a dike or adaptation or a combination of those two things, but the fact that sea level will rise, we know it’s absolutely going to happen,” said Doug Smith, director of sustainability for the City of Vancouver.

“It’s just a question of whether it will be 50 years or 70 years or 150 years.” »

Doug Smith, *Director of sustainability de la ville de Vancouver*, “*Vancouver prepares for the flood*”, *Metronews*, 3 Nov. 2016



La recherche entreprise quant à la résilience des systèmes de transport guidé soumis au risque inondation a conduit à la réalisation de plusieurs modèles. Un modèle d'interdépendances qui identifie les mécanismes de défaillances par effet domino des composants qui se produisent au sein d'un système lors d'une inondation ; un modèle d'estimation du coût et du délai de remise en état matériel d'un tel système endommagé par une inondation ; puis, un modèle probabiliste qui traduit les dommages matériels en conséquences fonctionnelles sur l'exploitation du système. L'ensemble de ces modèles compose une démarche méthodologique globale de caractérisation du risque inondation qui se décline, premièrement, en un volet d'analyse de la vulnérabilité systémique, et deuxièmement, en un volet de mise en œuvre opérationnelle de la résilience.

Ce chapitre aborde la démarche méthodologique construite en portant un regard critique sur celle-ci. Dans ce sens, les axes d'amélioration identifiés sont les suivants :

- intégration d'une dimension spatiale au sein de la démarche méthodologique ;
- intégration d'une dimension temporelle au sein de la démarche méthodologique ;
- réflexion sur la portée multirisque de la démarche méthodologique appliquée au risque inondation ;
- réflexion sur la transposition multi-système urbain de la démarche méthodologique appliquée aux systèmes de transport guidé.

Le chapitre porte également une attention particulière à la validité des résultats issus de la démarche méthodologique. Dans un contexte d'amélioration de la résilience globale c'est-à-dire à l'échelle de la ville, l'objectif est d'interroger la portée des résultats propres à un sous-système particulier du système urbain. Il est, en effet, vraisemblable que la résilience d'une ville ne se conçoit pas comme la somme des résiliences individuelles de ses systèmes urbains. Autrement dit, la résilience globale de la ville ne peut se définir, se planifier, se mettre en œuvre et s'améliorer à partir de la seule connaissance, même approfondie, issue de résiliences analysées une à une de façon sectorielle. Il est donc important de mener une réflexion sur le passage de connaissances propres à la résilience d'un élément de la ville vers de une connaissance sur la résilience urbaine. Cette réflexion souhaitée pourtant comme globale est restreinte aux cas étudiés dans cette recherche, à savoir les systèmes technico-fonctionnels constitutifs de la ville vis-à-vis des risques naturels.

8.1 Vers une caractéristique spatiale au sein de la démarche méthodologique

8.1.1 Approche conceptuelle du modèle d'interdépendances pour une analyse spatialisée du risque

8.1.1.1 Nécessités

Le modèle d'interdépendances développé dans les [chapitre 3](#) et [chapitre 4](#) fournit la nécessaire analyse de vulnérabilité des systèmes de transport guidé face au risque inondation, préalablement à l'étude de la résilience de ces derniers face à ce risque. Or, si cette analyse de vulnérabilité est réalisée au travers de l'étude des scénarios de défaillances successives de composants qui peuvent être potentiellement générés par un mécanisme d'effet domino à partir d'une inondation, il est important de remarquer que les résultats de cette analyse sont « **a-spatiaux** » c'est-à-dire qu'ils ne sont pas du tout spatialisés. Sans altérer la validité ni la pertinence des résultats produits par ce modèle d'interdépendances, l'intégration d'une dimension spatiale apparaît utile et contextuelle pour diverses raisons :

- la réflexion prônant une articulation entre le risque et le territoire bénéficie d'une littérature scientifique importante (SCARWELL et LAGANIER, 2004; MULLER-MAHN, 2012; VEYRET *et al.*, 2004; BEUCHER, 2008) ;
- l'essor de la géomatique dans les années 1990 en tant que champ technique et scientifique dérivant de la géographie et de l'informatique, dont un des objectifs est le développement de méthodes pour représenter, analyser et simuler l'espace géographique (BUCHER et LE BER, 2012), a permis d'importants progrès dans l'inscription spatiale du risque ;
- l'analyse spatialisée des interdépendances entre systèmes critiques fait l'objet d'outils automatisés sous forme SIG tels que le prototype DOMINO développé par le Centre Risque & Performance de l'École Polytechnique de Montréal¹ ;
- l'approche analytique de la Sûreté de Fonctionnement combinée à l'information géographique semble une piste intéressante pour le croisement entre un zonage spatial de l'aléa avec une position spatiale du système de transport guidé, permettant ainsi de déterminer de quelle façon le système est impacté : quels composants sont directement touchés par l'aléa ? Quelle est l'incidence sur d'autres composants qui sont alors touchés indirectement, c'est-à-dire par effet domino ?

Ce dernier point est une piste intéressante qu'il nous paraît pertinent de suivre et qui a fait l'objet d'une recherche spécifique (GONZVA *et al.*, 2016d). Pour répondre à cet enjeu d'inscription spatiale de la démarche méthodologique d'analyse des systèmes urbains affectés par le risque inondation, le principe proposé est en effet le suivant : partir du modèle d'interdépendances conçu dans les [chapitre 3](#) et [chapitre 4](#) sur la base d'analyse fonctionnelle, d'analyse dysfonctionnelle et d'analyse des modes de défaillance et de leurs effets, en y intégrant de l'information géographique.

Pour être réalisable, ce principe se décline en deux étapes :

- d'une part, il nécessite de circonscrire l'étude du risque autour des interactions qui existent entre aléa naturel, système urbain et information géographique ;

1. <http://www.polymtl.ca/crp/recherche/outil.php>

- d'autre part, il requiert un changement d'approche pour passer d'une approche aléa-centrée et spatialisée à une approche système-centrée et territorialisée.

8.1.1.2 Gestion des risques et apports de l'information géographique

8.1.1.2.1. Proposition d'un périmètre pour l'étude du risque

Associer au modèle d'interdépendances une dimension spatiale revient, en fait, à délimiter l'étude du risque aux interactions qui se produisent entre le système urbain, ici le **système de transport guidé**, l'aléa naturel, en l'occurrence l'**inondation**, et l'**information géographique**. Le risque est alors étudié autour de ce triptyque dans le but de caractériser un modèle de gestion territorialisée des risques naturels affectant les systèmes en milieu urbain (Figure 8.1). De fait, ce triptyque ne peut offrir une vision complète des axes d'amélioration de la gestion des risques urbains dans la mesure où il ne considère pas toutes les composantes de la ville, mais uniquement ses systèmes urbains. Or, l'amélioration de la résilience urbaine, pour laquelle l'amélioration de la gestion des risques est un enjeu sous-jacent, reste un problème très vaste qui intersecte de nombreux domaines de compétences (TOUBIN, 2014, p. 68). Cependant, l'identification fréquente de certains systèmes urbains comme des systèmes critiques pour le fonctionnement des villes démontre le rôle prépondérant que peuvent jouer ces systèmes dans l'amélioration de la résilience urbaine (LHOMME, 2012). Ainsi, ce triptyque est volontairement abordé autour de dimensions matérielles, structurelles et fonctionnelles. Les autres dimensions urbaines telles que la dimension sociale, culturelle, architecturale, environnementale, économique, de gouvernance, etc. en lien avec le fonctionnement des systèmes, ne sont donc pas incluses dans cette recherche bien qu'elles prennent part dans la construction de la résilience urbaine.

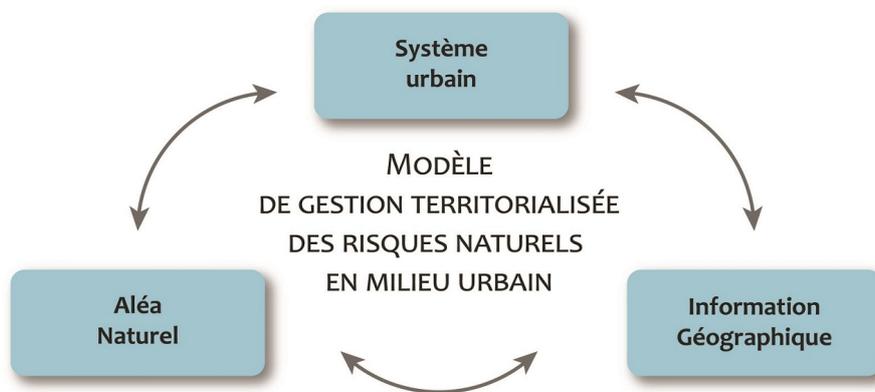


FIGURE 8.1 – Proposition d'une modèle de gestion territorialisée des risques naturels en milieu urbain centré autour du triptyque aléa naturel–système urbain–information géographique (GONZVA *et al.*, 2016d)

8.1.1.2.2. D'une approche aléa-centrée et spatialisée vers une approche système-centrée et territorialisée

Les risques entretiennent une relation manifeste avec les espaces qu'ils affectent. L'émergence de cette relation et le besoin d'en identifier les caractéristiques ne sont pas récents ; dès les années 1980, parmi les changements nouveaux soulevés par Ulrich Beck qui s'opéraient au sein des risques, l'idée de circonscription spatiale apparaît déjà. En effet, les risques provoquent dorénavant des dommages irréversibles, irréparables qui n'ont alors plus de limites, ni spatiales, ni temporelles (BECK, 2001). Le lien entre risque et territoire est donc apparu incidemment avec l'évolution des risques eux-mêmes.

Dès lors, l'étude de cette relation complexe entre les risques et les espaces qu'ils touchent s'est faite selon plusieurs axes. Tout d'abord un premier axe d'étude visant à définir la **spatialité des risques**

selon laquelle quelques risques semblent « *coller* » (NOVEMBER, 2006) à certains lieux malgré des mesures de gestion de ceux-ci. Un autre axe d'étude de la relation risque-territoire considère la ou les **dynamique(s) spatiale(s) des risques**. Ces dynamiques sont distinguées selon plusieurs catégories : risques-sites, risques-transports dans le domaine des risques technologiques (GLATRON, 1997), risques-territorialisés, risques-diffus ou risques-réseaux selon leur degré d'ancrage à l'espace (GALLAND, 2003). La localisation de la racine spatiale du risque (D'ERCOLE et METZGER, 2009) est donc un élément nécessaire dans la compréhension des effets du risque, à savoir les vulnérabilités qu'il induit. Ainsi, la compréhension de la dimension spatiale des risques ne peut prendre comme unique base celle d'un « territoire support » car la vision obtenue serait trop parcellaire et occulterait les dynamiques territoriales engendrées par les situations à risque (NOVEMBER *et al.*, 2008).

La proximité entre risque et espace a immanquablement conduit à penser la gestion des risques comme un **processus territorialisé** centré autour de systèmes à enjeux élevés. De ce fait, le raisonnement sur le risque s'est fait par « couches », c'est-à-dire qu'à une couche contenant des informations relatives aux enjeux présents sur un espace est croisée une autre couche d'informations relatives à un aléa. Le croisement des informations de ces deux couches aboutit alors à une évaluation du risque subi par ces enjeux, c'est-à-dire que leur vulnérabilité face à l'aléa étudié est mesurée par rapport aux dommages directs qu'ils subissent. Cette approche par l'aléa amène alors à une gestion des risques dont la pensée de fond consiste à réduire les conséquences des dommages potentiels par une protection au sens strict des enjeux. Cette approche a longtemps prédominé dans la gestion des risques. Dès lors, la complexité du risque s'est retrouvée réduite à la seule dimension physique des impacts directs, ce risque étant par conséquent circonscrit au zonage de l'aléa. Cette approche **aléa-centrée** n'est pas critiquée en tant que telle car elle répond très bien aux problématiques de certains acteurs de la ville tels que des aménageurs ayant besoin de prescriptions spécifiques relatives aux constructions et activités possibles selon l'existence d'un aléa (QUENAULT, 2013a).

Cependant, là où l'approche aléa-centrée semble présenter des limites, c'est lorsque les enjeux majeurs en question présentent des caractéristiques fortes de complication, d'hyper complication voire de complexité² et de fonctionnement systémique. C'est le cas des systèmes de transport guidé de personnes. Il est alors opportun de se tourner vers une approche système-centrée et territorialisée dans laquelle la réflexion est toujours dépendante de l'aléa, qui reste un paramètre d'entrée pour l'analyse de risque, mais s'oriente vers des « aléas localisés » et s'intéresse alors à des territoires plutôt que des processus physiques (WEICHSELGARTNER, 2004).

Les dommages provoqués par l'occurrence d'un aléa sur ces infrastructures critiques sont, de fait, difficiles à appréhender dans la mesure où, en plus des dommages directs aux éléments impactés, des dommages indirects dus à des effets domino sont générés à cause des interdépendances. L'approche aléa-centrée ne suffit donc plus et doit par conséquent s'orienter vers une **approche système-centrée** dans laquelle les conséquences de l'occurrence d'un aléa sur le système sont précisément étudiées : impacts directs sur les éléments du système situés dans la zone d'aléa, effets domino parmi les autres éléments au sein du système, effets domino parmi les autres systèmes connectés au système touché initialement. Dans ce contexte, **le concept de résilience permet d'inclure cet aspect de territorialisation des risques en ce sens qu'elle place le système au centre de l'approche**. Par l'utilisation de la

2. Pour rappel, un objet compliqué peut être simplifié alors que la complexité est un état fondamental qui définit l'objet considéré. Les systèmes de transport sont donc des systèmes compliqués voire *hyper compliqués* plutôt que des systèmes complexes au sens de la systémique car ils ne présentent pas, par exemple, de phénomènes qui émergent de façon imprévisible dans leur fonctionnement. Néanmoins, le haut degré de complication ou l'**hyper complication** du fonctionnement et du dysfonctionnement d'un système de transport guidé soumis à un risque inondation nécessite de s'orienter vers les approches proposées par la systémique.

résilience, donner ce rôle central aux systèmes urbains permet de les (re)placer comme actant³ d'un territoire en leur attribuant une grande importance dans la gestion des risques (BARROCA et SERRE, 2013). Par conséquent, la résilience est de fait territorialisée car elle accorde une place essentielle à la singularité des lieux et participe de la reconnaissance de leurs capacités à faire face et à répondre en cas de survenue d'une catastrophe (QUENAULT, 2015a). C'est la raison pour laquelle chaque tentative qui vise à appréhender l'état actuel et les progrès concernant la résilience d'un objet quel qu'il soit est inévitablement limitée si elle ne présente pas une base géographique solide⁴ (WEICHSELGARTNER et KELMAN, 2014), d'autant que la question des emboîtements d'échelles spatiales est essentielle dans les études portant sur la résilience urbaine (QUENAULT, 2014). Ainsi, l'approche jusqu'alors **aléa-centrée** dans l'analyse et la gestion des risques laisse place à une logique **système-centrée** mettant l'accent sur une **vision élargie aux aspects systémiques et aux conséquences globales des risques**.

8.1.1.2.3. Outils récents de gestion territorialisée des risques

L'outil traditionnel par excellence de la territorialisation des risques, de tous types, est l'**outil cartographique**. Quel que soit le type de cartes utilisées pour la représentation des risques, leur but final reste similaire : déterminer l'aménagement urbain qu'il est possible de réaliser sur un territoire au vu de sa propension à être touché par des aléas connus. Cependant, en termes d'usages, un reproche qu'il est possible de faire sur l'outil cartographique appliqué aux risques est qu'il reste l'affaire des experts ou tout du moins d'acteurs spécifiques, dans sa traduction et son utilisation. C'est en ce sens que les outils plus récents de gestion territorialisée des risques apportent des réponses à ces nouveaux enjeux de représentation, de visualisation et de communication.

Les progrès technologiques réalisés au cours des deux dernières décennies dans le domaine des Technologies de l'Information Géographique (TIG) et de la Communication (TIC) ont fourni un contexte favorable au développement de la cartographie comme un outil de travail, de communication et d'aide à la décision. Elle facilite, en effet, l'observation et l'analyse des phénomènes sur un espace et dans le temps (ARNAUD, 2015). Ces développements techniques et disciplinaires se regroupent aujourd'hui sous le terme de **géomatique**. En effet, la géomatique se définit comme une approche systémique, multidisciplinaire et intégrée dont le but est de concevoir des méthodes et modèles innovants notamment pour mieux rendre compte de la composante spatiale des phénomènes étudiés, et aussi, de sélectionner des outils et techniques autour de données géoréférencées spatialement⁵ (GOMARASCA, 2009).

Néanmoins, bien que les domaines applicatifs de la géomatique soient variés, elle reste une activité scientifique et de recherche dont le produit est pour certains auteurs le Système d'Information Géographique (SIG) (JOLIVEAU, 2004). En effet, grâce à une certaine démocratisation des TIG qui a conduit de nombreux acteurs des territoires à s'approprier des outils issus de la géomatique (NOUCHER *et al.*, 2008), le SIG est sans doute l'outil phare qui a su le mieux bénéficier de cette mouvance. Aujourd'hui, le SIG s'adresse aux acteurs du territoire, des concepteurs aux exploitants en passant par les usagers ou les habitants, qu'ils soient spécialistes ou non. Dans le contexte particulier des risques, l'aide à la décision est primordiale pour leur gestion et leur maîtrise. C'est la raison pour laquelle un

3. La notion d'actant a été exposée dans différents travaux de sociologie et est reprise ici afin de signifier la volonté d'intégrer les acteurs (humains) et les systèmes techniques dans une même analyse.

4. "Attempts to capture the state of and progress towards resilience can therefore be limited without a solid geography foundation, showing how geographers can and should be involved in this work."

5. "Geomatics is defined as a systemic, multidisciplinary, integrated approach to selecting the instruments and the appropriate techniques for collecting, storing, integrating, modeling, analyzing, retrieving at will, transforming, displaying, and distributing spatially georeferenced data from different sources with well-defined accuracy characteristics and continuity in a digital format."

certain nombre d'applications existent de SIG qui traitent les risques naturels affectant des systèmes urbains.

Le Système d'Information sur les Risques naturels de la haute Vallée de l'Arve (SIRVA) est un exemple de prototype de SIRS⁶ ayant pour objectif : **(i)** de fournir une assistance aux gestionnaires des risques en montagne en rassemblant et recensant les différentes informations, et **(ii)** de mettre à disposition un outil fournissant de l'information préventive. Les risques étudiés sont les avalanches et les mouvements de terrain. SIRVA permet aux gestionnaires de récupérer et sécuriser des données existantes, d'en intégrer de nouvelles au fur et à mesure de leur production et de faciliter leur consultation (MANCHE, 2000; MANCHE *et al.*, 2002).

Un autre exemple d'utilisation de système d'information pour la gestion des risques est celui d'un Web SIRS pour l'évaluation de la résilience urbaine des réseaux techniques en vue d'un partage d'informations entre les gestionnaires de réseaux (SERRE, 2015b). Le risque naturel étudié dans ce Web SIRS est le risque inondation. L'outil a pour vocation d'intégrer des indicateurs d'aide à la décision basés sur trois capacités considérées comme primordiales pour étudier la résilience des réseaux techniques urbains. Ces indicateurs peuvent être calculés grâce au Web SIRS. La résilience y est alors évaluée sur un plan technico-fonctionnel, et parallèlement, d'autres outils en cours de développement visent à l'évaluer d'un point de vue organisationnel (TOUBIN *et al.*, 2013).

De plus, (FEKETE *et al.*, 2015) synthétisent quelques contributions majeures récentes dans l'utilisation de SIG pour la gouvernance des risques. Les auteurs démontrent que ces utilisations de SIG sont faites par une importante diversité d'acteurs tels que les collectivités publiques, les gestionnaires industriels de risques ou encore les organismes de secours et sauvetage. Ils montrent également l'émergence d'un grand nombre d'usages qu'il est possible de faire des SIG en rapport avec la gestion des risques, notamment lorsque les SIG sont couplés à des modèles de simulation : évaluation du temps d'évacuation de zones urbaines en cas de risque naturel ou de risque terroriste, évaluation d'indicateurs socio-économiques dans un contexte de changement climatique, d'indicateurs démographiques... Ces usages apparaissent donc tout à fait appropriés aux infrastructures critiques soumises à différents types de risques.

Ainsi, les SIG sont alors vus comme un « couteau suisse » polyvalent pour analyser, collecter et agréger des informations relatives à la gestion des risques⁷. Ces exemples révèlent le rôle clef que peuvent jouer les SIG dans la gestion des risques afin de relier des données issues de différentes sources de collaboration et de les analyser de manière intégrative et globale⁸ (FEKETE *et al.*, 2015).

8.1.2 Construction d'un modèle de données relationnel géographique relatif à un système de transport guidé

8.1.2.1 Passage d'un type de modèle à un autre

Les modélisations de systèmes, quels qu'ils soient, peuvent se faire de plusieurs manières. La modélisation fonctionnelle réalisée dans le chapitre 3 en est un exemple. Or, par ailleurs à la modélisation

6. Système d'Information à Référence Spatiale

7. "GIS is [...] a Swiss Army Knife version regarding its versatility in combining and analyzing information, gathering and aggregating it."

8. "In this context of risk management and governance, GIS [...] can play a pivotal role not just in delivering data but also in connecting and analyzing data in a more integrative, holistic way."

fonctionnelle s'ajoutent d'autres types de modélisations que sont les **modèles relationnels de données**, en particulier ceux appliqués au domaine de la géographie.

De façon conceptuelle, un modèle relationnel de données est une des manières de modéliser et d'ordonner les relations qui existent entre un ensemble de données ou ensemble d'informations. Appliqués au domaine de la géographie, ces principes conceptuels ont donné lieu aux bases de données géographiques, outils opérationnels qui permettent d'organiser et de gérer l'information géographique sous forme numérique. Ce sont sur ces bases de données relationnelles géographiques, ou géodatabases, que reposent les SIG. Les SIG interrogent, en effet, les géodatabases sur les données qu'elles contiennent afin d'en extraire des informations.

Pour permettre l'**inscription spatiale** de la démarche méthodologique d'analyse des systèmes urbains affectés par le risque inondation, il apparaît pertinent de croiser des méthodes issues de deux domaines techniques et scientifiques différents : la Sécurité de Fonctionnement et la géomatique.

Les méthodes utilisées sont respectivement l'analyse fonctionnelle et l'analyse des modes de défaillance et de leurs effets, d'une part, ayant permis de construire le modèle d'interdépendances, qui sont croisées avec les bases de données géographiques et systèmes d'information géographique, d'autre part.

Cette proposition de transposition d'ordre méthodologique, ou tout du moins la possibilité d'utiliser une représentation pour construire l'autre, semble en effet possible. En effet, elle peut se faire du modèle fonctionnel, représenté par le BdF, vers le modèle de données relationnel, et réciproquement, à partir d'un parallèle entre les éléments constitutifs de chacun des modèles. Ce passage paraît intuitivement possible dans la mesure où les systèmes de transport guidé, et plus généralement les systèmes urbains, sont des objets géographiques avec une position spatiale définie au sein d'une ville.

Plus précisément, ce passage entre ces deux modèles est tout d'abord permis grâce à la **structuration commune** des éléments des modèles. En effet, dans un modèle fonctionnel, il existe une hiérarchie entre les éléments selon le niveau de précision souhaitée pour le modèle ; le modèle représente alors un système, constitué de sous-systèmes, eux-mêmes dissociables en composants, puis en sous-composants, voire en éléments plus fins selon les besoins. De façon similaire, un modèle de données respecte une classification entre ses éléments ; le modèle représente alors un système, constitué de tables, elles-mêmes composées de champs pour lesquels des attributs sont définis.

De plus, ce passage entre ces deux modélisations est permis par le principe similaire qui les régit : **établir des liens entre les éléments**. Dans un modèle fonctionnel existent, en effet, entre les éléments des interactions qui sont représentatives des fonctions assurées par le système ; dans un modèle de données, des relations sont établies entre les tables afin de mettre en évidence les liens qui existent entre celles-ci. Dans le cas du modèle de données, on peut faire appel au modèle ou diagramme entité-association pour décrire graphiquement un tel modèle conceptuel ; les entités sont les objets qui constituent le modèle et les associations représentent les liens entre objets. C'est, en règle générale, à partir des modèles objet et entité-association que se conçoivent les bases de données.

Ainsi, il est possible d'associer deux à deux les éléments qui constituent chacun des modèles comme le montre le [Tableau 8.1](#). De cette façon, le modèle d'interdépendances a-spatial et basé sur un travail d'analyse des fonctions et d'analyse de risque est transposé vers un modèle de données géographiques relationnel, de fait, spatialisé.

Il faut noter que l'élément « attribut » du modèle relationnel ne possède *a priori* pas d'équivalent

TABLEAU 8.1 – Transposition entre un modèle de données géographiques relationnel et un modèle fonctionnel (GONZVA *et al.*, 2016d)

modèle relationnel		modèle fonctionnel
table	↔	sous-système
champ	↔	composant
enregistrement	↔	sous-composant
attribut	↔	–
relation *	↔	fonction

* La notion de *relation* utilisée ici se fait au sens d'une *liaison* ou *association*; elle ne doit pas être confondue avec la notion de relation utilisée dans l'algèbre relationnelle, qui correspond à une table. On utilisera par la suite uniquement cette première définition pour la notion de relation.

au sein du modèle fonctionnel, du moins pas de façon aussi évidente que les autres éléments. C'est l'information géographique qui vient combler ce manque pour rendre la transposition d'un modèle à l'autre complète et théoriquement possible.

8.1.2.2 Etape 1 : détermination des éléments d'un modèle à l'autre

La description concrète de la transposition du modèle d'interdépendances de système de transport guidé vers un modèle relationnel de système de transport guidé est faite étape par étape. Les étapes sont toujours décrites dans le cas où le système de transport est impacté par une inondation.

Le point de départ de la transposition se base sur les résultats de l'analyse fonctionnelle, à savoir les Blocs-diagrammes Fonctionnels qui mettent en évidence les sous-systèmes et leurs fonctions.

Tout d'abord, la première étape consiste à **déterminer les objets du modèle entité-association**, c'est-à-dire la partie « entité » (Figure 8.2). Elle consiste alors à transposer les sous-systèmes en tables (Tableau 8.1).

8.1.2.3 Etape 2 : association des éléments d'un modèle à l'autre

L'étape 2 consiste à **déterminer les relations entre les objets du modèle**. Elle consiste alors à transposer les fonctions en relations (Tableau 8.1). Par exemple, le modèle fonctionnel a permis d'identifier la fonction suivante : l'infrastructure assure le support du matériel roulant. C'est la raison pour laquelle une association « supporter » relie les tables « matériel roulant » et « infrastructure ». On obtient ainsi le diagramme entité-association du modèle (Figure 8.3).

8.1.2.4 Etape 3 : ajout des attributs et cardinalités au sein des champs

C'est à cette étape qu'est mobilisée l'**information géographique**. Elle joue le rôle d'attributs dans le modèle relationnel et permet l'intégration de caractéristiques géographiques; en quelque sorte, l'information géographique permet de spatialiser le modèle d'interdépendances afin d'obtenir un modèle relationnel géographique complet du système de transport guidé. Les attributs, pour chaque table du modèle de données, correspondent à :

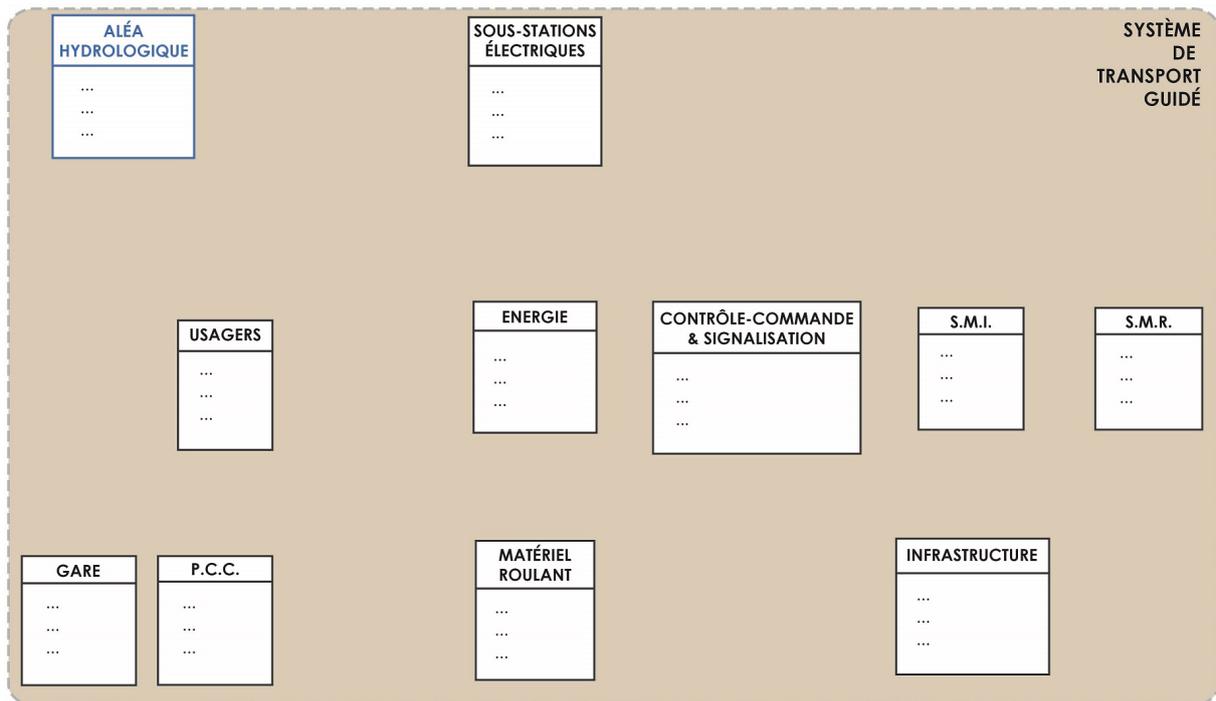


FIGURE 8.2 – Première étape de la transposition — détermination des entités (source : auteur)

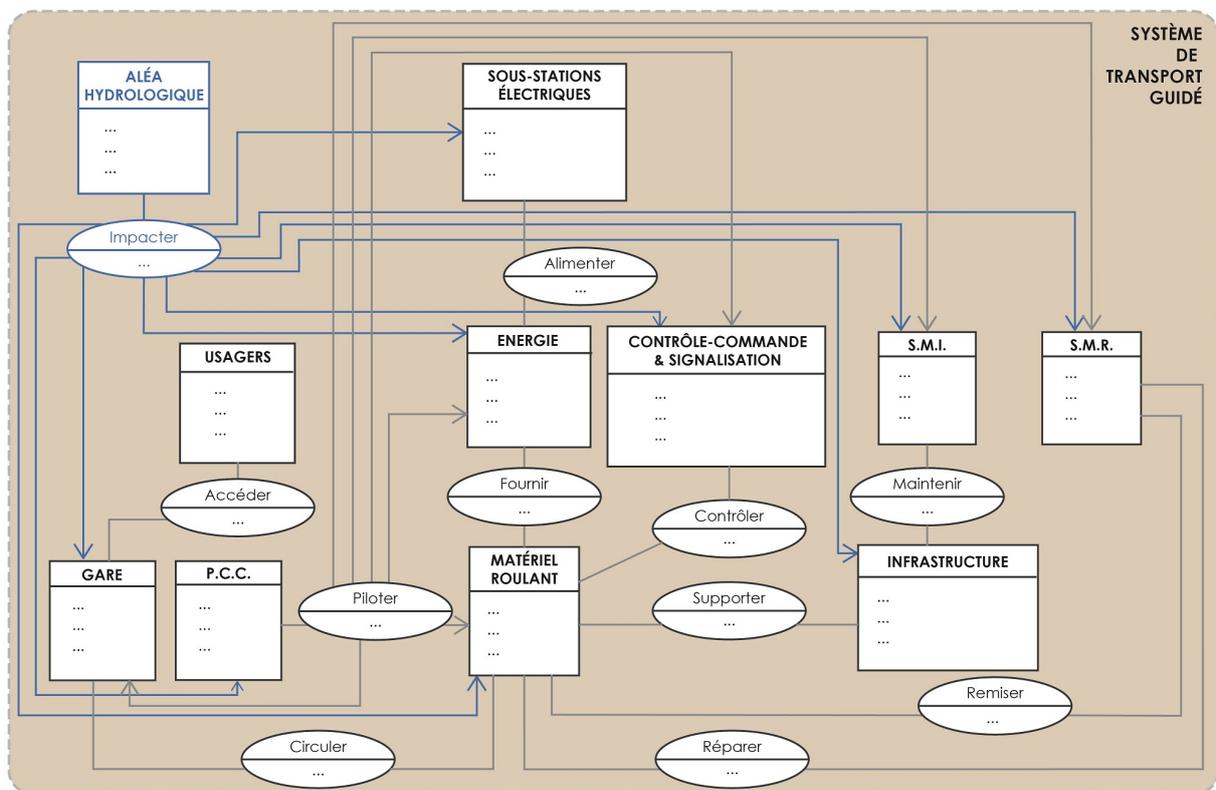


FIGURE 8.3 – Deuxième étape de la transposition -- détermination des associations (source : auteur)

- un niveau *géométrique* : les champs représentent des objets surfaciques (cas d'une gare, d'une sous-station électrique par exemple), linéaires (cas de l'infrastructure par exemple) ou ponctuels (cas du matériel roulant par exemple) ;
- un niveau *sémantique* : chaque champ possède, d'une part, des attributs spatiaux ($x; y; z$) qui permettent de localiser un sous-système et d'autre part, des attributs temporels ($t_1; D; t_2$) qui traduisent respectivement l'instant où survient l'inondation, sa durée et sa fin.

Le niveau sémantique peut être fortement enrichi afin que l'apport de l'information géographique (et temporelle) ne se résume pas qu'à une donnée de hauteur ou de largeur de composant ferroviaire. Des pictogrammes spatiaux et temporels peuvent, par exemple, rendre le modèle plus riche dans sa prise en compte d'information géographique et temporelle. Les pictogrammes PVL, pour *Plug-in for Visual Language*, correspondent à un langage graphique qui représente les propriétés géométriques, temporelles et visuelles des objets et des attributs étudiés⁹ (BRODEUR *et al.*, 2000). Les PVL sont stéréotypés et s'intègrent dans un outil CASE, pour *Computer-Assistant Software Engineering*, appelé *Perceptory* qui repose sur des règles de modélisation précises. Par exemple, les caractéristiques spatiales d'une classe d'objets sont représentées à la gauche du nom de la classe et les caractéristiques temporelles sont à sa droite. La définition de caractéristiques spatiales et temporelles au niveau des attributs est également possible. Les pictogrammes spatiaux sont utilisés pour représenter les propriétés spatiales des concepts (forme ponctuelle, linéaire et polygonale, éléments 2D, 3D) et les pictogrammes temporels sont utilisés pour représenter les propriétés temporelles (existence ponctuelle ou existence durable) (BÉDARD et LARRIVÉE, 2008) (Figure 8.4). Ces pictogrammes ont déjà été utilisés pour la modélisation, l'analyse et la gestion de réseaux de transports urbains afin de promouvoir l'utilisation de SIG dans ce contexte (CHEN *et al.*, 2008).

	2D space	3D space	Examples of cases
0D geometry			hydrants when they are all represented by points
1D geometry			road segments when they are all represented by lines
			electric poles when they are all represented by vertical lines
2D geometry			lakes when they are all represented by polygons
			walls when they are all represented by vertical plans
3D geometry			buildings when they are all represented by solids
0D temporality			Existence of accidents; traffic flow of a road segment
1D temporality			Existence of a building; duration of its commercial use; duration of its ownership by a given person

FIGURE 8.4 – Pictogrammes spatiaux 2D et 3D et pictogrammes temporels (BÉDARD et LARRIVÉE, 2008)

De plus, les associations peuvent également présenter des attributs d'ordre sémantique. Ces attributs caractérisent alors une ou plusieurs valeurs qui décrivent cette association. Par exemple, dans le cas de l'association « alimenter » entre les entités « gare » et « matériel roulant », elle pourrait présenter

9. "PVL (*Plug-in for Visual Languages*) [...] is a simple but powerful graphical notation depicting geometric, temporal and visual properties of objects and attributes."

un attribut « tension » prenant les valeurs « 750 volts », « 15 000 volts » ou encore « 25 000 volts » et un attribut « fréquence » prenant les valeurs « 50 hertz » ou encore « 16,7 hertz ».

C'est à cette étape également que sont déterminées les **cardinalités** entre entités et associations. Les cardinalités correspondent au nombre minimum et maximum de fois où une occurrence d'entité participe dans des occurrences d'une association avec d'autres occurrences d'une ou plusieurs autres entités. Par exemple, dans le cas de l'association « piloter » qui relie les entités « P.C.C. » et « matériel roulant », les cardinalités sont les suivantes : un P.C.C. pilote au minimum un matériel roulant d'une ligne de transport et peut également en piloter sur plusieurs lignes de transport simultanément, d'où une cardinalité (1, n) ; un matériel roulant relatif à une ligne de transport est nécessairement piloté par un P.C.C. et uniquement par un P.C.C. en charge de cette ligne, d'où une cardinalité (1, 1).

Le travail d'ajout des PVL au niveau des tables, des attributs et des cardinalités au sein des champs est présenté dans le modèle de données en Figure 8.5.

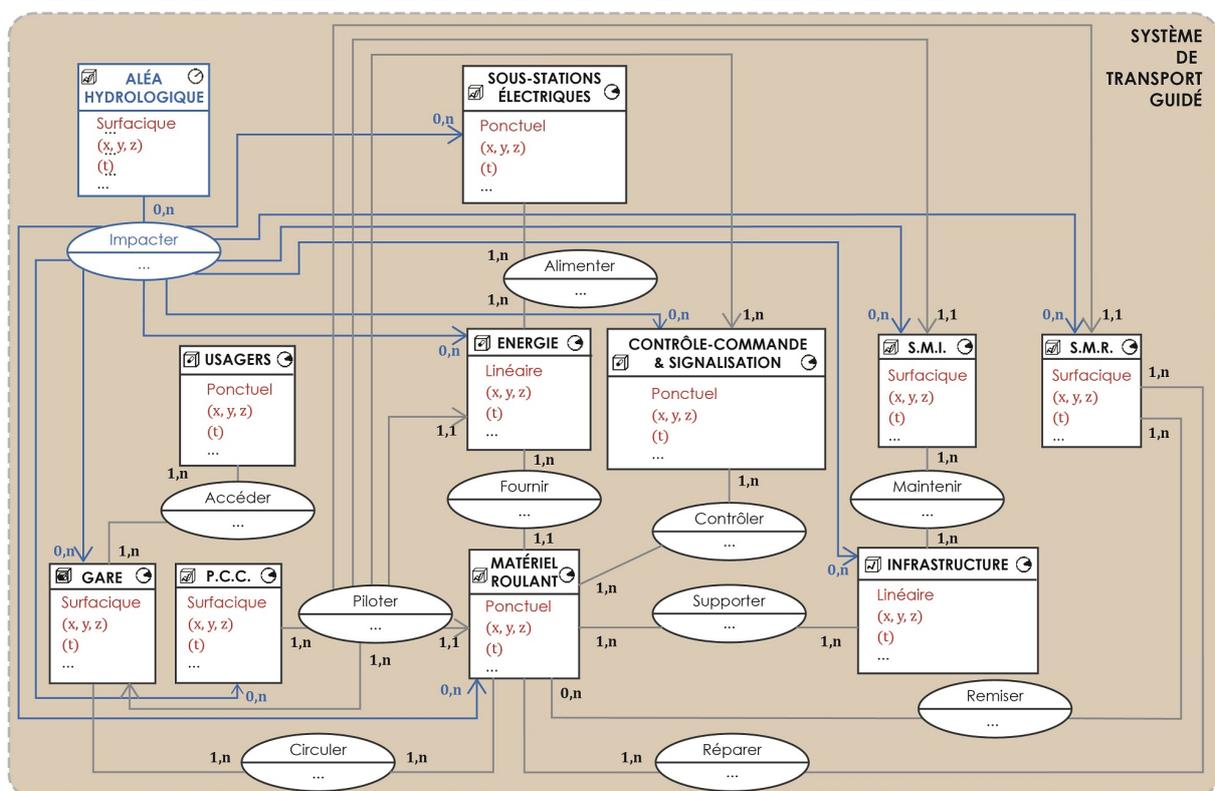


FIGURE 8.5 – Troisième étape de la transposition – détermination des attributs et cardinalités (source : auteur)

8.1.2.5 Etape 4 : élaboration d'une algèbre relationnelle

La dernière étape consiste à déterminer les **opérations élémentaires** qu'il est possible de faire au sein du modèle relationnel dans le but d'interroger les données et d'en extraire des informations utiles pour la gestion des risques affectant les systèmes urbains.

L'objectif pratique de l'**algèbre relationnelle** consiste premièrement ici à croiser l'entité « aléa hydrologique » (ou « aléa inondation ») avec toutes les autres afin qu'il soit possible de déterminer les effets de l'aléa sur les composants du système. Dans les faits, les relations liant l'entité « aléa hydrologique » aux autres entités ont un statut particulier. En effet, ces relations ne sont pas *stricto sensu* des

associations, puisque ces relations ne sont pas permanentes, mais sont conditionnées par les caractéristiques géographiques de l'aléa et des autres entités. Par exemple, il est possible d'imaginer qu'un aléa n'impacte directement aucune gare si aucune gare ne se situe au sein de l'emprise géographique de l'aléa. A partir de ces caractéristiques géographiques, une réflexion profonde doit ensuite être menée afin de préciser les attributs pouvant être associés à ces relations particulières. En l'occurrence, il semble nécessaire de caractériser les relations « impacter » par un attribut « niveau d'impact ». Ce niveau d'impact peut alors être obtenu en croisant les caractéristiques de l'aléa (hauteur d'eau, vitesse...) et les caractéristiques des objets concernés (état de l'objet, dispositif de protection...).

L'ensemble de ces réflexions mène à l'élaboration de règles multicritères plus ou moins complexes (MALCZEWSKI, 2004; CHEN *et al.*, 2010; FEIZIZADEH *et al.*, 2014) et propres à chaque relation entre l'entité « aléa hydrologique » et les autres entités. Des premiers exemples simples de ce que peut produire une algèbre relationnelle comme informations nouvelles sont donnés ci-après dans un cas virtuel d'application.

8.1.3 Principes de mise en œuvre au sein d'un SIG du modèle autour d'un cas d'application fictif

Désormais, l'objectif est la mise en œuvre pratique du modèle de données relationnel géographique, décrit précédemment de façon théorique, au sein d'un SIG. De cette façon, le modèle d'interdépendances conçu aux [chapitre 3](#) et [chapitre 4](#) bénéficiera d'une dimension spatiale.

La partie précédente a abouti au schéma entité-association permettant de concevoir la base de données à ensuite implanter dans un SIG. La partie ci-dessous présente les **typologies de données** contenues dans cette base de données ainsi que les **principes de l'algorithme de rétroaction** qui contient les **opérations** à réaliser parmi ces données afin d'obtenir les défaillances indirectes, c'est-à-dire par effet domino, des composants du système. Le but est alors de déterminer les **principes d'implémentation de ce modèle** à partir d'un **cas d'application virtuel** simple de système de transport subissant un risque inondation. Différents niveaux d'information sont mis en évidence pour définir ces principes d'implémentation dans un SIG ([Figure 8.6](#)). Ces niveaux sont en fait issus du principe de fonctionnement du modèle d'interdépendances. Ils permettent de montrer les mécanismes complexes de vulnérabilité du système de transport en déclinant cette vulnérabilité selon trois niveaux : un niveau **matériel, structurel et fonctionnel** (GLEYZE, 2005).

8.1.3.1 Niveau matériel

Cette première couche d'informations constitue la **base physique du système** qui est étudié. En effet, le niveau matériel est défini par l'ensemble des sous-systèmes, composants, sous-composants et autres éléments qui constituent le système urbain étudié. Ce sont donc les éléments matériels du système de transport guidé, positionnés spatialement, et qui sont susceptibles d'être soumis à un aléa inondation. Les informations contenues dans ce niveau matériel sont issues du travail réalisé dans le cadre de l'analyse structurelle appliquée à un système de transport guidé (cf. [chapitre 2](#)).

8.1.3.2 Niveau structurel

Cette deuxième couche d'informations aborde la notion de **réseau** existant entre les éléments matériels du système. En effet, lorsqu'un élément matériel est touché par un aléa, l'organisation du système est modifiée c'est-à-dire que les liaisons fonctionnelles entre cet élément et les autres ne sont plus toutes assurées. La **structure réticulaire** qui existe au sein du système en situation normale de fonctionnement est donc altérée suite à cet endommagement matériel initial. Ainsi, le niveau structurel prend en compte les interdépendances entre les éléments matériels. Les informations contenues dans ce niveau matériel sont issues du travail réalisé dans le cadre de l'analyse fonctionnelle appliquée à un système de transport guidé (cf. [chapitre 3](#)).

8.1.3.3 Niveau fonctionnel

Ce troisième niveau d'informations caractérise les **effets sur le fonctionnement du système** de défaillances d'éléments matériels. Une défaillance matérielle se traduit alors par une exploitation de façon dégradée du système qui ne peut plus assurer un niveau nominal de service.

8.1.3.4 Mécanisme de rétroaction

Le modèle d'interdépendances et l'exploitation de ses résultats ont montré l'existence d'**effets domino** comme source de **séries de défaillances successives**. La connaissance complète de ces mécanismes particuliers de mise en défaillance des composants a permis une caractérisation fine de la vulnérabilité des systèmes de transport guidé soumis à un risque inondation. Il est donc essentiel qu'ils apparaissent sur ce SIG.

Pour que les informations contenues dans le niveau fonctionnel soient exhaustives, il est nécessaire de mettre en place un **mécanisme de rétroaction** qui, pour chaque élément matériel identifié comme défaillant, réinterroge le niveau structurel pour déterminer les éléments matériels qui dépendent de celui-ci et peuvent à leur tour devenir défaillants. De façon itérative, il est possible d'obtenir toutes les chaînes de défaillances successives et alors de caractériser l'impact général d'un aléa hydrologique sur l'ensemble du système. C'est en fait exactement le principe mis en œuvre dans le modèle d'interdépendances.

8.1.4 Application à un système de transport guidé virtuel

Pour illustrer les principes de mise en œuvre pratique d'un modèle de données relationnel géographique au sein d'un SIG, un cas virtuel de système de transport est considéré.

Les niveaux matériel et structurel définissent l'architecture du système considéré et les relations de dépendances et d'interdépendances au sein des éléments de cette architecture. Chaque élément possède des attributs spatiaux, c'est-à-dire que sa position spatiale est définie par des coordonnées $(x; y; z)$. Ces coordonnées représentent le centre du composant considéré. L'architecture est volontairement simplifiée, dans une intention illustrative, et ne recense que quelques composants très représentatifs d'un système de transport ([Figure 8.7](#)).

A partir du système ainsi défini, un aléa inondation vient impacter une section du système. La zone d'aléa est déterminée sous forme de patateïde dont l'ensemble des points qui délimitent la surface

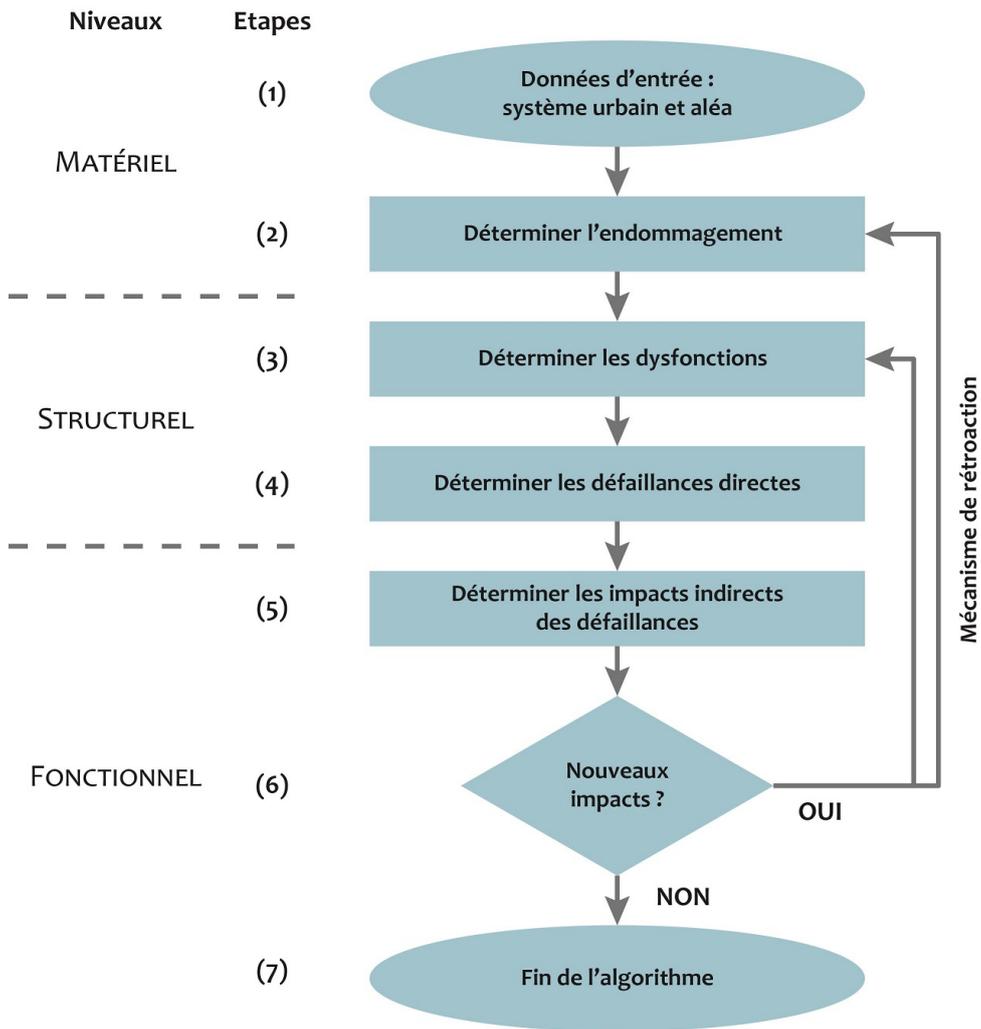


FIGURE 8.6 – Algorithme d'implémentation du modèle de données au sein d'un SIG (source : auteur)

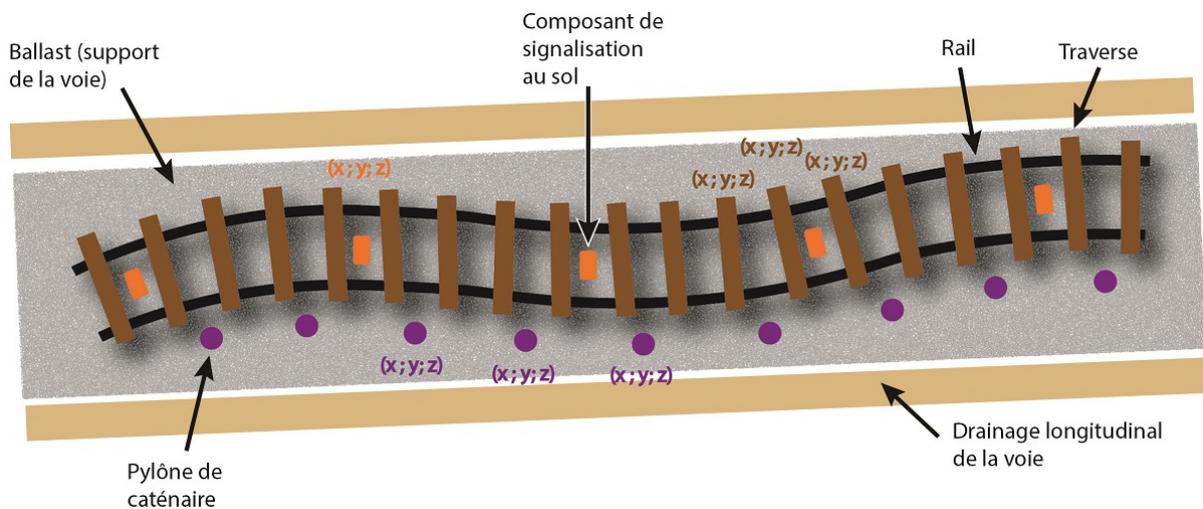


FIGURE 8.7 – Description matérielle et structurelle du cas d'application virtuel (source : auteur)

sont spécifiés à partir de leurs coordonnées $(x; y; z)$ connues. Les éléments du système inclus dans la zone d'aléa sont alors directement impactés et deviennent donc défaillants. Cela correspond à des défaillances directes, de premier ordre (Figure 8.8).

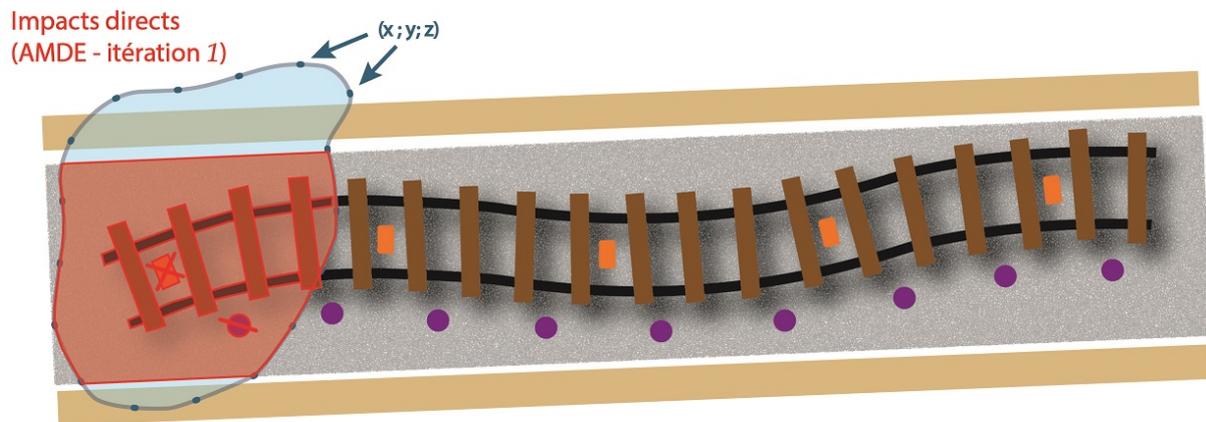


FIGURE 8.8 – Impacts directs de l'aléa hydrologique sur le cas d'application virtuel (source : auteur)

Puis, grâce à l'algorithme de rétroaction mis en place, l'AMDE est interrogée afin d'identifier si les composants défaillants par impact direct entraînent la défaillance d'autres composants par impact indirect (effet domino). Cela correspond à des défaillances de deuxième ordre, ou plus (Figure 8.9). C'est le cas par exemple des pylônes supportant la caténaire car, dans le cas où la banquette de ballast est détruite au niveau de la zone inondée, des pylônes situés à proximité peuvent être déstabilisés et s'effondrer.

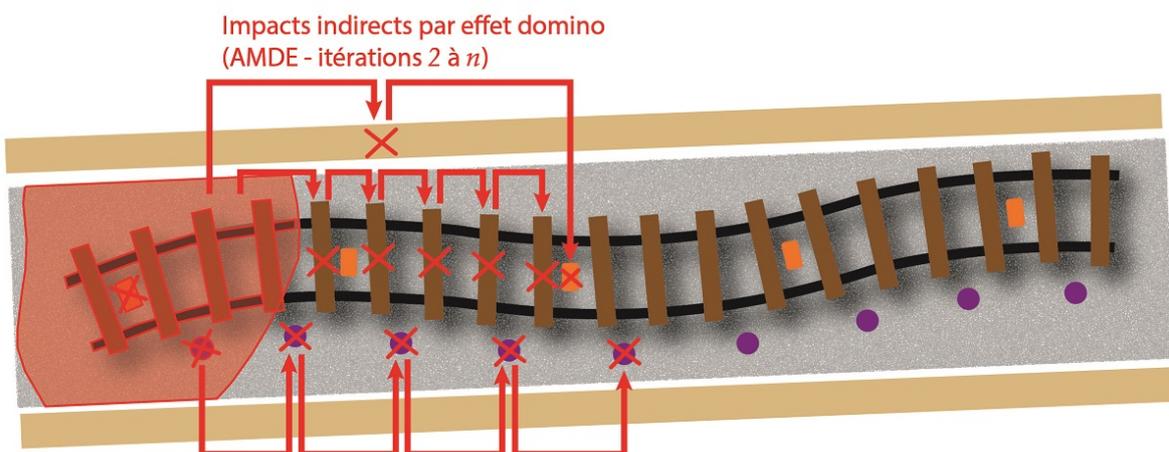


FIGURE 8.9 – Impacts directs de l'aléa hydrologique sur le cas d'application virtuel (source : auteur)

Avec une algèbre relationnelle établie, des opérations élémentaires seront permises, au sein du modèle, dans le but d'interroger les données qu'il contient. Un exemple d'opérations rendues possibles par une algèbre relationnelle peut être le suivant :

- dans une première étape, l'utilisateur peut entrer un **degré d'intensité de l'inondation**, de 1 à 5, selon que l'on soit dans le cas d'un événement pluvial à faible période de retour ou d'une crue majeure ;
- puis, les composants se voient attribuer une valeur relative à leur **état** après avoir été touché par l'aléa, de 1 à 5, selon qu'ils ont été faiblement ou très fortement touchés ;

- pour un composant donné k , ces deux valeurs seraient alors **croisées** selon des règles établies permettant de déterminer si, selon la valeur d'intensité de l'aléa et la valeur de l'état du composant, celui-ci fonctionne ou ne fonctionne plus ;
- dans une seconde étape, grâce au contenu de l'AMDE, il peut alors être possible de déterminer les autres composants i , j , ou m dont le bon fonctionnement dépend directement du bon fonctionnement du composant k . L'impact global, c'est-à-dire l'impact **direct** et l'impact **par effet domino**, d'un risque inondation peut donc être de cette façon évalué quantitativement (nombre et types de composants défaillants) et spatialement (positions de ces composants défaillants) (Figure 8.10).

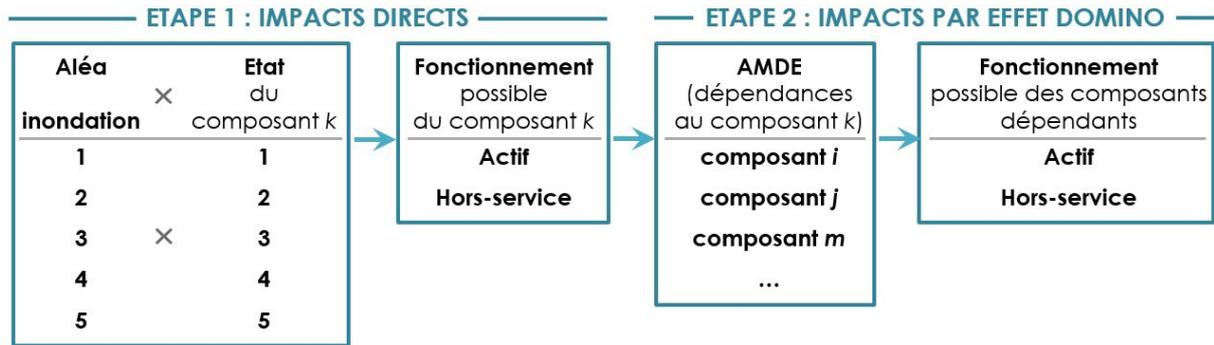


FIGURE 8.10 – Application des principes de l’algèbre relationnelle sur le cas d’application virtuel (source : auteur)

8.1.5 Autre modélisation possible : le cas de RailML

La multiplication de programmes informatiques spécialisés dans la modélisation, dans son sens le plus large, de composants ou de sous-système du système de transport est très importante depuis les dernières années. Tous les aspects relatifs aux systèmes ferroviaires semblent aujourd’hui faire l’objet d’un logiciel informatique : conception de l’infrastructure, construction des grilles horaires, affectation du personnel de maintenance, simulation de trafic, etc. Cette multiplication des outils informatiques s’est accompagnée d’une multiplication des formats de données, des protocoles informatiques de communication et des manières de structurer l’information, rendant alors complexe les échanges entre ces outils (NASH *et al.*, 2010).

Or, dans une vision collaborative de la conception, de l’exploitation ou de la maintenance des systèmes de transport, les échanges entre ces logiciels traitant chacun de parties ou sous-parties du système global sont cruciaux.

Pour résoudre ce problème devenu classique tant les champs d’application des outils informatiques sont nombreux dans les domaines techniques et scientifiques, l’*Extensible Markup Language* ou XML est considéré comme une solution idéale pour le stockage et l’échange de données relatives aux systèmes ferroviaires¹⁰ (NASH *et al.*, 2010). Ce langage basé sur du XML et dédié aux systèmes ferroviaires est nommé RailML¹¹.

Le développement de **RailML** se fait depuis 2001 dans le cadre d’un partenariat dont le nombre de membres croît régulièrement et qui se veut volontairement ouvert à toute entité qui souhaite déve-

10. "Therefore, XML was an ideal solution for transfer and storage of railroad data."

11. www.railml.org

opper des applications informatiques dans le domaine du ferroviaire. Ces membres sont de tous horizons : exploitants ferroviaires, gestionnaires d'infrastructures ferroviaires, fournisseurs, universités, etc.

Dans la version actuelle de RailML, quatre champs de données existent (Figure 8.11) :

- *infrastructure* : avec des attributs liés à la description des composants de la voie ferré et de la signalisation ;
- *matériel roulant* : avec des attributs liés à la description des véhicules ;
- *grille horaire* : avec des attributs liés à la description des grilles horaires relatives au trafic ferroviaire ;
- systèmes d'enclenchement et sécurité (*interlocking*) : avec des attributs liés à la description de l'état de l'ensemble des signaux relatifs à la circulation en toute sécurité des véhicules.

Chacun de ces champs est lui-même divisé en d'autres axes de travail. D'autres champs sont actuellement envisagés tels que l'affectation du personnel et la gestion du patrimoine ¹².

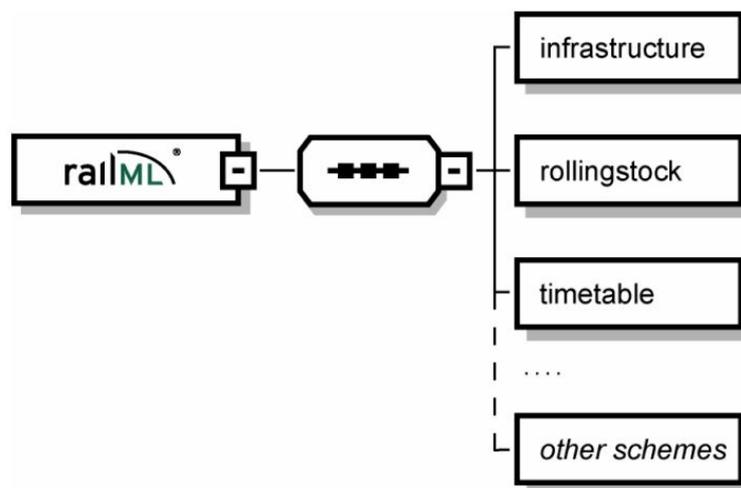


FIGURE 8.11 – Différents axes de développement de RailML (NASH *et al.*, 2010)

Le principe de RailML pour l'échange de données est double (NASH *et al.*, 2010) : chacune des applications modélisant une sous-partie du système global produit des fichiers de sortie utilisables par toutes les autres applications comme des fichiers en entrée, et, chaque application peut transférer des données à une autre application par des processus de communication établis (Figure 8.12).

RailML forme des perspectives de travail innovantes dans cette recherche qui vise à déterminer de quelles manières un aléa inondation affecte un système de transport guidé sur le plan matériel et sur le plan fonctionnel. Des similarités entre la démarche entreprise dans cette recherche et la démarche entreprise dans le cadre de RailML peuvent être indiquées. Premièrement, RailML présente comme base de travail un découpage du système de transport **en sous-systèmes constitutifs** : infrastructure, matériel roulant, etc. Cette démarche est tout à fait similaire à l'analyse structurelle menée au début de la démarche méthodologique de caractérisation de vulnérabilité face au risque inondation. Deuxièmement, RailML pointe clairement le **rôle des interactions entre les éléments** du système ; c'est justement le fondement de ce projet qui traite l'interopérabilité entre toutes les données relatives aux éléments. Ces interactions forment également la base de la démarche de caractérisation des

12. <http://www.railml.org/en/user/subschemes.html>

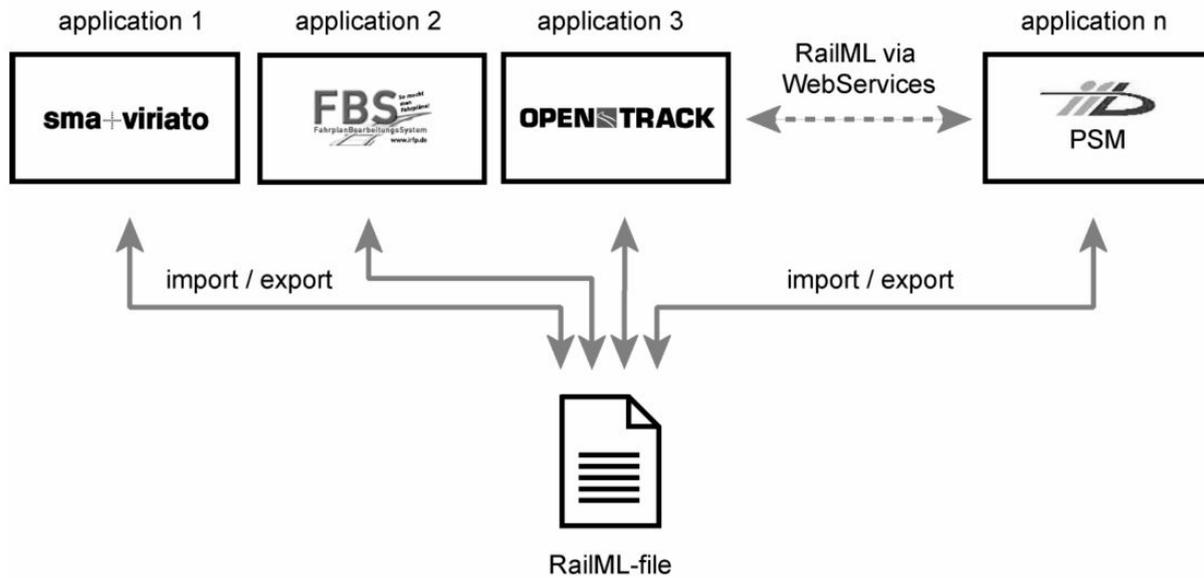


FIGURE 8.12 – Deux formes de transfert de données permis par RailML (NASH *et al.*, 2010)

effets matériels et fonctionnels d'une inondation sur un système de transport guidé : effet domino, dégradation du service assuré, etc.

Ainsi, la démarche méthodologique entreprise dans cette recherche semble être *a priori* transposable vers RailML dans le but d'inclure le sujet de la gestion des risques naturels au sein de ce projet visant au partage des données et à l'interopérabilité des systèmes. Un travail approfondi nécessite d'être mené afin de déterminer, en particulier, si la problématique des risques doit être étudiée comme un champ de données propre, tel que l'infrastructure, ou si, au contraire, elle doit être intégrée dans chacun des champs de données existants en tant qu'enjeu transversal.

8.1.6 Synthèse

Le modèle d'interdépendances développé dans les [chapitre 3](#) et [chapitre 4](#) fournit une analyse de vulnérabilité des systèmes de transport guidé face au risque inondation par l'intermédiaire d'une étude des scénarios de défaillances successives de composants qui peuvent être potentiellement générés par des effets domino internes au système. Une des pistes d'amélioration de ce modèle est de **spatialiser** ses résultats c'est-à-dire les scénarios de défaillances successives. L'intérêt est d'avoir une connaissance spatiale globale grâce à un zonage de l'impact d'un risque naturel sur un système de transport guidé.

L'intégration d'une dimension spatiale au modèle d'interdépendances est permise par un croisement méthodologique entre des méthodes issues de la Sûreté de Fonctionnement, sur lequel se base justement le modèle d'interdépendances, et la géomatique. Ce croisement de méthodes, appliquées ordinairement dans des contextes très différents, permet le passage d'une modélisation fonctionnelle à une modélisation relationnelle et inversement. L'information géographique est, ainsi, théoriquement ajoutée au modèle d'interdépendances. Sur le plan pratique, un cas virtuel de système de transport guidé soumis à un aléa inondation illustre les principes et capacités d'une implémentation au sein d'un SIG.

Ce modèle relationnel sur lequel se base le modèle d'interdépendances spatialisé pourrait être encore

plus approfondi en matière de schéma conceptuel de données par la construction d'une **ontologie**¹³ spécifique. En effet, bien que les bases de données relationnelles demeurent un des moyens les plus répandus pour stocker, rechercher et manipuler des données, la structure et les contraintes d'intégrité du modèle relationnel sont définies par des schémas qui ne sont pas aussi expressifs que des ontologies pour ce qui est de la représentation de la sémantique des données. Il peut donc s'avérer intéressant de construire des ontologies qui soutiennent sémantiquement l'information contenue dans ces modèles de données relationnelles (BENSLIMANE *et al.*, 2006) afin de rendre l'ensemble plus robuste. L'ontologie ne nécessite d'ailleurs pas de reprendre toute la démarche depuis le début en mettant de côté le modèle relationnel élaboré. Des logiciels permettent, en effet, une fois le modèle relationnel élaboré et la base de données associée, d'en dériver une ontologie précise et instanciée (CERBAH, 2008). Des approches de type rétro-ingénierie montrent également leur efficacité pour la construction d'ontologies (BENSLIMANE *et al.*, 2006).

Synthèse

Une limite mise en avant à propos de la démarche méthodologique globale basée sur trois modèles successivement appliqués à des systèmes de transport souterrains, de surface et aériens soumis au risque inondation est la non prise en compte de la dimension spatiale. En particulier, les scénarios de défaillances successives de composants dues à des effets domino ne sont pas spatialisés. Or, la maîtrise et la gestion des risques a ordinairement recours à des approches spatiales afin de comprendre les relations entre le risque et le territoire et d'inscrire spatialement les dommages aux systèmes. Dans ce contexte, une méthode est proposée pour ajouter une caractéristique spatiale au modèle d'interdépendances construit. Elle consiste à passer d'une modélisation fonctionnelle et dysfonctionnelle construite grâce à des méthodes de Sûreté de Fonctionnement à une modélisation relationnelle permise par la géomatique. L'information géographique permet, en effet, le croisement entre un zonage spatial de l'aléa avec une position spatiale du système de transport guidé. Un cas virtuel illustre, dans le principe, la mise en œuvre pratique du modèle de données relationnel géographique au sein d'un SIG visant à la spatialisation du modèle d'interdépendances.

8.2 Vers une caractéristique temporelle au sein de la démarche méthodologique

8.2.1 Motivations et principe

Le modèle d'interdépendances développé dans les chapitre 3 et chapitre 4 permet une étude de vulnérabilité des systèmes de transport guidé face au risque inondation. Cette étude est menée au travers de l'analyse des défaillances de composants qui peuvent se produire selon un processus par effet domino.

13. Le terme ontologie se réfère à un vocabulaire ou un système de classification qui décrit les concepts opérant dans un domaine particulier à travers des définitions suffisamment détaillées pour saisir la sémantique du domaine (BILLEN, 2009). Une ontologie correspond donc à un ensemble structuré de termes régissant le sens des éléments d'un domaine de connaissances

Les résultats de cette analyse c'est-à-dire l'ensemble des scénarios de défaillances successives identifiés ne présentent pas de caractéristique temporelle. Or, plusieurs arguments qui vont dans le sens de l'**intégration d'une dimension temporelle** à ces résultats peuvent être soulevés :

- en phase de préparation à la crise, la défaillance de composants du système peut ne plus être applicable (composants retirés et déplacés à l'abri). L'ensemble des scénarios de défaillances successives contenant certains de ces composants déposés doivent donc être retirés des effets domino possibles ;
- en phase de crise c'est-à-dire lorsqu'une inondation impacte un système de transport guidé, le mécanisme de propagation des défaillances par effet domino observé au sein du système soulève, de fait, la question de la temporalité de cette propagation ;
- en phase de rétablissement, la caractéristique temporelle est aussi présente au travers du délai avant que le système soit de nouveau apte à fonctionner de façon partielle et de façon totale ;
- la présence d'une dimension temporelle, démontrée dans le [chapitre 7](#), pour caractériser la conséquence fonctionnelle (fonctionnement en mode dégradé) imposée par une inondation rend implicite l'existence d'un aspect temporel pour caractériser l'impact matériel.

Les scénarios de défaillances produits par le modèle d'interdépendances posent, entre autres, la question suivante : dans un scénario de défaillances impliquant successivement un composant A, puis B, puis C, combien de temps les composants B et C peuvent-ils continuer à assurer leur fonction après la défaillance du composant A ? En corollaire à cette question se pose aussi celle du temps qu'ont les opérateurs ou gestionnaires pour intervenir et réparer le composant A avant que la propagation par effet domino n'entraîne la défaillance du composant B, puis C.

8.2.2 Exemples de prise en compte de la dimension temporelle dans l'analyse des effets domino

A la lumière de la section précédente démontrant l'intérêt d'une caractéristique spatiale au sein du modèle d'interdépendances, il apparaît que **les interdépendances au sein d'un système de transport guidé revêtent, en fait, des propriétés spatio-temporelles**. Afin de proposer d'un point de vue pratique une prise en compte unifiée des propriétés spatiales et des propriétés temporelles, l'usage des SIG est mis en avant. Bien que les outils SIG n'aient pas été conçus initialement pour intégrer la dimension temporelle, de nombreuses recherches portent sur l'intégration de cette problématique ([BORDIN, 2006](#)). Même d'un point de vue purement pratique, peu de logiciels SIG prévoient autre chose qu'un attribut de type « date » pour intégrer le temps ([BORDIN, 2006](#), p. 70) alors que la propagation des perturbations *via* les interdépendances existantes entre éléments relève d'une véritable dynamique temporelle.

8.2.2.1 DOMINO, un prototype d'outil de modélisation et de cartographie des risques

L'outil **DOMINO** évoqué précédemment est sans doute un des systèmes existants les plus aboutis dans la prise en compte de la dimension du temps dans la modélisation des risques affectant un système de systèmes fortement dépendants.

Un des apports intéressants en lien avec le besoin d'intégration du paramètre temps au modèle d'interdépendances est celui des courbes de conséquences ([ROBERT et MORABITO, 2008](#)). Ces courbes

présentent les conséquences d'une défaillance sur une infrastructure en fonction de l'état de la ressource utilisée. Elles permettent alors d'évaluer les défaillances de type effet domino et de visualiser l'ampleur d'une crise, de prévoir son évolution. Le chaînage des défaillances est très visible par le biais de couleurs présentant le niveau de fonctionnement de chaque système étudié (Figure 8.13). L'outil répond, ainsi, aux questions relatives aux « quoi », « quand » et « où » en matière d'interdépendances entre infrastructures critiques et à leurs conséquences (ROBERT et MORABITO, 2008).

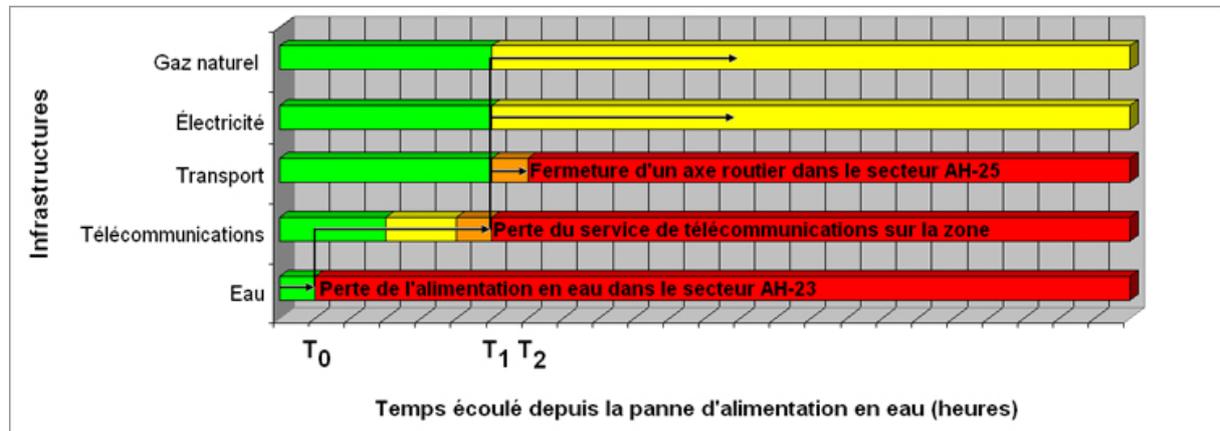


FIGURE 8.13 – Courbe de conséquences engendrées par des effets domino à partir d'une perturbation initiale sur le réseau d'alimentation en eau (ROBERT et MORABITO, 2008)

La prise en compte du paramètre temps des effets domino permise par les courbes de conséquences est en fait un module de l'outil DOMINO. L'outil permet plus globalement la gestion des interdépendances et l'analyse des effets domino *via* une base de données liée à un SIG. DOMINO offre donc une analyse et une représentation de type spatio-temporel des interdépendances et des effets domino qu'elles peuvent produire (Figure 8.14).

L'intégration de la dimension temporelle au sein du modèle d'interdépendances présenterait des différences avec le principe de fonctionnement de l'outil DOMINO, en particulier concernant la propagation de proche en proche des perturbations, les dommages matériels et fonctionnels, et l'échelle d'application (Tableau 8.2). En revanche, DOMINO apparaît comme un outil de référence pour la caractérisation de la vulnérabilité des systèmes de transport guidé, et des systèmes urbains en général, soumis à des risques de plusieurs types.

8.2.2.2 GenGHIS : géovisualisation de données multidimensionnelles

GenGHIS est un environnement informatique permettant la génération d'interfaces regroupant plusieurs fenêtres toutes interconnectées et représentant chacune une des différentes dimensions de l'information (DAVOINE *et al.*, 2009) :

- une fenêtre cartographique est dédiée à l'affichage de la dimension spatiale et à la formulation de requêtes spatiales ;
- une fenêtre temporelle représentant l'axe du temps sous forme de diagrammes spécifiques et permettant la réalisation de requêtes temporelles ;
- une fenêtre informationnelle constituée des données, liées aux thèmes étudiés, sous forme de tables.

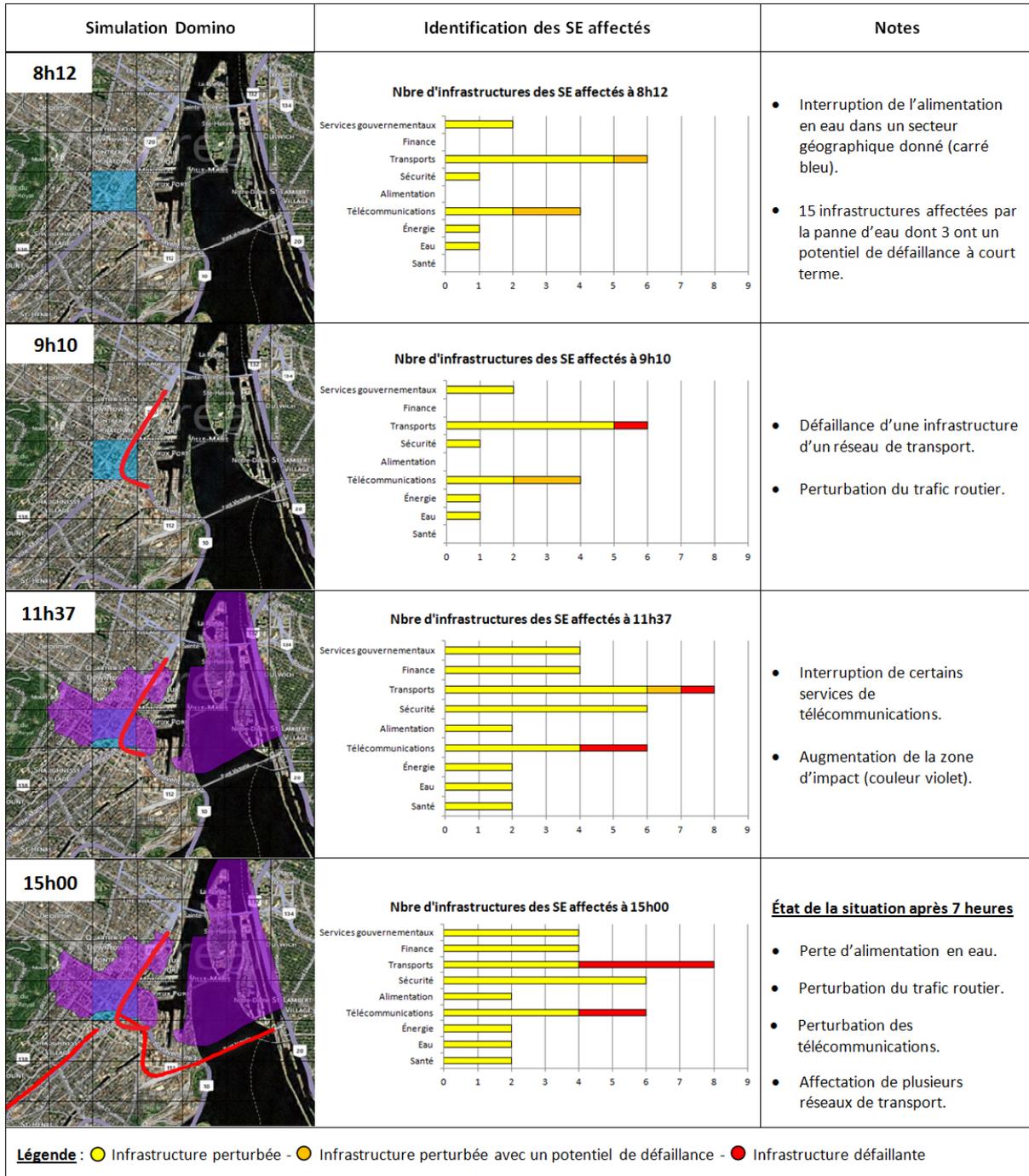


FIGURE 8.14 – DOMINO – prototype d’outil de modélisation et de cartographie des risques (source : site internet du CRP)

TABLEAU 8.2 – Différences entre l’outil DOMINO et le modèle d’interdépendances de cette recherche amélioré avec la prise en compte de la dimension temporelle

	DOMINO ¹⁴	Modèle d’interdépendances + dimension temporelle
Echelle d’étude	RSV : Réseaux de Support à la Vie (ou Infrastructures Essentielles, Critiques)	↔ Système de transport guidé (une infrastructure critique)
Causes/conséquences	« Il vise à évaluer les propagations dans le temps des conséquences sur les réseaux d’une situation pouvant engendrer un effet domino sans, a priori, s’attarder aux causes ayant menées à cette situation. »	↔ Nécessité d’identifier la chaîne complète des défaillances de façon précise, en particulier concernant leurs causes d’origine
Matériel/fonctionnel	« Il traite les interdépendances fonctionnelles en analysant les relations de type client/fournisseur existantes entre les réseaux. »	↔ Nécessité de traiter les interdépendances fonctionnelles en étudiant les inter-vulnérabilités c’est-à-dire les potentielles défaillances en chaîne

8.2.2.3 Cartes de synthèse dynamiques : cas d’application sur les inondations impactant les systèmes de transport guidé

Par ailleurs à ces développements intéressants dans le domaine de la géovisualisation intégrant la dimension temporelle, (SAINT-MARC *et al.*, 2014a) constatent que la géovisualisation est encore peu répandue dans l’étude des risques naturels et en particulier dans le domaine du ferroviaire. Dans ce contexte, un des apports majeurs de la géovisualisation peut être celui de **restituer aux gestionnaires de l’infrastructure et aux opérateurs ferroviaires une vision intégrée des inondations** historiques, à la fois sur un plan spatial et temporel (SAINT-MARC *et al.*, 2014a). A partir de représentations traditionnelles du temps sur les cartes en utilisant notamment des éléments visuels dont la variation des caractéristiques (taille, couleur, forme, etc.) représentent des événements, des restitutions cartographiques sont proposées pour visualiser les impacts d’inondations historiques sur un réseau ferroviaire.

Par exemple, les impacts d’une inondation sont représentés par des cercles de couleurs différentes en fonction de la date de l’impact. La taille décroissante des cercles permet de visualiser les superpositions. Les variables hydrologiques relevées lors de l’évènement apparaissent sous forme d’histogrammes bleus accompagnées d’une description en étiquette. L’ajout de photographies permet d’apprécier l’intensité des évènements (Figure 8.15) (SAINT-MARC *et al.*, 2014b).

Si les SIG peuvent être sources de techniques innovantes pour raisonner sur les dimensions spatiale, temporelle et thématique de l’information, (SAINT-MARC *et al.*, 2014a) relèvent une limite importante qui est celle de l’**aspect statique** des cartes. En effet, les cartes statiques ne permettent d’indiquer qu’un nombre limité d’informations alors que pourtant celles-ci sont nombreuses et pertinentes dans le contexte des inondations ferroviaires : type de composant ferroviaire touché, date de l’impact, effet domino entre composants défaillants, etc. Le développement actuel de **cartes de synthèse dynamiques** pourra, à terme, offrir une visualisation des impacts du risque inondation sur les systèmes de transport ferré et en particulier les mécanismes de propagation des défaillances par effet domino.

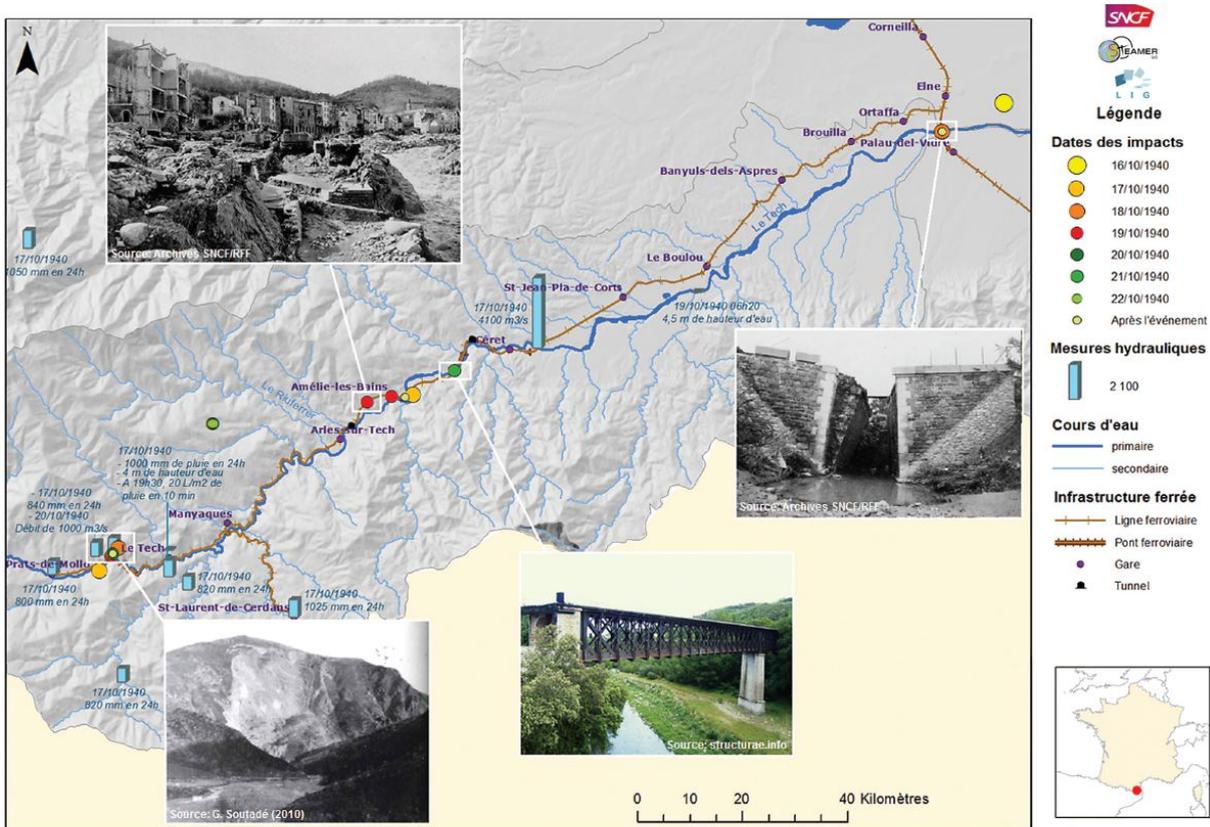


FIGURE 8.15 – Chronologie des événements de la crue d’octobre 1940, dans la vallée du Tech, centrée sur les impacts relatifs au réseau ferré (SAINT-MARC *et al.*, 2014b)

Synthèse

Une deuxième limite identifiée concernant la démarche méthodologique globale basée sur trois modèles appliqués à des systèmes de transport souterrains, de surface et aériens soumis au risque inondation est la non prise en compte de la dimension temporelle. En particulier, les scénarios de défaillances dues aux effets domino identifient les composants impliqués mais ne répondent, par exemple, pas à l'interrogation relative à la temporalité de propagation de ces effets domino (temps entre deux défaillances successives). Des méthodes et outils aujourd'hui utilisés pour la prise en compte de la caractéristique temporelle des effets domino existent. L'usage des SIG est notamment mis en avant pour intégrer la dimension temporelle. De plus, des développements récents dans le domaine de la géovisualisation proposent la représentation d'incidents dus à des effets domino sur des systèmes ferroviaires touchés par des inondations *via* de la cartographie dynamique.

8.3 Portée de la recherche entreprise dans une optique multirisque et multi-système

Un axe de perspective de recherche qui émerge est celui de la **transversalité de la démarche méthodologique** entreprise concernant la caractérisation de la vulnérabilité et l'opérationnalisation de la résilience face au risque inondation. La transversalité est déclinée à double égard : application de la démarche aux systèmes de transport guidé selon leurs trois configurations d'implantation traditionnelles face à d'autres risques, et application de la démarche aux autres systèmes urbains.

La transversalité de la démarche globale construite dans cette recherche et formalisée autour des trois modèles d'interdépendances, d'estimation coût-délai et probabiliste est essentielle dans une optique de résilience. Elle porte une vision globale des méthodes d'analyse et de gestion des risques à l'échelle de la ville, intégrant l'ensemble des événements susceptibles de perturber le fonctionnement urbain à court terme comme à long terme et permettant une amélioration de la résilience urbaine.

La transversalité des méthodologies pour la gestion des risques affectant les systèmes urbains est donc une dimension importante de la résilience urbaine. Les moyens pour mettre en œuvre cette nécessaire transversalité sont discutés dans cette section.

8.3.1 Perspective multirisque de la recherche

Le travail réalisé dans cette recherche relative aux systèmes de transport guidé aériens, de surface et souterrains n'est pas propre au risque inondation. Si le risque inondation a été identifié, c'est parce qu'il représente à l'heure actuelle le risque le plus important vis-à-vis des systèmes de transport. C'est, en effet, **l'aléa naturel le plus dommageable pour les systèmes de transport ferroviaire à l'échelle européenne** car, en termes de coûts liés aux infrastructures et à l'exploitation, celui-ci a représenté sur la période 1999-2010 plus de 100 millions d'euros par an, comparativement aux tempêtes et aux épisodes neigeux dont les coûts moyens annuels se sont respectivement élevés à 0,07 million et 0,04 million d'euros (ENEI *et al.*, 2011, p. xiv). C'est cette prépondérance du risque inondation par rapport

aux autres types de risques naturels qui justifie cette focalisation.

Néanmoins, à aucune étape la démarche méthodologique globale composée des trois modèles n'est devenue spécifique au risque inondation. Chaque étape de la démarche est, en effet, potentiellement applicable à un autre risque naturel.

Premièrement, au sujet du **modèle d'interdépendances** qui permet d'identifier et de produire de façon automatique l'ensemble des scénarios de défaillances par effet domino de composants au sein d'un système quelle que soit sa configuration d'implantation, son utilisation pour **d'autres risques naturels** requiert un travail presque uniquement applicatif :

1. Concernant l'Analyse Fonctionnelle, première étape de la démarche d'analyse de vulnérabilité, il suffit de déterminer les interactions de vulnérabilité lorsque le système est en situation de crise, c'est-à-dire lors de l'occurrence d'un aléa naturel (séisme, neige, etc.). Les interactions de contact et de dépendance lorsque le système est en situation normale restent *a priori* les mêmes ;
2. Concernant l'Analyse des Modes de Défaillance et de leurs Effets, deuxième étape de la démarche d'analyse de vulnérabilité, il est nécessaire d'en réaliser une nouvelle en considérant cette fois aussi l'aléa naturel étudié (séisme, neige, etc.) comme la perturbation qui va engendrer les modes de défaillance des fonctions assurées par les composants du système. De la même façon que pour le risque inondation, ces AMDE sont à compléter à l'aide d'experts de l'exploitation et de la maintenance et ce pour les trois configurations d'implantation ;
3. Concernant l'outil informatique d'identification et de production des interdépendances entre composants, il suffit d'intégrer les résultats de l'AMDE dans la base de données déjà structurée et de lancer le même algorithme que dans le cas du risque inondation. L'ensemble des requêtes qui forment cet algorithme produit alors tous les scénarios possibles de défaillances successives dues à des effets domino provoqués par l'occurrence de l'aléa naturel étudié (séisme, neige, etc.) ;
4. Concernant les graphes d'évènements causaux, ils sont utilisés identiquement au cas du risque inondation afin de représenter les scénarios de défaillances produits.

Il suffirait donc de « dérouler » la méthodologie construite dans le cas du risque inondation en l'appliquant au risque étudié (séisme, neige, etc.). Le travail serait donc uniquement applicatif et ne nécessiterait aucune modification sur la démarche. Cette conclusion est prévisible dans la mesure où le modèle d'interdépendances est fondé sur des méthodes issues de la Sûreté de Fonctionnement et ces « *démarches et méthodes, même cachées sous des noms divers et variés, s'avèrent universelles* » (MORTUREUX, 2001).

Deuxièmement, au sujet du **modèle d'estimation du coût et du délai de remise en état** d'un système de transport guidé impacté par un risque naturel donné (séisme, neige, etc.), il suffit également de suivre la même démarche que pour le risque inondation. Néanmoins, pour un risque donné, la démarche de construction du modèle coût-délai nécessite *a priori* moins de travail que dans le cas du modèle d'interdépendances. Le modèle d'estimation coût-délai implique de déterminer possiblement des scénarios d'aléas graduels (par exemple, séisme d'intensité faible, séisme d'intensité intermédiaire et séisme d'intensité forte, en précisant les caractéristiques dans chaque cas) ainsi qu'une base de données contenant des coûts et des délais de remise en état de composants. Or, dans une approche préliminaire, les coûts et délais de remise en état sont *a priori* invariants selon le risque naturel donné : qu'il soit endommagé par une inondation, un séisme ou des basses températures, il

est raisonnable de penser qu'un composant ne coûtera pas plus cher ou ne nécessitera pas plus de temps pour être remplacé. Le modèle d'estimation coût-délai nécessitera donc surtout de distinguer pour quel degré d'intensité d'aléa les résultats sont applicables. Pour comparaison, le modèle d'interdépendances nécessite de faire de nouveau le travail d'Analyse Fonctionnelle et surtout d'AMDE, qui reste un travail important et mobilisant plusieurs acteurs. Pour préciser ces coûts et délais de remise en état, l'accessibilité des composants après un séisme ou une inondation peut, cependant, varier fortement ce qui engendrerait des coûts ou des délais supplémentaires.

Troisièmement, au sujet du **modèle probabiliste** dont l'usage permet l'élaboration de stratégies de résilience par le biais d'une mise en fonctionnement dégradé, le travail consiste là aussi à suivre la démarche de construction d'un réseau bayésien : définition du graphe (nœuds et arcs) et des tables de probabilités conditionnelles. La définition du graphe est *a priori* invariante par rapport au type de risque naturel étudié dans la mesure où les éléments qui constituent le système ne changent pas. Un travail reste néanmoins à faire quant aux états que peuvent prendre chacun des nœuds. En revanche, l'essentiel du travail provient des tables de probabilités conditionnelles qui régissent les relations de causalité entre les nœuds. Dans le cas du risque inondation, ces tables sont remplies à l'aide des référentiels techniques, de résultats produits à partir d'essais sur des maquettes physiques et d'une connaissance experte. Pour tout autre risque naturel étudié, les tables de probabilités conditionnelles sont construites avec ces mêmes sources de données. Un travail important d'identification des sources existantes de données et de recueil de la connaissance d'experts est donc à réaliser pour rendre opérationnel le réseau bayésien.

Finalement, la démarche méthodologique globale étant construite, l'essentiel du travail pour un risque naturel autre que le risque inondation consiste à appliquer chaque étape de la démarche. Le [Tableau 8.3](#) offre une synthèse de ces étapes en mettant en avant l'ampleur de la tâche ; pour la plupart, les tâches à réaliser sont en grande partie identiques au cas du risque inondation, analysé dans cette recherche.

TABLEAU 8.3 – Synthèse des tâches à réaliser pour appliquer de nouveau la démarche méthodologique globale à un risque naturel

Modèle	Étapes	Tâches à réaliser
Modèle d'interdépendances	Analyse Fonctionnelle	Déterminer uniquement les interactions de vulnérabilité
	AMDE	A faire
	Identification et production automatisée des interdépendances	Extraire les résultats de l'AMDE et faire fonctionner l'algorithme
	Graphes d'évènements causaux	Obtenus (format Excel) grâce à l'algorithme
Modèle d'estimation coût-délai	Scénarios d'aléas graduels	A faire
	Base de données de coûts	Réalisée
	Base de données de délais	Réalisé
Modèle probabiliste	Graphe (nœuds/arcs)	Partiellement réalisée
	Tables de Probabilités Conditionnelles	A faire

8.3.2 Utilisation de la démarche vis-à-vis d'autres systèmes urbains

8.3.2.1 Contexte de vulnérabilité des systèmes urbains

Si la perspective d'appliquer la démarche méthodologique globale à un autre risque apparaît faisable, une autre perspective est d'employer celle-ci à d'autres systèmes urbains critiques. Les systèmes de transport ne sont, en effet, pas les seules infrastructures critiques à être vulnérables aux risques naturels ; cette vulnérabilité multi-systèmes fait d'ailleurs l'objet d'importants projets de recherche (INFRARISK, 2013, project ; RAIN, 2014, project).

Le projet RAIN (2014-2017) pour *Risk Analysis of Infrastructure networks in response to extreme weather* a notamment consisté à mener des interviews auprès de 27 opérateurs et gestionnaires européens d'infrastructures critiques issus des secteurs de la distribution d'énergie, du transport ferroviaire et routier, des télécommunications et des services de gestion de crise. Ces interviews mettent en avant les risques naturels mentionnés comme ayant les impacts globaux les plus importants. Les impacts sociaux sont également précisés lorsqu'ils sont significatifs (Figure 8.16).

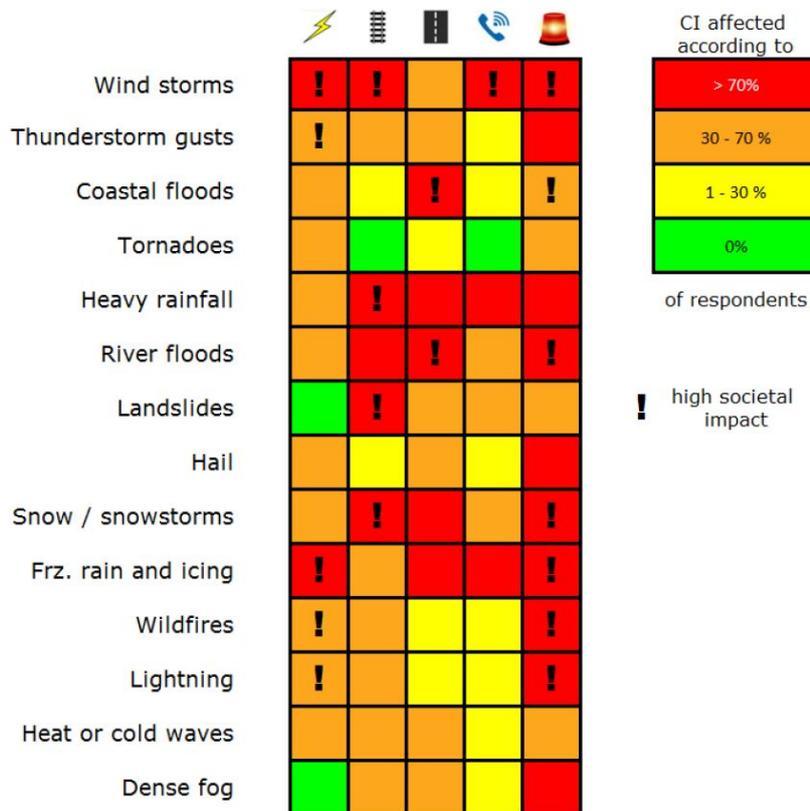


FIGURE 8.16 – Résultats d'interviews menées dans le cadre du projet européen RAIN auprès de gestionnaires et exploitants européens d'infrastructures critiques ayant à faire face à des risques naturels (GROENEMEIJER, 2015)

Dans une démarche similaire, le rapport de 2013 du Conseil général de l'Environnement et du Développement durable relatif à la vulnérabilité des réseaux d'infrastructures aux risques naturels présente une synthèse indicative et qualitative de la vulnérabilité de plusieurs couples aléa/réseau (Figure 8.17).

Dans ce contexte, une démarche globale, telle que développée dans cette thèse, de caractérisation de la vulnérabilité face aux risques naturels et d'amélioration de la résilience par l'intermédiaire de

	<i>Réseau routier</i>	<i>Réseau ferré (infra)</i>	<i>Réseau ferré (signalisation et SI)</i>	<i>Ligne électrique aérienne</i>	<i>Ligne HT enterrée</i>	<i>Réseau de distribution électrique enfoui</i>	<i>Gazoduc enterré</i>	<i>Cours d'eau navigable</i>	<i>Port maritime</i>
Crue et inondation de plaine	**	**	**		*	*	*	***	*
Tempête de vent	*	*	**	***		*			*
Houle, surcote marine	*	*	*						**
Séisme	**	**		*		*			**
Inondation rapide	***	**	**	*	*		*	**	
Neige exceptionnelle	**	**	*	**		*			*
Tsunami	**	**	*	*					**
Grand froid	*	*	*			**		*	
Canicule			**			*			
Chutes de blocs	**	**		*	*	*			
Effondrement (karst...)	*	**				*	*	*	
Avalanche	**	**	*	*		*			

*** (très vulnérable) ; ** (vulnérable) ; * (peu vulnérable) ; (vide) (non vulnérable ou sans objet)

FIGURE 8.17 – Approche préalable de la vulnérabilité des infrastructures critiques vis-à-vis de plusieurs risques naturels (DURAND, 2013, p. 13)

stratégies de fonctionnement en mode dégradé apparaît donc nécessaire pour l'ensemble des systèmes urbains critiques. Or, si les interdépendances sont largement mises en cause, dans la pratique et dans la recherche, lors de défaillances en chaîne, leur analyse n'en est pas moins complexe par l'absence de méthodes ou de cadres d'étude communs. Ces interdépendances revêtent un rôle essentiel puisque cette recherche démontre justement que la vulnérabilité des systèmes de transport guidé soumis à un risque inondation peut être caractérisée par l'étude des défaillances internes par effet domino que ces interdépendances peuvent générer. L'élaboration de méthodes en faveur de la compréhension des processus de défaillances en chaîne permises par ces interdépendances est d'autant plus cruciale que les sociétés actuelles ne peuvent envisager, sur le plan économique, une protection absolue de ses systèmes critiques (APOSTOLAKIS et LEMON, 2005) qui serait, d'ailleurs, sans doute infaisable (FEKETE, 2011).

Se pose alors la nécessité de distinguer les **interdépendances entre systèmes critiques** (TOUBIN, 2014) et les **interdépendances entre composants** de systèmes critiques. Dans le premier cas, l'échelle d'analyse est celle d'un système de systèmes critiques tandis que dans le second cas, l'échelle d'analyse est celle d'un système critique. Il est alors possible de parler, respectivement, **d'interdépendances** (entre systèmes) et **d'intradépendances** (au sein d'un système). A noter, qui plus est, que les intradépendances et interdépendances ne génèrent pas les mêmes défaillances par effet domino pour tous les risques naturels. Autrement dit, un même réseau d'intradépendances au sein d'un système ou un même réseau d'interdépendances entre plusieurs systèmes ne conduit pas nécessairement aux mêmes effets domino en cas d'occurrence d'un risque naturel A ou d'un risque naturel B. Par exemple, positionner le matériel roulant sur un point haut d'un réseau de transport (sections aériennes par exemple) est recommandé en cas d'inondation. De fait, cela crée un lien fonctionnel entre les deux composants : le pont n'étant pas ou peu affecté par l'inondation, le matériel roulant situé dessus est protégé. Or, dans le cas du risque sismique, la situation est autre : les mouvements de sol dus au tremblement de terre provoquent des mouvements, parfois amplifiés, du pont pouvant entraîner le renversement et donc la défaillance d'un matériel roulant présent. Le lien fonctionnel devient ainsi, dans cette situation, source d'une défaillance par effet domino.

Une fois cette distinction faite entre interdépendance et intradépendance, une **revue des cadres méthodologiques dominants pour évaluer la vulnérabilité basée sur ces dépendances** est réalisée. Il en existe actuellement plusieurs centaines à cet égard¹⁵ (CAGNO *et al.*, 2011). C'est la raison pour laquelle seuls les cadres méthodologiques dominants sont identifiés. Deux conclusions peuvent être tirées de cette étude (GONZVA *et al.*, 2016a) (Figure 8.18) :

- il apparaît une **prépondérance de méthodologies relatives à l'étude des interdépendances par rapport à celles relatives à l'étude des intradépendances**. La réponse interne matérielle et fonctionnelle de composants dépendants d'une infrastructure critique semble donc moins couverte méthodologiquement que la réponse externe entre infrastructures critiques dépendantes, ce qui est regrettable dans la mesure où la continuité de service d'une infrastructure critique dépend du bon fonctionnement de ses propres composants et de ses connexions¹⁶ (TRUCCO *et al.*, 2012) ;
- un **écart important se dégage quant aux aspects intégrés dans les méthodologies analysées**. Plus précisément, que ce soit pour l'analyse des interdépendances ou des intradépendances,

15. "Until now, there are literally hundreds of methods for conducting vulnerability assessments and risk management of critical infrastructures."

16. "The service continuity of a specific infrastructure depends on the correct functioning of its own components and connections"

les dimensions sociale, économique et de gouvernance sont fréquemment couvertes par rapport aux dimensions relatives à l'**environnement**, au **changement climatique** et à l'**aménagement urbain** usuellement négligées. La notion d'aménagement urbain se concentre ici sur la configuration d'implantation en aérien, en surface ou en souterrain d'une infrastructure critique. Or, le travail réalisé dans cette thèse démontre que la configuration d'implantation d'un système de transport guidé peut être un facteur de réduction ou d'amplification du risque ; d'où l'importance de prendre en compte cet aspect dans les méthodologies d'analyse.

Ainsi, les systèmes urbains identifiés comme critiques sont eux aussi affectés par les mêmes enjeux que les systèmes de transport guidé dès lors qu'un risque naturel les atteint : caractérisation des dépendances internes entre composants, identification des mécanismes de défaillances potentielles permises par des effets domino, possibilités de fonctionner en mode dégradé, etc. La démarche globale construite dans cette recherche est donc toute indiquée pour les autres systèmes urbains considérés comme des infrastructures critiques.

8.3.2.2 Mise en pratique d'une démarche similaire

Une fois démontrée le besoin de la démarche globale pour l'analyse des risques touchant les autres types de systèmes urbains, l'interrogation porte sur la possibilité d'une telle **transposition méthodologique** d'un système de transport à un autre système urbain.

Deux raisons d'ordre contextuel étayent la possibilité de transposition. Premièrement, les systèmes urbains présentent pour une majeure partie une architecture du système similaire : un système composé en sous-systèmes, eux-mêmes constitués de composants qui peuvent être à leur tour dissociés en éléments plus fins. Par exemple, le réseau électrique en France peut être distingué en trois sous-systèmes (Figure 8.19) :

- la production : ce sous-système est constitué notamment des barrages hydrauliques, des centrales nucléaires, des éoliennes, des parcs de panneaux photovoltaïques ;
- le transport et la distribution : ce sous-système est composé entre autres des lignes à haute, moyenne et basse tension et les postes sources associés ;
- la consommation : ce sous-système est constitué de l'ensemble des consommateurs d'électricité, des industriels aux particuliers.

Il est aisé de constater que chacun de ces composants peut être dissocié à son tour en éléments plus fins.

Deuxièmement, la plupart des systèmes urbains présentent des **caractéristiques d'implantation différentes** sur l'ensemble de leur infrastructure : éléments positionnés en souterrain (lignes électriques basse tension, câbles de télécommunications, conduites de gaz, dispositifs de collecte pneumatique des déchets, etc.), en surface (postes sources électriques, pylônes de support de lignes électriques, usine de traitement de l'eau, etc.) ou en aérien (lignes électriques haute tension, réservoirs ou châteaux d'eau, etc.). De la même façon que dans le cas d'un système de transport, cette caractéristique est essentielle à intégrer dans les analyses de vulnérabilité et les stratégies d'amélioration de la résilience.

Dès lors, il est possible d'appliquer le modèle d'interdépendances au réseau électrique, pour poursuivre sur cet exemple. Le réseau électrique est, en effet, sujet également à des pannes généralisées

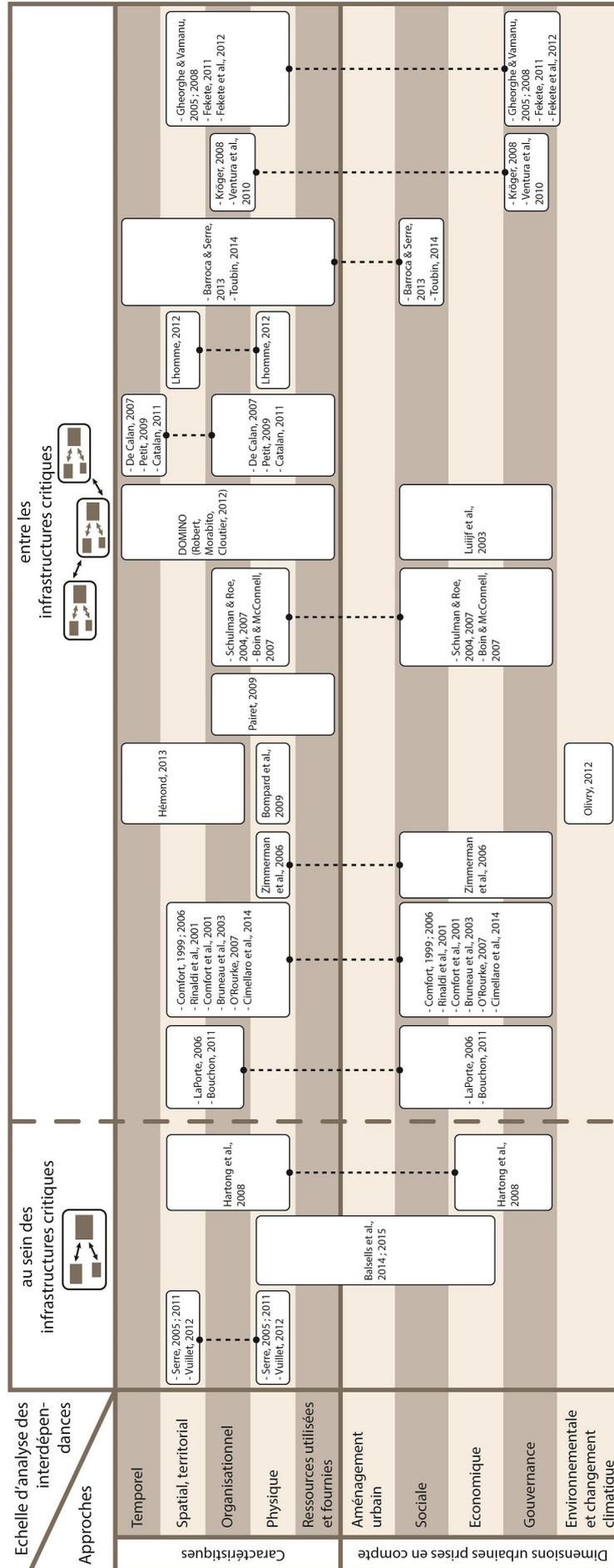


FIGURE 8.18 – Synthèse des cadres méthodologiques et approches dominantes pour l'analyse des interdépendances entre et au sein des infrastructures critiques (GONZVA *et al.*, 2016a)

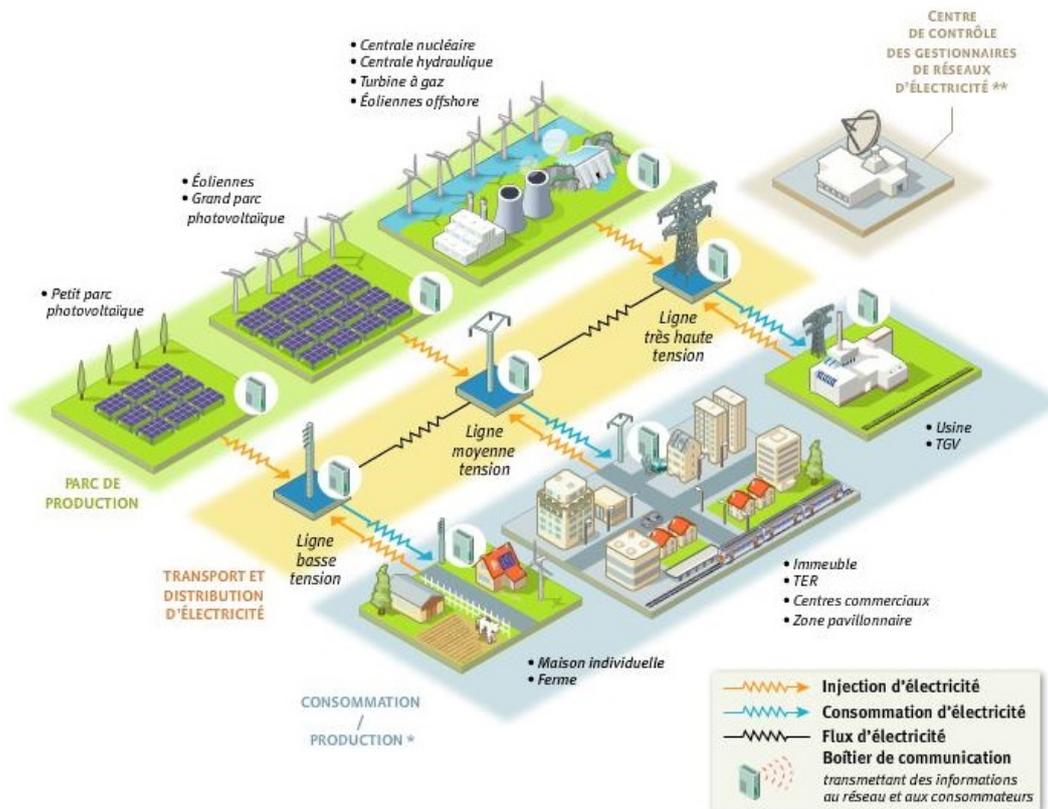


FIGURE 8.19 – Description schématique du réseau électrique en France (source : <http://www.efficacite-electrique.fr>)

survenant à partir de coupures de courant en cascade¹⁷. En réalisant une Analyse Fonctionnelle et une AMDE, puis en utilisant l'algorithme informatisé et les graphes d'événements causaux, il est possible de déterminer l'ensemble des scénarios de défaillances successives induites par des effets domino. L'approche comparative permise par le modèle permet également de tester des configurations différentes d'implantation de certains sous-systèmes (typiquement, l'enfouissement de certaines lignes de transport et de distribution électrique) afin de déterminer de quelle façon ces implantations influencent la vulnérabilité du réseau électrique.

Il est également possible d'appliquer le principe du modèle d'estimation coût-délai. Il suffit, en effet, d'associer à chacun des composants identifiés dans le réseau électrique un coût lié à sa remise en état et un délai lié à sa remise en état lors de l'occurrence d'un risque naturel. De cette façon, il est possible d'en déduire un coût global et un délai global de remise en état pour un scénario donné de défaillances en chaîne d'éléments.

De la même manière, en construisant un réseau bayésien propre au réseau électrique étudié, il est possible d'avoir une approche quantitative : des dépendances entre les éléments, des défaillances en chaîne qu'elles peuvent engendrer et des niveaux de dégradation du service fourni.

En revanche, concernant les stratégies de fonctionnement en mode dégradé du système, les différents systèmes urbains n'appliquent pas toujours les mêmes mesures.

Un des éléments majeurs qui différencient les possibilités de fonctionnement en mode dégradé des systèmes de transport par rapport à d'autres systèmes tels que le réseau routier ou le réseau élec-

17. Voir, par exemple, le projet européen PROFILINGBLACKOUTS (2011-2013) financé au titre du 7ème programme cadre de l'Union européenne pour la recherche et le développement technologique.

trique est celui du **maillage**. Sans être l'unique support à un fonctionnement en mode dégradé, cet élément est en effet considéré comme important pour maintenir le service d'un réseau en offrant des alternatives aux composants infrastructurels principaux lorsqu'ils sont touchés. En France, si le Réseau de Transport d'Électricité (RTE) en ce qui concerne la haute tension électrique est considéré comme bien maillé hormis quelques zones vues comme des « *presqu'îles électriques* » (BACOT *et al.*, 2015, p. 46) et si le réseau routier et autoroutier sont eux aussi fortement maillés (BACOT *et al.*, 2015, p. 23), c'est moins le cas du réseau ferré national. Le coût moyen que représente la construction de ces systèmes suffit à expliquer une telle différence de maillage : le coût pour la construction d'une voie routière est généralement compris entre 2 et 13 millions d'euros (CAZALA *et al.*, 2006), le coût moyen pour une ligne haute tension aérienne est généralement d'environ 1,5 million d'euros et d'environ 14 millions d'euros en souterrain (RTE, 2012) et le coût de construction pour une ligne à grande vitesse en France est généralement compris entre 1 000 et 15 000 millions d'euros selon les projets (LEBOEUF, 2014).

Un second élément important conditionne les possibilités de fonctionnement en mode dégradé d'un système de transport dans le cas d'un aléa : **le bon fonctionnement du réseau électrique**. SNCF Réseau est lié à RTE par une convention de fourniture d'électricité en direct, pour assurer notamment la fourniture de courant aux sous-stations électriques, afin de réduire sa vulnérabilité vis-à-vis du risque de coupure par rapport à une alimentation provenant d'ErDF. En revanche, cette condition de bon fonctionnement du réseau électrique n'est pas similaire à tous les réseaux. Par exemple, le réseau de distribution électrique dépendant du réseau de transport d'électricité permet la continuité de service lorsqu'un poste de distribution est défaillant. Dans ce cas, ce poste peut être remplacé, de façon temporaire, par un groupe électrogène mobile, qu'il faudra prendre soin d'alimenter en carburant ; ErDF dispose à cet effet d'un parc de groupes électrogènes mobilisables en urgence (CEPRI, 2016, p. 67).

Ainsi, les systèmes de transport semblent donc à plusieurs égards être moins favorables à un fonctionnement en mode dégradé. Plus précisément, s'il est clair que les stratégies de fonctionnement en mode dégradé ne s'improvisent jamais, cela est d'autant plus vrai dans le cas des systèmes de transport. Voilà pourquoi l'usage de méthodologies telles que le modèle probabiliste proposé dans cette recherche offre la possibilité de structurer la dégradation de l'exploitation d'un système critique en cas d'occurrence d'un aléa. C'est justement par l'intermédiaire de méthodologies partagées par les systèmes critiques urbains qu'une cohérence peut être globalement apportée à la gestion de crise en milieu urbain.

Synthèse

L'interrogation est posée quant à la portée de la démarche méthodologique élaborée dans cette recherche vis-à-vis d'autres risques et vis-à-vis d'autres systèmes urbains. Concernant la perspective multirisque pour les systèmes de transport guidé, la démarche méthodologique apparaît parfaitement transposable. Elle requiert des ajustements spécifiques au risque étudié mais les étapes de la démarche, les résultats produits et l'articulation entre les trois modèles restent valables. Concernant la perspective multi-système qui consisterait à appliquer la démarche à d'autres infrastructures critiques faisant face à des risques naturels, elle est pertinente à double titre. D'une part, les interdépendances entre éléments ne sont pas propres aux systèmes de transport guidé et existent également au sein des autres systèmes critiques urbains, ce qui peut conduire en situation d'aléa à des défaillances par effet domino. Le modèle d'interdépendances en particulier serait donc ici utile. D'autre part, à une échelle plus large, ces interdépendances existent entre les systèmes urbains critiques. La démarche méthodologique pourrait alors être employée à l'échelle d'un système de systèmes urbains afin d'identifier leurs interdépendances, les coûts et délais de remise en état suite à une inondation et le fonctionnement en mode dégradé qu'il est possible de mettre en œuvre.

8.4 Conclusion du chapitre 8

Le chapitre 8 conclut aux actuelles limites de la démarche méthodologique globale développée dans le cadre de cette recherche portant sur les systèmes de transport guidé soumis au risque inondation. Ces limites sont principalement mentionnées vis-à-vis du modèle d'interdépendances, première étape de la démarche, car il génère les scénarios de défaillances par effet domino qui sont la base de travail pour l'ensemble de l'étude.

L'absence de **caractéristique spatiale** est la première limite mise en avant. S'il permet d'identifier toutes les interdépendances présentes au sein du système qui se traduisent en vecteur d'effet domino lors d'une inondation, le modèle n'offre pas de visualisation spatiale de ces défaillances. Cette fonctionnalité est intéressante car elle pourrait permettre facilement de présenter et discuter des défaillances par effet domino auprès des acteurs concernés. Exploitants et gestionnaires d'infrastructure auraient un support commun autour duquel proposer des stratégies de gestion des risques basées sur la gestion des interdépendances.

L'absence de **caractéristique temporelle** est la deuxième limite mise en évidence. Le modèle identifie les effets domino susceptibles de se produire en indiquant les composants impliqués mais ne précisent pas la dynamique de ces effets domino c'est-à-dire combien de temps y a-t-il entre la défaillance d'un composant et la défaillance successive d'un autre composant. Cette information est importante en vue d'améliorer le modèle d'interdépendances car elle conditionne directement la réponse concrète à apporter afin de stopper les effets domino en envoyant, par exemple, des équipes de maintenance remplacer un composant défaillant avant qu'il n'implique d'autres défaillances en chaîne ou en anticipant l'arrêt de certains composants. Comme la caractéristique spatiale, l'ajout d'une caractéristique temporelle revêt une importance toute particulière à l'égard des exploitants et

des questionnaires d'infrastructure afin de pouvoir formuler des actions relatives à la gestion de crise.

Un autre aspect important que traite ce chapitre est celui de la **portée de la démarche** relativement à **d'autres risques naturels** que le risque inondation et à d'autres systèmes urbains que les systèmes de transport guidé.

Dans le premier cas, la question consiste à savoir si la démarche méthodologique est applicable à d'autres risques naturels que l'inondation : séismes, neige, hautes températures, etc. De fait, cela est possible car la composante multirisque a été définie dans le [chapitre 2](#) (§ 3.1.) comme une exigence à respecter dans la construction de la démarche. Cette exigence provient des deux arguments majeurs suivants : la vulnérabilité avérée des systèmes de transport guidé à plusieurs types d'aléas nécessite une approche multirisque, d'une part, et l'existence d'études internationales développées en parallèle, notamment sur le risque de vents forts ([GAUTIER *et al.*, 2001](#); [SOURGET *et al.*, 2005](#)) ou de séismes ([CIMELLARO et ARCIDIACONO, 2013](#)), avec des approches très ressemblantes appuie l'idée d'une démarche méthodologie unique, d'autre part. Il faut donc déterminer plus précisément quel travail impliquerait l'application de la démarche à d'autres risques que les inondations. En fait, ce chapitre démontre que pour un risque autre que l'inondation, le travail consiste à appliquer les étapes de la démarche sans les modifier. Il faut et il suffit de faire une nouvelle analyse fonctionnelle, une nouvelle AMDE, etc. Le travail est long car de nombreuses étapes ne sont pas automatisées et pourraient d'ailleurs sans doute difficilement l'être. Mais, le cadre méthodologique élaboré pour le risque inondation est identique quel que soit le risque naturel à étudier.

Dans le second cas, il s'agit de déterminer si la démarche méthodologique est utilisable pour analyser les effets matériels et fonctionnels d'un risque naturel sur d'autres systèmes urbains tels que le réseau de distribution électrique ou de distribution en eau potable par exemple. Les exigences fonctionnelles qui ont dirigé la construction de la démarche sont tout à fait déclinables à d'autres infrastructures critiques urbaines car ces dernières présentent des problématiques similaires à la gestion des risques affectant les systèmes de transport guidé : besoin d'analyse multirisque, besoin d'analyse systémique des risques, besoin d'une démarche d'aide à la réflexion à toutes les étapes de vie du système étudié. La possibilité, de plus, de prendre en compte les configurations en souterrain, en surface et en aérien est utile car la plupart des infrastructures critiques urbaines sont elles aussi implantées selon ces trois niveaux. Ainsi, de la même façon que l'analyse des systèmes de transport guidé soumis à d'autres risques naturels, l'analyse d'un système urbain face à un risque naturel consiste à reprendre l'ensemble des étapes de la démarche en appliquant successivement les trois modèles. La démarche est donc potentiellement bien multirisque et multi-système urbain.

Reste un travail important d'**articulation à une échelle supérieure** afin de mettre en cohérence l'ensemble des résultats d'analyse faite une à une pour chaque système urbain. L'objectif est que toutes ces études propres à chaque système urbain et réalisée avec une méthodologie commune soient une source cohérente de connaissances théoriques et pratiques pour une amélioration de la résilience urbaine.



Conclusion générale

Résultats de la recherche menée

La recherche entreprise dans cette thèse postule qu'une caractérisation fine de la vulnérabilité des systèmes urbains est un préalable nécessaire à la mise en place de stratégies opérationnelles de résilience de ces systèmes. Cette idée conduit à la construction d'une démarche méthodologique globale en plusieurs parties. Appliquée d'une part aux systèmes de transport guidé de personnes et d'autre part au risque inondation, la démarche méthodologique se compose dans un premier temps d'une analyse des interdépendances entre éléments du système, susceptibles de générer une diffusion interne du risque par effet domino. Ce modèle d'interdépendances a permis d'identifier l'ensemble des scénarios de défaillances successives susceptibles de survenir dès lors qu'un ou plusieurs éléments du système sont touchés. Ce modèle automatise cette identification et production des scénarios de défaillances matérielles en chaîne et permet d'identifier les comportements potentiels des composants en situation de risque. Un deuxième temps de recherche permet l'élaboration d'un modèle à vocation quantitative concernant ces scénarios de défaillances au sein du système. Une approche coût et délai de remise en état d'un système de transport guidé touché par un risque inondation soutient, en effet, ce modèle. Un troisième modèle vient compléter la démarche méthodologique globale en l'orientant vers une caractérisation de la résilience du système soumis à un risque inondation. C'est l'objet du modèle probabiliste développé qui se base sur l'utilisation des réseaux bayésiens et considère les conséquences fonctionnelles sur le système engendrées par ces défaillances matérielles. Les réseaux bayésiens déterminent l'exploitation possible ou non et d'une manière nominale ou dégradée d'un système de transport endommagé suite à un risque inondation. C'est sur la capacité du système à fonctionner en mode dégradé malgré la perturbation de certains de ses composants (LHOMME, 2012, p. 91) que se fonde la définition de la résilience prise dans ce travail.

D'intéressants développements conceptuels et méthodologiques sous-tendent cette démarche constituée de trois modèles. Premièrement, le modèle d'interdépendances est conçu à partir d'une utilisation successive et complémentaire de méthodes issues de la Sûreté de Fonctionnement. L'ensemble revêt un aspect dynamique et innovant, par rapport à l'usage traditionnellement fait de la Sûreté de Fonctionnement, grâce à une automatisation de l'identification des interdépendances permise par un outil informatique. Deuxièmement, le modèle d'estimation des coûts et délais constitue une synthèse peu courante de la connaissance experte en ce qui concerne la remise en état d'un système de transport guidé touché par un risque inondation. Troisièmement, les réseaux bayésiens démontrent leur pertinence et leur puissance pour caractériser la dégradation de l'exploitation du système lorsqu'il est soumis au risque inondation, et pour prendre en compte la connaissance à la fois normative, expérimentale et experte existante en matière de gestion des risques.

Cette démarche méthodologique globale s'est avérée efficace pour traiter les trois configurations classiques d'implantation d'un système de transport guidé : en souterrain, en surface et en aérien. Dans le cas du risque inondation, cet aspect est déterminant en matière de vulnérabilité du système et d'amélioration de sa résilience. La logique comparative entre les trois configurations est donc une composante centrale de la démarche. La confrontation des résultats d'analyse avec des incidents passés d'inondation sur des lignes ferroviaires a également permis de valider l'apport du travail. La démarche est donc inclusive car elle est valable pour tout système de transport guidé quelle que soit sa configuration d'implantation. Elle est également globale en ce sens qu'elle permet une caractérisation du risque depuis l'occurrence de l'aléa, puis des effets matériels qu'il provoque, puis des conséquences sur l'exploitation du système. Par conséquent, la démarche peut donc apporter une connaissance supplémentaire pour l'aide à la réflexion nécessaire dans l'élaboration des stratégies de conception, d'exploitation et de maintenance des systèmes vis-à-vis du risque inondation.

Limites

La recherche entreprise dans cette thèse fait l'objet de limites de plusieurs ordres.

Premièrement, les systèmes de transport guidé sont considérés comme des systèmes technico-fonctionnels c'est-à-dire à la fois des objets techniques satisfaisant un besoin donné *via* une fonction d'usage, et, des objets soumis à une organisation globale. Examiner la résilience des systèmes de transport guidé sous l'angle technico-fonctionnel est pertinent pour une analyse des risques les affectant dès lors qu'il s'agit de déterminer les dommages matériels et les conséquences fonctionnelles. Néanmoins, les autres dimensions qu'elles soient d'ordre architectural, économique, de gouvernance, etc. en lien avec le fonctionnement des systèmes ne sont pas traitées dans cette recherche par rapport aux dimensions matérielles, structurelles et fonctionnelles. Or, leurs effets sur la vulnérabilité et la résilience des systèmes de transport face au risque inondation ne peuvent être considérés comme négligeables. Dans la mesure où l'amélioration de la résilience est un sujet très vaste qui intersecte de nombreux domaines de compétences (TOUBIN, 2014, p. 68), la recherche présentée dans cette thèse est donc de fait restreinte.

Deuxièmement, les choix méthodologiques faits pour analyser la vulnérabilité des systèmes de transport guidé sont discutables. En particulier, les méthodes issues de la Sûreté de Fonctionnement pour modéliser les défaillances ne sont pas à l'abri de modélisations erronées et incomplètes ; le doute vis-à-vis des résultats obtenus reste présent même pour des analyses approfondies (LAVÉDRINE, 2009). De plus, l'angle d'étude pour la vulnérabilité est celui de l'apparition de défaillances systémiques générées par des effets domino. Bien qu'elles jouent un rôle central, la vulnérabilité d'un système ne peut se réduire uniquement à la compréhension de cette dynamique de défaillance en chaîne. L'âge des éléments qui composent le système, les exigences de rentabilité propres à toute conception et exploitation de système, les ressources humaines disponibles et l'organisation efficace des équipes en cas de situation de crise sont autant d'aspects qui ont une influence certaine sur le degré de vulnérabilité globale. Par ailleurs, si l'exhaustivité de ces scénarios de défaillances successives est garantie par la démarche globale, leur probabilité d'occurrence n'en est pas pour autant déterminée. Le champ des possibles est donc étudié préférentiellement au champ des probables. Enfin, les aspects temporels, en ce qui concerne les perturbations engendrées par un risque inondation, ne sont pas pris en compte dans la démarche ce qui est une limite à cette dernière.

Troisièmement, le choix des réseaux bayésiens pour incorporer à la démarche la notion probabiliste repose sur une multiplicité de données de plusieurs natures. Cet avantage ne vient pas sans un inconvénient majeur : les résultats issus d'une telle diversité de données peuvent conduire à des conclusions inexactes ou tout du moins partielles et valables dans un contexte précis. La base de connaissances constituées de ces données diverses est, de surcroît, assez limitée avec quelques normes existantes, quelques pratiques, et essentiellement la connaissance de quelques experts de SYSTRA. Un indicateur de confiance en ces résultats probabilistes serait, par exemple, un élément intéressant à construire. Dans ce contexte, l'usage des probabilités subjectives serait pertinent. En effet, l'interprétation subjectiviste envisage la probabilité comme la mesure d'un état de connaissance, d'un degré de croyance ou d'un état de confiance. Les probabilités subjectives sont alors utilisées pour estimer l'occurrence d'événements pour lesquels on ne dispose pas de données expérimentales ; cette lacune de données amène alors à consulter des experts pour formaliser leurs avis sous format probabiliste. Coupler des probabilités subjectives à des réseaux bayésiens apparaît, ainsi, comme une perspective méthodologique.

Néanmoins, la recherche entreprise offre à la gestion des risques une démarche méthodologique d'une part unifiée, et d'autre part, commune. Unifiée, car elle démontre que l'analyse et la gestion des risques affectant les systèmes de transport guidé et menées dans le cas de l'aléa de vents traversiers ou bien de l'aléa sismique sont analogues ce qui concourt à l'idée qu'une approche multirisque est faisable. Commune, car l'analyse et la gestion des risques affectant les systèmes urbains peuvent se réaliser par l'intermédiaire d'une démarche similaire pour tous systèmes.

Perspectives

En conclusion, plusieurs perspectives peuvent être soulevées dans le cadre de cette recherche.

Premièrement, les effets déjà observés du changement climatique, par une augmentation de l'intensité et de la fréquence des aléas naturels par rapport aux dernières décennies, laissent présager des défis majeurs pour les gestionnaires et exploitants des systèmes de transport guidé. Les pratiques actuelles liées à la conception, aux travaux de construction, à l'exploitation ou encore les politiques de maintenance sont remises en question par le changement climatique. Cependant, il est essentiel de souligner que les effets actuels et à venir du changement climatique sont pris en compte de façon progressive dans le domaine ferroviaire. Dans la conception de nouveaux systèmes de transport, des facteurs importants de majoration sont par exemple appliqués aux valeurs actuelles afin de dimensionner les futurs systèmes : majoration des débits d'eau, de l'intensité des précipitations, etc. Pour les systèmes existants, des rénovations de grande ampleur sont réalisées pour assurer le fonctionnement des systèmes malgré des scénarios de fort changement climatique : surélévation de voies ferrées, renforcement d'ouvrages, etc. Or, si cette prise en compte du changement climatique est bien réelle, elle demeure hésitante, isolée à certaines régions du monde et surtout sans fondement scientifique clair. La conséquence de ce dernier point est que, en ce qui concerne la conception de lignes nouvelles, il est aujourd'hui extrêmement difficile d'évaluer les impacts économiques de surdimensionnement arbitraire des systèmes visant vraisemblablement à l'amélioration de leur résilience.

Cette idée est d'ailleurs problématique en ce sens qu'elle (re)met en avant la vision ingénieur et sectorielle, pourtant fortement discréditée, selon laquelle la logique de protection structurelle est suffisante à l'amélioration de la résilience de systèmes technico-fonctionnels tels que les systèmes

de transport guidé. Au contraire, la vision qui tend à s'imposer dans la recherche comme dans la pratique est que la technique ne peut constituer à elle seule une politique de gestion des risques. Quelle est, par exemple, l'intérêt de renforcer structurellement une voie ferrée soumise régulièrement à des inondations par ruissellement pluvial si, à une échelle plus large, rien n'est fait au niveau de l'aménagement du territoire pour gérer ce phénomène de ruissellement ? Une approche transverse et territoriale s'avère donc nécessaire pour toute démarche, méthodologique et pratique, ayant pour objectif l'amélioration de la résilience.

Deuxièmement, ce travail de recherche met en avant le rôle du souterrain dans la gestion des risques naturels, en particulier le risque inondation. La contribution de la dimension souterraine, dans la réduction ou l'amplification des conséquences engendrées par les risques naturels et dans l'amélioration de la résilience, mérite d'être approfondie spécifiquement. En ce sens, il est important d'être en mesure de posséder des méthodologies opérationnelles pour, en phase de conception, identifier des préconisations de positionnement en surface ou en souterrain selon le contexte climatique local, et pour, en phase d'exploitation et maintenance, identifier les éléments du système dont la défaillance peut grandement perturber le fonctionnement global afin d'assurer judicieusement leur protection. Ce travail apparaît justement tout à fait pertinent dans le contexte du Projet National Ville 10D-Ville d'idées, qui « *a pour ambition d'améliorer la connaissance sur la ressource sous-sol et de montrer qu'il existe une alternative crédible au seul aménagement de la surface* »¹⁸. Le souterrain peut constituer cette alternative crédible dans un contexte de gestion des risques naturels et d'adaptation, déjà amorcée, face aux effets du changement climatique.

Troisièmement, l'hypothèse de travail majeure qui est faite dans cette recherche consiste à considérer de façon transitoire les systèmes de transport guidé comme un sous-système du système-ville, indépendant des autres sous-systèmes. Une fois l'étude réalisée, il est nécessaire alors de réintroduire ce système dans le système-ville afin d'imbriquer les résultats dans un contexte territorial. Seules les interactions au sein du système de transport guidé ont, en effet, été étudiées dans un contexte de risque inondation ; il est donc important de réintégrer les interactions avec les autres systèmes afin d'avoir une approche globale du système-ville. Cette perspective de travail de reconnexion du système étudié dans son ensemble est symbolisée par la flèche numérotée 3 dans la [Figure 8.20](#)¹⁹. Cette figure, mise précédemment en introduction, propose d'imbriquer le système étudié au sein du système-ville après l'avoir extrait transitoirement le temps de l'analyse de sa résilience.

Cette approche globale de la ville vis-à-vis des risques naturels permet, quatrièmement, de prendre en compte les solutions alternatives aux systèmes de transport guidé qui ont une influence importante sur le degré de résilience urbaine. En effet, l'implantation et la disponibilité de systèmes de transport non guidé tels que les bus, les véhicules individuels, le covoiturage, les deux-roues, etc. sont autant de systèmes de transport susceptibles de compléter l'offre des systèmes de transport guidé en cas de risque naturel tel qu'une inondation. Ces systèmes de transport non guidé sont d'ailleurs, pour la plupart, indépendants du réseau électrique ce qui leur donne un atout important dans des situations de crise durant lesquelles ce réseau peut être amené à dysfonctionner fortement. Ils sont donc

18. <http://www.ville10d.fr>

19. La vision du fonctionnement d'une ville, vue comme un système, est ici représentée de façon simplifiée sur plusieurs aspects. Les interactions nécessaires au bon fonctionnement urbain ne se font pas uniquement entre échelles mais au sein des échelles également ; les dysfonctionnements n'impliquent pas uniquement des perturbations d'une échelle vers une autre échelle mais également au sein d'une même échelle. Dans cette vision simplifiée du fonctionnement et du dysfonctionnement du système-ville sont en fait seulement mises en avant les interactions étudiées dans cette recherche : les rapports qui existent **entre** les échelles, lorsque le système fonctionne en situation normale et lorsqu'il dysfonctionne durant une crise telle qu'une inondation.

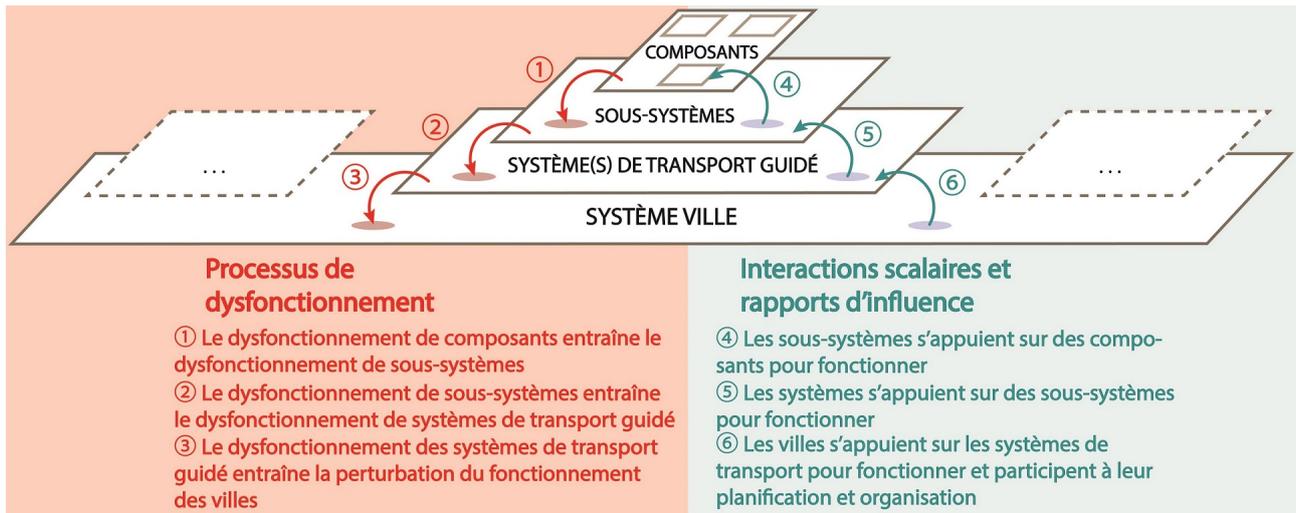


FIGURE 8.20 – Rapports d'influence et de dysfonctionnement entre systèmes et ville (source : auteur)

un facteur important de redondance et d'élasticité du transport à l'échelle de la ville.

Cinquièmement, intégrer l'enjeu social est également une perspective intéressante à ce travail dont l'optique est technico-fonctionnel. Les conséquences sur les usagers en matière de mobilité nécessiteraient, en effet, d'être détaillées précisément à partir d'une connaissance désormais fine de l'endommagement matériel du système de transport face à une inondation et des effets sur l'exploitation. Quel temps de retard un mode dégradé donné d'exploitation va-t-il générer pour les usagers ? Comment intégrer les besoins différents des usagers en situation de crise pour définir quels modes dégradés des systèmes de transport mettre en place ? Cette deuxième interrogation provient du fait qu'en cas d'inondation par exemple, il est probable que certains quartiers d'affaires soient fermés ce qui va réduire considérablement la demande des usagers pour s'y rendre en transport en commun. Dès lors, se pose la question du niveau de maintien de l'exploitation des lignes de transport concernées dans une optique d'adaptation entre demande réelle des usagers et offre possible des systèmes de transport.

Finalement, l'omniprésence des interdépendances, et des effets domino qu'elles supportent au sein des systèmes et parmi ces systèmes, exige une connaissance profonde de celles-ci. C'est, de cette façon, que les systèmes urbains tels que les systèmes de transport guidé pourront participer efficacement à la résilience de la ville.

Liste des figures

1	Rapports entre systèmes et ville	18
2	Plan du mémoire.....	20
1.1	Historique de la résilience	30
1.2	Représentation du risque de flou pratique du concept de résilience suite à la multiplication de modèles, cadres et référentiels de résilience (source : auteur)	36
1.3	Modèle conceptuel « Behind the Barriers » (BARROCA et SERRE, 2013)	39
1.4	Modèle conceptuel de résilience « DS3 » basé sur trois capacités pour étudier la résilience (LHOMME <i>et al.</i> , 2010; LHOMME, 2012, p. 122)	41
1.5	Le triangle de la résilience (BRUNEAU <i>et al.</i> , 2003; TIERNEY et BRUNEAU, 2007)	43
1.6	Les étapes de la résilience dans le modèle élaboré par le National Infrastructure Advisory Council (NIAC, 2010, p. 17)	44
1.7	Cartographie de l'indicateur de résilience construit à partir du modèle BRIC (CUTTER <i>et al.</i> , 2014)	45
1.8	Le PEOPLES Resilience Framework et les échelles géographiques associées (RENSCHLER <i>et al.</i> , 2010)	46
1.9	Le <i>City Resilience Framework</i> composé de quatre catégories et de douze sous-catégories pour une évaluation de la résilience urbaine selon sept qualités (ARUP, 2014)	48
1.10	Liste des caractéristiques de systèmes urbains résilients (DA SILVA <i>et al.</i> , 2012)	49
1.11	L'approche intégrée de gestion du risque inondation proposée dans le cadre du projet <i>FloodResilientCity</i>	50
1.12	Etapes successives de l'approche « identité » pour l'évaluation de la résilience d'un système (GERSONIUS <i>et al.</i> , 2012)	51
1.13	Exemple d'utilisation de la plateforme logicielle HAZUR® pour cartographier les interdépendances existantes entre des services urbains (CHELLERI et FONTANALS, 2014) ..	53
1.14	Cadre d'évaluation de la résilience d'un système construit par la Resilience Alliance (THE RESILIENCE ALLIANCE, 2010)	54
1.15	Les 4 pierres angulaires de la <i>resilience engineering</i> , leurs interactions et influences (source : John Allspaw)	55
1.16	Représentation de l'apport de connaissances nouvelles pour la mise en action du concept de résilience grâce à la multiplicité de modèles, cadres et référentiels de résilience (source : auteur)	58
2.1	Conséquences de l'inondation survenue sur la ligne à grande vitesse Sud-Est en 2000 au niveau de la commune de Sarry	78
2.2	Processus d'endommagement d'un système de transport par un aléa et propagation du risque à une échelle globale (source : auteur)	79
2.3	Conséquences de l'inondation du métro de Prague survenue en 2002	80

2.4	Stations et tunnels inondés du métro de Prague en 2002 (CHAMRA, 2006)	80
2.5	Matrice de vulnérabilité multi-systèmes & multi-aléas (GONZVA <i>et al.</i> , 2014b) <i>Impacts sur l'exploitation des aléas naturels : non significatif (blanc), faible (jaune), moyen (orange) et fort (rouge) ; surf. : système positionné en surface ; sout. : système positionné en souterrain</i>	88
2.6	Conséquences du séisme de Chūetsu au Japon, survenu en 2004, sur la ligne à grande vitesse <i>Shinkansen</i> (GONZVA et GAUTIER, 2016)	89
2.7	Exemples de renversement de train dû au risque de vents forts	90
2.8	Facteurs de résilience	92
2.9	Triptyque de dommages (matériel, structurel, fonctionnel) issus de (GLEYZE, 2005) appliqué à un système de transport guidé (source : auteur)	93
2.10	Décomposition d'un système de transport guidé en sous-systèmes (GONZVA et GAUTIER, 2014)	97
2.11	Cas d'application de la démarche méthodologique dans cette recherche et distinction selon la configuration d'implantation (source : auteur)	98
3.1	Intérêts d'un modèle fonctionnel et d'un modèle dysfonctionnel de système (source : auteur)	109
3.2	Démarche d'analyse de la Sûreté de fonctionnement (NOYES et PÉRÈS, 2007)	110
3.3	Exemple de trame d'AMDE utilisée en Sûreté de Fonctionnement (ZWINGELSTEIN, 2009)	112
3.4	Niveaux de décomposition structurelle et fonctionnelle d'un système urbain (inspiré de (LHOMME, 2012, p. 114)) (source : auteur)	113
3.5	Etat de l'art des applications majeures de l'analyse fonctionnelle issue de la Sûreté de Fonctionnement en génie urbain (source : auteur)	115
3.6	Démarche méthodologique pour caractériser la vulnérabilité des systèmes de transport guidé soumis à un risque inondation (source : auteur)	119
3.7	Bloc-diagramme Fonctionnel d'un système de transport guidé de surface en situation normale (source : auteur)	121
3.8	Bloc-diagramme Fonctionnel d'un système de transport guidé de surface en situation de crise lors d'un aléa inondation (source : auteur)	121
3.9	Bloc-diagrammes Fonctionnels en 3 dimensions des interactions de dépendance de systèmes de transport guidé en aérien, au sol et en souterrain représentés en situation normale (GONZVA <i>et al.</i> , 2014a)	123
3.10	Bloc-diagrammes Fonctionnels en 3 dimensions des interactions de vulnérabilité de systèmes de transport guidé en aérien, au sol et en souterrain représentés en situation de crise (GONZVA <i>et al.</i> , 2014a)	124
3.11	Exemple de scénario de défaillances en conclusion de l'AMDE pour un système de transport guidé de surface soumis à une inondation (représentation inspirée de (LHOMME <i>et al.</i> , 2011)) (source : auteur)	127
3.12	Principe de propagation globale du risque par effet domino au sein de tout le système à partir d'une défaillance initiale (source : auteur)	130
3.13	Propriétés fondamentales du modèle d'identification et de production des scénarios de défaillances par effet domino au sein d'un système de transport guidé faisant face à un risque inondation (source : auteur)	131
3.14	Illustration sur une ligne de transport de quelques composants et de leurs identifiants respectifs (source : auteur)	133

3.15	Extrait de l'import de l'AMDE, réalisée pour la configuration d'implantation en surface, au sein d'une base de données (source : auteur)	135
3.16	Principe de fonctionnement de l'algorithme permettant l'identification des effets domino entre composants lorsque le système subit une inondation (GONZVA <i>et al.</i> , 2016b)	136
3.17	Les courbes (trait plein) représentent les nombres de scénarios expérimentaux obtenus avec l'algorithme et les courbes associées (trait pointillé) représentent les courbes d'ajustement théoriques. Les courbes théoriques dont l'ajustement est le meilleur suivent une croissance exponentielle (fonction puissance) (source : auteur)	137
3.18	Extrait des scénarios de défaillances successives (représentées par un fléchage rouge) pour la configuration d'implantation en souterrain, produits par le modèle automatisé d'interdépendances (source : auteur)	138
3.19	Extrait d'un scénario de défaillances successives de composants représenté sous forme de graphe d'évènement causal (source : auteur)	139
3.20	Principes de détermination automatisée des interdépendances vecteurs de défaillances par effet domino (source : auteur)	140
4.1	Histogrammes descriptifs des longueurs de scénarios de défaillances relatifs à chacune des trois configurations d'implantation (source : auteur)	146
4.2	Histogrammes présentant le positionnement des composants au sein des scénarios de défaillances relatifs à la configuration d'implantation en souterrain (source : auteur) ...	150
4.3	Histogrammes présentant le positionnement « intermédiaire » des composants au sein des scénarios de défaillances relatifs à la configuration d'implantation en souterrain (source : auteur)	153
4.4	Profils théoriques relatifs au comportement des composants lorsque le système fait face à un risque inondation : agressif, diffuseur ou sensible (source : auteur)	155
4.5	Démarche méthodologique de caractérisation de la vulnérabilité d'un système de transport guidé : algorithme d'identification et de production des défaillances par effet domino (GONZVA <i>et al.</i> , 2016e).....	156
4.6	Principe de fonctionnement et visuels du formulaire de recherche de scénarios à partir d'une liste de composants entrés par l'utilisateur (source : auteur)	158
4.7	Graphe causal empirique associé à l'incident survenu à Sarry en 2000 (source : auteur) .	159
4.8	Profils théoriques révisés, grâce aux retours d'expériences, relatifs au comportement des composants lorsque le système fait face à un risque inondation : tendance à un rôle agressif, diffuseur ou sensible (source : auteur)	160
4.9	Le Gave de Pau en situation normale et en situation de crue	162
4.10	Le Gave de Pau en situation normale et en situation de crue	162
4.11	Graphe causal empirique associé à l'inondation du métro de Prague en 2002 selon l'hypothèse d'un composant unique touché initialement (source : auteur)	163
5.1	Principe d'ordonnancement des scénarios de défaillances par effet domino du qualitatif vers le quantitatif par l'ajout d'indicateurs de coûts et de délais de remise en état (source : auteur)	172
5.2	Principe d'estimation du coût total d'un scénario de défaillances successives par effet domino réalisée au sein du modèle d'évaluation coûts-délais (source : auteur)	181
5.3	Principe d'estimation du délai total d'un scénario de défaillances successives par effet domino réalisée au sein du modèle d'évaluation coûts-délais (source : auteur)	182

5.4	Extrait de l'estimation du coût global des scénarios de défaillances exprimé sous forme d'une somme de puissances de 10 puis sous forme d'intervalles, au sein du modèle construit dans une base de données (source : auteur)	183
5.5	Extrait de l'estimation du délai global (scénario d'aléa graduel N°3) des scénarios de défaillances exprimé sous forme d'intervalles, au sein du modèle construit dans une base de données (source : auteur)	184
5.6	Histogrammes descriptifs du nombre de scénarios en fonction des intervalles définis de coût global pour les scénarios d'aléa graduel N°2 et N°3 (source : auteur)	185
5.7	Histogramme présentant la distribution du coût total parmi les cinq catégories définies en fonction de la longueur des scénarios de défaillances relatifs à la configuration d'implantation de surface (source : auteur)	186
5.8	Histogrammes descriptifs du nombre de scénarios en fonction des intervalles définis de coût global pour les scénarios d'aléa graduel N°2 et N°3 relatifs à toutes les configurations d'implantation étudiées (source : auteur)	189
5.9	Histogramme présentant la distribution du délai total , relatif à un scénario d' aléa graduel N°3 , parmi les cinq catégories définies en fonction de la longueur des scénarios de défaillances relatifs à la configuration d'implantation de surface (source : auteur) ...	191
5.10	Aperçu de l'interface permettant l'estimation du coût et du délai de remise en état d'un système de transport guidé implanté en surface soumis à une inondation lente (scénario graduel N°1) (source : auteur)	193
5.11	Aperçu de l'interface permettant l'estimation du coût et du délai de remise en état d'un système de transport guidé implanté en surface soumis à une inondation intermédiaire ou rapide (scénario graduel N°2 et N°3) (source : auteur)	194
5.12	Estimation théorique à partir de la base de données de coûts et de délais de la remise en état relative au métro de Prague suite à son inondation en 2002 (source : auteur)	196
5.13	Tempête Xynthia, en 2010, et conséquences sur les systèmes de transport (source : SNCF)	197
5.14	Estimation théorique à partir de la base de données de coûts et de délais de la remise en état de ligne SNCF La Rochelle-Rochefort suite à la tempête Xynthia en 2010 (source : auteur)	197
5.15	Protection des composants ferroviaires : cas du métro de Copenhague (SØRENSEN, 2015)	199
5.16	Stratégies de cloisonnement de section d'un réseau de transport souterrain : cas du métro de New-York	201
5.17	Comparaison coût/bénéfice entre une situation d'occurrence d'un scénario de défaillances successives par effet domino par rapport à une situation de fiabilisation d'un composant agressif prévenant l'occurrence d'effets domino (source : auteur)	202
5.18	Comparaison coût/bénéfice entre une stratégie de fiabilisation A d'un composant par rapport à une stratégie de fiabilisation B d'un autre composant (source : auteur)	202
5.19	Echelle de criticité du Royaume-Uni pour classer les infrastructures nationales (OFFICE, 2010)	204
6.1	Extrait du référentiel technique SNCF IN 0319 traitant de l'influence du risque inondation sur la stabilité de la voie ferrée (SNCF, 2004). <i>En jaune sont surlignées les restrictions de vitesse de circulation.</i>	215
6.2	Extrait de la revue de littérature relative au risque de forte pluie et réalisée dans le cadre du projet européen EWENT	217

6.4	Exemple d'application d'un réseau bayésien pour l'analyse du risque de dommages aux infrastructures suite à un risque inondation, dans le cadre du projet européen RAIN (HAJIALIZADEH, 2015)	222
6.5	Exemple de réseau bayésien contenant 6 nœuds (source : auteur)	225
6.6	Exemple de Table de Probabilités Conditionnelles (CPT) d'un nœud d'un réseau bayésien possédant deux nœuds parents (source : auteur)	225
6.7	Principes de construction du graphe relatif au modèle quantitatif de caractérisation de l'impact du risque inondation sur un système de transport guidé (GONZVA <i>et al.</i> , 2016e)	226
6.8	Exemple de nœuds propres à l'aléa dans le réseau bayésien relatif au modèle quantitatif de caractérisation de l'impact du risque inondation sur un système de transport guidé (source : auteur)	227
6.9	Exemple du nœud composant « rail » dans le réseau bayésien relatif au modèle quantitatif de caractérisation de l'impact du risque inondation sur un système de transport guidé (source : auteur)	228
6.10	Exemple du nœud « pente longitudinale » dans le réseau bayésien relatif au modèle quantitatif de caractérisation de l'impact du risque inondation sur un système de transport guidé (source : auteur)	229
6.11	Exemple du nœud correspondant à l'exploitation dans le réseau bayésien relatif au modèle quantitatif de caractérisation de l'impact du risque inondation sur un système de transport guidé (source : auteur)	229
6.12	Exemple de la CTP correspondant au nœud exploitation dans le réseau bayésien relatif au modèle quantitatif de caractérisation de l'impact du risque inondation sur un système de transport guidé (source : auteur)	230
6.13	Modèle quantitatif associé à la configuration d'implantation en surface (source : auteur)	231
6.14	Résultats obtenus par le modèle quantitatif en utilisation prévisionnelle pour les trois configurations d'implantation et pour trois distributions de probabilité de hauteur d'eau (source : auteur)	235
6.15	Résultats obtenus par le modèle quantitatif en utilisation pour du diagnostic, pour la configuration d'implantation de surface, et pour une distribution de probabilité de vitesse d'exploitation centrée sur une valeur élevée (source : auteur)	236
6.16	Principes du rapprochement théorique entre SIG et réseaux bayésiens tel qu'opéré par (LUNA <i>et al.</i> , 2015)	240
6.17	Cartographie des niveaux de risque d'ennoiement d'équipements électriques estimés par un réseau bayésien suite à un risque inondation (LUNA <i>et al.</i> , 2015). <i>Les cercles verts, de taille différente, représentent les différentes valeurs des probabilités calculées.</i>	240
7.1	Exemples de défaillances en matière de transport et d'évacuation des populations lors de l'ouragan Katrina aux Etats-Unis en 2005 (LITMAN, 2006)	251
7.2	Projet de ville mobile se servant des voies ferrées et imaginé par les architectes du cabinet de Jägnefält Milton (source : cabinet Jägnefält Milton)	252
7.3	Caractérisation qualitative et quantitative du fonctionnement en mode dégradé d'un système de transport guidé (source : auteur)	252
7.4	Enjeux de l'anticipation d'une perturbation pour le déclenchement du fonctionnement en mode dégradé d'un système (TOUBIN, 2014, p. 167)	253
7.5	Délai d'affectation, délai avant défaillance et délai intrinsèque dans le cas d'un fonctionnement en mode dégradé (EF : Entité Fonctionnelle) (PAIRET, 2009, p. 58)	255

7.6	Quatre dimensions-clés proposées pour caractériser toute stratégie de fonctionnement dégradé et pistes ou d'actions concrètes (source : auteur)	257
7.7	Représentation du modèle de Reason ou « modèle du fromage Suisse » (REASON, 2000)	258
7.8	Démarche méthodologique d'élaboration d'un Plan de Continuité d'Activité (PCA) selon le guide réalisé par le Secrétariat général de la défense et de la sécurité nationale (SGDSN, 2013)	261
7.9	Exercice de montage d'aqua-barrières ou batardeaux réalisé le 29 janvier 2013 (source : RATP)	264
7.10	Organigramme de la Direction Île-de-France de SNCF Réseau (source : SNCF)	266
7.11	Stratégies de protection du RER C en cas de crue de la Seine (source : SNCF)	268
7.12	Technologies mises en place après le passage de l'ouragan Katrina par des volontaires afin de recréer temporairement un système de communication (FORDAHL, 2005)	273
7.13	Comparaison entre la dynamique des mécanismes d'auto-organisation et des mécanismes institutionnels dans le cas du rétablissement du système de télécommunication suite à l'ouragan Katrina (PAVARD <i>et al.</i> , 2009)	274
7.14	Redistribution des modes de transport des personnes avant Sandy et après Sandy (KAUFMAN <i>et al.</i> , 2012, p. 25)	275
7.15	Le concept de résilience décliné selon une échelle temporelle (adaptée de (LHOMME, 2012))	278
8.1	Proposition d'une modèle de gestion territorialisée des risques naturels en milieu urbain centré autour du triptyque aléa naturel–système urbain–information géographique (GONZVA <i>et al.</i> , 2016d)	284
8.2	Première étape de la transposition — détermination des entités (source : auteur)	290
8.3	Deuxième étape de la transposition -- détermination des associations (source : auteur)	290
8.4	Pictogrammes spatiaux 2D et 3D et pictogrammes temporels (BÉDARD et LARRIVÉE, 2008)	291
8.5	Troisième étape de la transposition – détermination des attributs et cardinalités (source : auteur)	292
8.6	Algorithme d'implémentation du modèle de données au sein d'un SIG (source : auteur)	295
8.7	Description matérielle et structurelle du cas d'application virtuel (source : auteur)	295
8.8	Impacts directs de l'aléa hydrologique sur le cas d'application virtuel (source : auteur)	296
8.9	Impacts directs de l'aléa hydrologique sur le cas d'application virtuel (source : auteur)	296
8.10	Application des principes de l'algèbre relationnelle sur le cas d'application virtuel (source : auteur)	297
8.11	Différents axes de développement de RailML (NASH <i>et al.</i> , 2010)	298
8.12	Deux formes de transfert de données permis par RailML (NASH <i>et al.</i> , 2010)	299
8.13	Courbe de conséquences engendrées par des effets domino à partir d'une perturbation initiale sur le réseau d'alimentation en eau (ROBERT et MORABITO, 2008)	302
8.14	DOMINO – prototype d'outil de modélisation et de cartographie des risques (source : site internet du CRP)	303
8.15	Chronologie des événements de la crue d'octobre 1940, dans la vallée du Tech, centrée sur les impacts relatifs au réseau ferré (SAINT-MARC <i>et al.</i> , 2014b)	305
8.16	Résultats d'interviews menées dans le cadre du projet européen RAIN auprès de gestionnaires et exploitants européens d'infrastructures critiques ayant à faire face à des risques naturels (GROENEMEIJER, 2015)	309

8.17	Approche préalable de la vulnérabilité des infrastructures critiques vis-à-vis de plusieurs risques naturels (DURAND, 2013, p. 13)	310
8.18	Synthèse des cadres méthodologiques et approches dominantes pour l'analyse des interdépendances entre et au sein des infrastructures critiques (GONZVA <i>et al.</i> , 2016a).....	313
8.19	Description schématique du réseau électrique en France (source : http://www.efficacite-electrique.fr)	314
8.20	Rapports entre systèmes et ville	323
A.2	Principe de modélisation de l'aléa vents traversiers (SOURGET <i>et al.</i> , 2005)	373
A.3	Exemple de courbes caractéristiques CWC pour différentes vitesses de circulation dans le cas d'un tracé en alignement droit (SOURGET <i>et al.</i> , 2005)	373
A.4	Stratégies de protection face au risque de vents traversiers sur la LGV Méditerranée	375
B.1	BdF aérien, surface, souterrain– situation normale	378
B.2	BdF aérien – situation de crise	379
B.3	BdF surface – situation de crise.....	379
B.4	BdF souterrain – situation de crise.....	380
C.1	Histogramme descriptif des longueurs de scénarios de défaillances relatifs à la configuration d'implantation en aérien	416
C.2	Histogramme descriptif des longueurs de scénarios de défaillances relatifs à la configuration d'implantation en surface	416
C.3	Histogramme descriptif des longueurs de scénarios de défaillances relatifs à la configuration d'implantation en souterrain	417
C.4	Histogramme présentant le positionnement des composants au sein des scénarios de défaillances relatifs à la configuration d'implantation en aérien	418
C.5	Histogramme présentant le positionnement des composants au sein des scénarios de défaillances relatifs à la configuration d'implantation en surface	419
C.6	Histogramme présentant le positionnement des composants au sein des scénarios de défaillances relatifs à la configuration d'implantation en souterrain	420
C.7	Histogramme présentant le positionnement « intermédiaire » des composants au sein des scénarios de défaillances relatifs à la configuration d'implantation en aérien	425
C.8	Histogramme présentant le positionnement « intermédiaire » des composants au sein des scénarios de défaillances relatifs à la configuration d'implantation en surface	426
C.9	Histogramme présentant le positionnement « intermédiaire » des composants au sein des scénarios de défaillances relatifs à la configuration d'implantation en souterrain ..	427
D.1	Histogramme présentant la distribution du coût total en fonction de la longueur des scénarios de défaillances pour la configuration d'implantation en aérien	438
D.2	Histogramme présentant la distribution du coût total en fonction de la longueur des scénarios de défaillances pour la configuration d'implantation en surface	439
D.3	Histogramme présentant la distribution du coût total en fonction de la longueur des scénarios de défaillances pour la configuration d'implantation en souterrain	440
D.4	Histogramme présentant la distribution du délai total relatif à un scénario graduel d' aléa intermédiaire (N°2) en fonction de la longueur des scénarios de défaillances pour la configuration d'implantation en aérien	442

D.5	Histogramme présentant la distribution du délai total relatif à un scénario graduel d' aléa rapide (N°3) en fonction de la longueur des scénarios de défaillances pour la configuration d'implantation en aérien	443
D.6	Histogramme présentant la distribution du délai total relatif à un scénario graduel d' aléa intermédiaire (N°2) en fonction de la longueur des scénarios de défaillances pour la configuration d'implantation en surface	444
D.7	Histogramme présentant la distribution du délai total relatif à un scénario graduel d' aléa rapide (N°3) en fonction de la longueur des scénarios de défaillances pour la configuration d'implantation en surface	445
D.8	Histogramme présentant la distribution du délai total relatif à un scénario graduel d' aléa intermédiaire (N°2) en fonction de la longueur des scénarios de défaillances pour la configuration d'implantation en souterrain	446
D.9	Histogramme présentant la distribution du délai total relatif à un scénario graduel d' aléa rapide (N°3) en fonction de la longueur des scénarios de défaillances pour la configuration d'implantation en souterrain	447
E.1	Résultats obtenus par le modèle quantitatif en utilisation pour du diagnostic pour la configuration d'implantation en aérien et pour une distribution de probabilité de vitesse d'exploitation centrée sur une valeur faible	450
E.2	Résultats obtenus par le modèle quantitatif en utilisation pour du diagnostic pour la configuration d'implantation en aérien et pour une distribution de probabilité de vitesse d'exploitation centrée sur une valeur moyenne	451
E.3	Résultats obtenus par le modèle quantitatif en utilisation pour du diagnostic pour la configuration d'implantation en aérien et pour une distribution de probabilité de vitesse d'exploitation centrée sur une valeur élevée	452
E.4	Résultats obtenus par le modèle quantitatif en utilisation pour du diagnostic pour la configuration d'implantation en surface et pour une distribution de probabilité de vitesse d'exploitation centrée sur une valeur faible	454
E.5	Résultats obtenus par le modèle quantitatif en utilisation pour du diagnostic pour la configuration d'implantation en surface et pour une distribution de probabilité de vitesse d'exploitation centrée sur une valeur moyenne	455
E.6	Résultats obtenus par le modèle quantitatif en utilisation pour du diagnostic pour la configuration d'implantation en surface et pour une distribution de probabilité de vitesse d'exploitation centrée sur une valeur élevée	456
E.7	Résultats obtenus par le modèle quantitatif en utilisation pour du diagnostic pour la configuration d'implantation en souterrain et pour une distribution de probabilité de vitesse d'exploitation centrée sur une valeur faible	458
E.8	Résultats obtenus par le modèle quantitatif en utilisation pour du diagnostic pour la configuration d'implantation en souterrain et pour une distribution de probabilité de vitesse d'exploitation centrée sur une valeur moyenne	459
E.9	Résultats obtenus par le modèle quantitatif en utilisation pour du diagnostic pour la configuration d'implantation en souterrain et pour une distribution de probabilité de vitesse d'exploitation centrée sur une valeur élevée	460

Liste des tableaux

1.1	Problématiques similaires entre résilience et génie urbain	32
1.2	Catégorisation des modèles dominants de résilience	57
2.1	Les transports guidés de personnes, un exemple de système	71
2.2	Les caractéristiques des effets domino s'appliquent aux risques affectant les systèmes de transport guidé	83
2.3	Décomposition structurelle d'un système de transport guidé selon ces trois configurations d'implantation usuelles	99
3.1	Extrait du Tableau d'Analyse Fonctionnelle dans le cas du système de transport guidé aérien	122
3.2	Extrait de l'AMDE pour le composant « ballast » d'un système de transport guidé en surface	126
3.3	Caractéristiques des AMDE réalisées pour les trois configurations d'implantation d'un système de transport guidé soumis à un risque inondation	128
3.4	Identifiant des composants pour déterminer les scénarios de défaillances successives par effet domino au sein d'une base de données	134
3.5	Caractéristiques des libellés uniques de causes et d'effets de défaillances recensés au sein des AMDE réalisées	134
3.6	Nombre de scénarios de défaillances successives avant traitement des données	136
3.7	Nombre de scénarios de défaillances successives après traitement des données	137
4.1	Statistiques descriptives concernant la longueur des scénarios de défaillances successives	145
4.2	Statistiques approfondies concernant le positionnement moyen des composants au sein des scénarios de défaillances successives de la configuration d'implantation en souterrain	151
4.3	Synthèse des résultats obtenus pour les trois analyses statistiques des scénarios de défaillances successives appliquées aux trois configurations d'implantation étudiées	154
4.4	Résultats des recherches faites au sein de l'ensemble des résultats obtenus pour la configuration d'implantation en surface en lien avec l'incident survenu à Sarry en 2000	161
4.5	Résultats des recherches faites au sein de l'ensemble des résultats obtenus pour la configuration d'implantation en souterrain en lien avec l'inondation du métro de Prague en 2002	165
5.1	Scénarios d'aléas graduels pris en compte et leurs conséquences	174
5.2	Hypothèses de coûts et délais relatifs au scénario graduel N°1 pour les trois configurations d'implantation	176

5.3	Coûts de remise en état associés aux composants d'un système de transport guidé en configuration d'implantation de surface pour les scénarios d'aléa graduel N°2 et N°3 ...	178
5.4	Délais de remise en état associés aux composants d'un système de transport guidé en configuration d'implantation de surface pour les scénarios d'aléa graduel N°2 et N°3 ...	180
5.5	Délais de remise en état associés aux composants d'un système de transport guidé en configuration d'implantation de surface pour les scénarios d'aléa graduel N°2 et N°3 ...	181
5.6	Valeurs de coûts globaux de remise en état associés vers une équivalence en intervalles dans le modèle d'évaluation coûts-délais	182
5.7	Synthèse des résultats obtenus pour les trois analyses statistiques des scénarios de défaillances successives relativement au coût total de remise en état, et appliquées aux trois configurations d'implantation étudiées	187
5.8	Synthèse des résultats obtenus pour les trois analyses statistiques des scénarios de défaillances successives relativement au délai total de remise en état et appliquées aux trois configurations d'implantation étudiées	192
6.1	Comparaison des enjeux liés à la modélisation quantitative (probabiliste) du risque inondation par rapport au risque de vents traversiers	213
6.2	Domaine de validité spatiale et temporelle des données d'entrée et de sortie du modèle quantitatif	233
7.1	Synthèse des trois modélisations successives développées dans cette recherche	244
8.1	Transposition entre un modèle de données géographiques relationnel et un modèle fonctionnel (GONZVA <i>et al.</i> , 2016d)	289
8.2	Différences entre l'outil DOMINO et le modèle d'interdépendances de cette recherche amélioré avec la prise en compte de la dimension temporelle	304
8.3	Synthèse des tâches à réaliser pour appliquer de nouveau la démarche méthodologique globale à un risque naturel	308
C.1	Analyse statistique concernant le positionnement moyen des composants au sein des scénarios de défaillances successives de la configuration d'implantation en aérien	421
C.2	Analyse statistique concernant le positionnement moyen des composants au sein des scénarios de défaillances successives de la configuration d'implantation en surface	422
C.3	Analyse statistique concernant le positionnement moyen des composants au sein des scénarios de défaillances successives de la configuration d'implantation en souterrain	423
D.1	Coûts de remise en état associés aux composants d'un système de transport guidé en aérien pour les scénarios d' aléa graduel N°2 et N°3	430
D.2	Coûts de remise en état associés aux composants d'un système de transport guidé en surface pour les scénarios d' aléa graduel N°2 et N°3	431
D.3	Coûts de remise en état associés aux composants d'un système de transport guidé en souterrain pour les scénarios d' aléa graduel N°2 et N°3	432
D.4	Délais de remise en état associés aux composants d'un système de transport guidé en aérien pour les scénarios d' aléa graduel N°2 et N°3	434
D.5	Délais de remise en état associés aux composants d'un système de transport guidé en surface pour les scénarios d' aléa graduel N°2 et N°3	435

D.6	Délais de remise en état associés aux composants d'un système de transport guidé en souterrain pour les scénarios d' aléa graduel N°2 et N°3	436
-----	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----

Bibliographie

- ABDOLHAMIDZADEH, B., T. ABBASI, D. RASHTCHIAN et S. A. ABBASI. 2010, «A new method for assessing domino effect in chemical process industry», *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 182, N° 1-3, doi :10.1016/j.jhazmat.2010.06.049, p. 416–426, ISSN 03043894. (page(s) 85)
- ABO, R. 2011, *Approches formelles pour l'analyse de la performabilité des systèmes communicants mobiles : applications aux réseaux de capteurs sans fil*, Thèse de doctorat en informatique, Conservatoire National des Arts et Métiers. (page(s) 256)
- ADGER, W. N. 2003, «Building resilience to promote sustainability : An agenda for coping with globalisation and promoting justice», *IHDP Update - Newsletter of the International Human Dimensions Programme on Global Environmental Change*, N° February, p. 1–3. (page(s) 71)
- AFNOR. 2012, «Norme ISO 22301 :2012 - Sécurité sociétale - Systèmes de management de la continuité d'activité - Exigences», Rapport, Association française de normalisation. (page(s) 260)
- ALBERTI, M., J. M. MARZLUFF, E. SHULENBERGER, G. BRADLEY, C. RYAN et C. ZUMBRUNNEN. 2003, «Integrating human into ecology : Opportunities and challenges for studying urban ecosystems», *BioScience*, Vol. 53, N° 12, doi :10.1641/0006-3568(2003)053[1169:IHIEOA]2.0.CO;2, p. 1169–1179, ISSN 0006-3568. (page(s) 72)
- ALEKSIC, A., M. STEFANOVIC, S. ARSOVSKI et D. TADIC. 2013, «An assessment of organizational resilience potential in SMEs of the process industry, a fuzzy approach», *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, Vol. 26, N° 6, doi :10.1016/j.jlp.2013.06.004, p. 1238–1245, ISSN 09504230. (page(s) 59)
- ALEXANDER, D. E. 2013, «Resilience and disaster risk reduction : An etymological journey», *Natural Hazards and Earth System Sciences*, Vol. 13, N° 11, doi :10.5194/nhess-13-2707-2013, p. 2707–2716, ISSN 15618633. (page(s) 25, 27, 29, 30)
- ALLAIRE, D. 2012, *Développement d'une approche systémique de la gestion patrimoniale d'un parc immobilier d'envergure nationale pour améliorer sa performance énergétique - Une application réalisée sur le parc immobilier de l'Etat utilisé par le ministère de la défense*, Thèse de doctorat en génie urbain, Université Paris-Est. (page(s) 72, 86, 115)
- ALLEMAND, S. 2009a, *Sous la ville durable le génie urbain*, Modes de Ville, Les Carnets de l'Info, ISBN 978-2916628479, 325 p.. (page(s) 31)
- ALLEMAND, S. 2009b, «Un art : le génie urbain», dans *Sous la ville durable le génie urbain*, chap. 1, Modes de Ville, Les Carnets de l'Info, ISBN 978-2916628479, p. 21–30. (page(s) 31)
- ANSSI. 2010, «Expression des Besoins et Identification des Objectifs de Sécurité - Méthode de gestion

- des risques», Rapport, Agence nationale de la sécurité des systèmes d'information (ANSSI), Paris. (page(s) 113)
- ANTONIONI, G., G. SPADONI et V. COZZANI. 2007, «A methodology for the quantitative risk assessment of major accidents triggered by seismic events», *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 147, N° 1-2, doi :10.1016/j.jhazmat.2006.12.043, p. 48–59, ISSN 03043894. (page(s) 84)
- APOSTOLAKIS, G. E. et D. M. LEMON. 2005, «A screening methodology for the identification and ranking of infrastructure vulnerabilities due to terrorism.», *Risk analysis : an official publication of the Society for Risk Analysis*, Vol. 25, N° 2, doi :10.1111/j.1539-6924.2005.00595.x, p. 361–376, ISSN 0272-4332. (page(s) 84, 311)
- ARNAUD, A. 2015, «Les limites de la cartographie des risques littoraux : des perspectives pour la compréhension de tous», *VertigO - la revue électronique en sciences de l'environnement*, Vol. Hors-série 21, N° Avril, p. 1–27. (page(s) 286)
- ARUP. 2014, «City Resilience Framework», Rapport April, The Rockefeller Foundation, London. URL <http://www.rockefellerfoundation.org/app/uploads/City-Resilience-Framework1.pdf>. (page(s) 46, 47, 48, 57, 325)
- ASCHAN-LEYGONIE, C. 2000, «Vers une analyse de la résilience des systèmes spatiaux», *L'Espace Géographique*, Vol. 29, N° 1, p. 64–77. (page(s) 25, 71)
- ASHLEY, R., J. BLANSKBY, T. MAGUIRE et T. LEAHY. 2010, «Frameworks for Adapting To Flood Risk : Experiences From the EU's Flood Resilient City Project», dans *International Association for Hydro-Environment Engineering and Research (IAHR), First European Congress, 4-6 May*, Edinburgh. (page(s) 49, 50, 57)
- ASHLEY, R., A. PATHIRANA, B. GERSONIUS et C. ZEVENBERGEN. 2012, «Adaptation of flood risk infrastructure to climate resilience», *Proceedings of the ICE - Civil Engineering*, Vol. 165, N° 6, doi : 10.1680/cien.11.00053, p. 40–45, ISSN 0965-089X. (page(s) 34)
- AUBRY, J.-F. et E. CHÂTELET. 2008, «Sûreté de fonctionnement des systèmes de commande - Principes et méthodes», *Techniques de l'ingénieur*, p. 1–19. Réf. : S8262 V1. (page(s) 117, 203)
- AZADEH, A., V. SALEHI, M. ARVAN et M. DOLATKHAH. 2014, «Assessment of resilience engineering factors in high-risk environments by fuzzy cognitive maps : A petrochemical plant», *Safety Science*, Vol. 68, N° October, doi :10.1016/j.ssci.2014.03.004, p. 99–107, ISSN 18791042. (page(s) 59)
- BACH, C., S. BOUCHON, A. FEKETE, J. BIRKMANN et D. SERRE. 2013, «Adding value to critical infrastructure research and disaster risk management : the resilience concept», *S.A.P.I.E.N.S.*, Vol. 6, N° July. (page(s) 27, 75)
- BACOT, M.-A., J.-L. DURVILLE et L. WINTER. 2015, «Les enjeux économiques de la résilience des réseaux», Rapport, Conseil Général de l'Environnement et du Développement Durable (CGEDD). (page(s) 171, 199, 203, 315)
- BAHADUR, A., E. WILKINSON et T. TANNER. 2015, «Measuring Resilience : An Analytical Review (draft under review)», *Climate and Development*, doi :10.13140/RG.2.1.3702.8566, p. 21. (page(s) 38)
- BALSELLS, M. 2015, *Résilience à l'échelle du quartier : pratiques, théories, et opérationnalisations face aux risques d'inondation*, Thèse de doctorat en art de bâtir et urbanisme, Université de Mons - Faculté d'Architecture et d'Urbanisme. (page(s) 34, 94, 204)
- BALSELLS, M., B. BARROCA, Y. DIAB, V. BECUE et D. SERRE. 2013, «Améliorer la résilience urbaine face au risque d'inondation : proposition d'une méthodologie», dans *Colloque futurs urbains, enjeux interdisciplinaires émergents pour comprendre, projeter et fabriquer la ville de demain, 16-18 janvier*, Marne-la-Vallée. (page(s) 34)
- BALSELLS, M., V. BECUE, B. BARROCA et D. SERRE. 2015, «Making urban flood resilience more opera-

- tional : current practice», *Institution of Civil Engineers*, Vol. 168, N° 2, doi :10.1680/wama.14.00051. (page(s) 34)
- BARLES, S. 2015, «L'urbanisme, le génie urbain et l'environnement : une lecture par la technique», *Revue Internationale d'Urbanisme*, , N° 1. (page(s) 116)
- BARROCA, B. 2006, *Risque et vulnérabilités territoriales - Les inondations en milieu urbain*, Thèse de doctorat, Université de Marne-la-Vallée. (page(s) 17, 105)
- BARROCA, B., S. BETHELOT et K. LAFFRECHINE. 2016, «Génie urbain : la réinvention permanente», *Diagonal - Revue des équipes d'urbanisme*, Vol. Novembre, N° 198, p. 21–23. (page(s) 69)
- BARROCA, B., M. DI NARDO et I. MBOUMOUA. 2013, «De la vulnérabilité à la résilience : mutation ou bouleversement?», *EchoGéo*, Vol. 24, doi :10.4000/echogeo.13439. (page(s) 17, 105)
- BARROCA, B. et D. SERRE. 2013, «Behind The Barriers : A Resilience Conceptual Model», *S.A.P.I.EN.S*, Vol. 6, N° April 2014, p. 11. (page(s) 29, 35, 39, 57, 62, 65, 228, 286, 325)
- BARROCA, B., D. SERRE et Y. DIAB. 2012, «Le concept de résilience à l'épreuve du génie urbain», *VertigO*, Vol. 12, N° 2, doi :10.4000/vertigo.12469. (page(s) 27, 30, 33, 34, 35)
- BARROUX, R. 2014, «Infrastructures, mobilités : la SNCF face au réchauffement climatique», *Le Monde*. 18 Avril. (page(s) 14)
- BECERRA, S. 2012, «Vulnérabilité, risques et environnement : l'itinéraire chaotique d'un paradigme sociologique contemporain», *VertigO*, Vol. 12, N° 1, doi :10.4000/vertigo.11988, p. 1–27, ISSN 1492-8442. (page(s) 106)
- BECK, U. 2001, *La société du risque - Sur la voie d'une autre modernité*, aubier Editions, Paris, ISBN 9782700736793, 521 p.. (page(s) 29, 284)
- BÉDARD, Y. et S. LARRIVÉE. 2008, «Modeling with Pictogrammic Languages», dans *Encyclopedia of Geographic Information Sciences*, Édité par S. Shekar et H. Xiong, springer Editions, New-York, p. 716–725. (page(s) 291, 330)
- BENSI, M. T. 2010, *A Bayesian Network Methodology for Infrastructure Seismic Risk Assessment and Decision Support*, Phd in computational science and engineering, University of California, Berkeley. (page(s) 221, 239)
- BENSI, M. T., D. STRAUB et A. DER KIUREGHIAN. 2011, «A Bayesian Network Methodology for Infrastructure Seismic Risk Assessment and Decision Support», Rapport March, Pacific Earthquake Engineering Research Center, College of Engineering, University of California, Berkeley. (page(s) 221)
- BENSLIMANE, S. M., D. BENSLIMANE, M. MALKI, Y. AMGHAR et F. GARGOURI. 2006, «Construction d'une ontologie à partir d'une base de données relationnelle : approche dirigée par l'analyse des formulaires HTML», dans *Actes du XXIVème Congrès INFORSID, 31 mai-4 juin*, Hammamet, Tunisia. (page(s) 300)
- BERAUD, H. 2013, *Initier la résilience du service de gestion des déchets aux catastrophes naturelles - Le cas des territoires urbains et de l'inondation*, Thèse de doctorat en génie urbain, Université Paris-Est. (page(s) 39, 72, 94, 112, 115, 250)
- BERRY, B. J. L. 1964, «Cities as systems within systems of cities», *Papers of the Regional Science Association*, Vol. 13, N° 1, doi :10.1007/s10110-003-0174-y, p. 149–163. (page(s) 17)
- DE BESNARD, B. 2007, «La véritable fracture - Systémique constructiviste & aristotélicienne versus matérialisme (et idéalisme) dialectique cartésien & platonicien», Rapport. URL <http://epistemologie-systemique.blogspot.fr/>. (page(s) 70)
- BEUCHER, S. 2008, *Risque d'inondation et dynamiques territoriales des espaces de renouvellement urbain : les cas de Seine-Amont et de l'Est londonien*, Thèse de doctorat en géographie, Université Nanterre - Paris X. (page(s) 41, 283)

- BEUGIN, J. 2006, *Contribution à l'évaluation de la sécurité des systèmes complexes de transport guidé*, Thèse de doctorat en automatique et informatique des systèmes industriels et humains, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis. (page(s) 91)
- BILLEN, R. 2009, «Les relations "spatiales" entre géomatique et géographie», *Bulletin de la Société Géographique de Liège*, Vol. 52, p. 45–47. (page(s) 300)
- BIRKMANN, J. 2006, *Measuring Vulnerability to Natural Hazards : Towards Disaster Resilient Societies (1st Edition)*, United Nations University Press, New Delhi, India, ISBN 978-92-808-1202-2, 528 p.. (page(s) 106)
- BOIN, A., L. K. COMFORT et C. C. DEMCHAK. 2010, «The Rise of Resilience», dans *Designing Resilience - Preparing for Extreme Events*, Édité par A. Boin, L. K. Comfort et C. C. Demchak, university Editions, chap. 1, ISBN 978-0-8229-6061-4, p. 384. (page(s) 28)
- BORDIN, P. 2006, *Méthode d'observation multi-niveaux pour le suivi de phénomènes géographiques avec un SIG*, Thèse de doctorat en sciences de l'information géographique, Université de Marne-la-Vallée. (page(s) 301)
- BOUCHIBA, A. 2013, *Evaluation de dysfonctionnement d'un système par approche bayésienne : cas du système ferroviaire*, Thèse de doctorat en sciences de l'ingénieur, Institut des Sciences et Techniques de l'Ingénieur d'Angers. (page(s) 221)
- BOUCHON, S. 2006, «The Vulnerability of interdependent Critical Infrastructures Systems : Epistemological and Conceptual State-of-the-Art», Rapport, European Commission - Directorate General Joint Research Centre, Institute for the Protection and Security of the Citizen, Traceability and Vulnerability Assessment Unit, Ispra - Italie. (page(s) 73)
- BOUCHON, S. 2011, *L'identification des infrastructures critiques : réflexion à partir de l'exemple européen*, Thèse de doctorat en géographie, Université Paris Ouest Nanterre La Défense. (page(s) 77, 107)
- BOURGUIGNON, L. 2013, «Mobiliser contre le risque inondation», *Echo des CDEP - Connexions*, , N° Juin, p. 8–10. (page(s) 263)
- BRABHAHARAN, P. 2006, «Recent Advances in Improving the Resilience of Road Networks», dans *Conference of New Zealand Society for Earthquake Engineering (NZSEE), 10-12 March*, Napier, New Zealand. (page(s) 59)
- BRAND, F. S. et K. JAX. 2007, «Focusing the Meaning(s) of Resilience : Resilience as a Descriptive Concept and a Boundary Object», *Ecology and Society*, Vol. 12, N° 1, p. 16. (page(s) 28)
- BRÉMOND, P. 2011, *Caractérisation et évaluation économique de la vulnérabilité des exploitations agricoles aux inondations*, Thèse de doctorat en sciences économiques, Université Montpellier I. (page(s) 171)
- BRODEUR, J., Y. BÉDARD et M.-J. PROULX. 2000, «Modelling geospatial application databases using UML-based repositories aligned with international standards in geomatics», *Proceedings of the eighth ACM international symposium on Advances in geographic information systems - GIS '00*, doi : 10.1145/355274.355280, p. 39–46. (page(s) 291)
- BROOKS, N., E. AURE et M. WHITESIDE. 2014, «Measuring resilience : progress to date and proposed methodology (Presentation)», *Assessing the impact of ICF programmes on household and community resilience to climate variability and climate change*. (page(s) 38)
- BROUWER, R. et R. VAN EK. 2004, «Integrated ecological, economic and social impact assessment of alternative flood control policies in the Netherlands», *Ecological Economics*, Vol. 50, N° 1-2, doi : 10.1016/j.ecolecon.2004.01.020, p. 1–21, ISSN 09218009. (page(s) 171)
- BROWN, O., A. CRAWFORD et A. HAMMILL. 2006, «Natural Disasters and Resource Rights : Building

- resilience, rebuilding lives», Rapport, International Institute for Sustainable Development (IISD) Published, Winnipeg (Manitoba, Canada). (page(s) 106)
- BRUNEAU, M., S. E. CHANG, R. T. EGUCHI, G. C. LEE, T. D. O'ROURKE, A. M. REINHORN, M. SHINOZUKA, K. TIERNEY, W. A. WALLACE et D. VON WINTERFELDT. 2003, «A Framework to Quantitatively Assess and Enhance the Seismic Resilience of Communities», *Earthquake Spectra*, Vol. 19, N° 4, doi :10.1193/1.1623497, p. 733–752, ISSN 8755-2930. (page(s) 41, 42, 43, 46, 57, 325)
- BUCHER, B. et F. LE BER. 2012, «Chapitre 1 – Introduction», dans *Développements logiciels en géomatique : innovations et mutualisation*, lavoisier Editions, chap. 1, Traité IGAT Série Géomatique, Paris, ISBN 9782746274372. (page(s) 283)
- BUXTON, R., S. UMA et A. KING. 2010, «Modelling Interdependences of Critical Infrastructure», dans *Conference of New Zealand Society for Earthquake Engineering (NZSEE), 26-28 March, 24*, Wellington, New Zealand. (page(s) 221)
- CAGNO, E., M. DE AMBROGGI, O. GRANDE et P. TRUCCO. 2011, «Risk analysis of underground infrastructures in urban areas», *Reliability Engineering and System Safety*, Vol. 96, N° 1, doi :10.1016/j.res.2010.07.011, p. 139–148, ISSN 09518320. (page(s) 311)
- CAMPBELL-DOLLAGHAN, K. 2013, «NYC's First Inflatable Tunnel Plug Will Stop Floods, Smoke, and Gas», URL <http://gizmodo.com/nycs-first-inflatable-tunnel-plug-will-stop-floods-sm-1458290295>. (page(s) 200, 201)
- CARDONA, O. D. 2003, «The Need for Rethinking the Concepts of Vulnerability and Risk from a Holistic Perspective : A Necessary Review and Criticism for Effective», dans *Mapping vulnerability : Disasters, development and people*, Vol. Chapter 3, Édité par G. Bankoff, G. Frerks et D. Hilhorst, Earthscan Publishers, ISBN 1853839639, p. 37–51, doi :10.4324/9781849771924. (page(s) 105)
- CARDONA, O. D. 2005, «Indicators of disaster risk and risk management», Rapport, National University of Colombia, Manizales. URL <http://idea.unalmz1.edu.co>. (page(s) 105)
- CARPENTER, S., B. H. WALKER, J. M. ANDERIES et N. ABEL. 2001, «From Metaphor to Measurement : Resilience of What to What ?», *Ecosystems*, Vol. 4, N° 8, doi :10.1007/s10021-001-0045-9, p. 765–781, ISSN 14329840. (page(s) 30, 34)
- CARRI. 2013, «Definitions of Community Resilience : an Analysis», Rapport, Community and Regional Resilience Institute (CARRI), Washington DC. (page(s) 27)
- CAZALA, A., J. DETERNE, G. CRESPIY, P. GARNIER, G. DE MONCHY et P. RIMATTEI. 2006, «Rapport sur la comparaison au niveau européen des coûts de construction, d'entretien et d'exploitation des routes», Rapport, Contrôle général économique et financier & Conseil général des ponts et chaussées. (page(s) 315)
- CCPS. 2000, «Guidelines for Chemical Process Quantitative Analysis, Second Edition», Rapport, Centre for Chemical Process Safety, American Institute of Chemical Engineers, New-York. (page(s) 82)
- CEPRI. 2011a, «Bâtir un plan de continuité d'activité d'un service public», Rapport, Centre Européen de Prévention du Risque d'Inondation, Orléans, France. (page(s) 261, 262)
- CEPRI. 2011b, «L'ACB : une aide à la décision au service de la gestion des inondations. Guide à l'usage des maîtres d'ouvrage et de leurs partenaires», Rapport, Centre Européen de Prévention du Risque d'Inondation. (page(s) 171)
- CEPRI. 2016, «Le territoire et ses réseaux techniques face au risque d'inondation», Rapport, Centre Européen de Prévention du Risque d'Inondation. (page(s) 74, 203, 204, 315)
- CERBAH, F. 2008, «Learning Highly Structured Semantic Repositories from Relational Databases : The

- RDBToOnto Tool», dans *Proceedings of the 5th European Semantic Web Conference (ESWC 2008), 1-5 June, Tenerife, Spain*. (page(s) 300)
- CERTU & CETE. 2007, «Panorama des villes à transports publics guidés (hors Île-de-France)», Rapport. URL <http://www.bv.transports.gouv.qc.ca/mono/0968199.pdf>. (page(s) 13)
- CHAMRA, S. 2006, «Flooding of the Prague metro during the August 2002 floods», dans *10th IAEG (International Association for Engineering Geology and the Environment) International Congress, 6-10 September*, Paper 393, Nottingham, United Kingdom, p. 1–12. (page(s) 78, 80, 163, 195, 326)
- CHANG, S. E. et M. SHINOZUKA. 2004, «Measuring improvements in the disaster resilience of communities», *Earthquake Spectra*, Vol. 20, N° 3, doi :10.1193/1.1775796, p. 739–755, ISSN 87552930. (page(s) 43)
- CHAZELLE, B., J. DEHOTIN et L. LAMBERT. 2014, «An Innovative Runoff Hazard Mapping for Risk Diagnosis and Management on Railway Infrastructure», dans *Second International Conference on Railway Technology, Ajaccio - Corsica, France, 8-11 April*, Édité par C.-C. Press, Stirlingshire, Scotland, p. 1–12. (page(s) 213)
- CHELLERI, L. et L. FONTANALS. 2014, «Exploring the Vulnerability and Resilience of Urban Infrastructures and Services Supply : Evidences From Case», dans *Resilient Cities - Annual Global Forum on Urban Resilience and Adaptation, 29-31 May*, Bonn, Germany, p. 13. (page(s) 53, 57, 325)
- CHEN, S., J. TAN, C. RAY, C. CLARAMUNT et Q. SUN. 2008, «An integrated GIS-based data model for multimodal urban public transportation analysis and management», dans *Geoinformatics 2008 and Joint Conference on GIS and Built Environment : The Built Environment and Its Dynamics*, Vol. 7144, ISSN 0277786X, doi :10.1117/12.812854. (page(s) 291)
- CHEN, Y., J. YU et S. KHAN. 2010, «Spatial sensitivity analysis of multi-criteria weights in GIS-based land suitability evaluation», *Environmental Modelling & Software*, Vol. 25, N° 12, p. 1582–1591. (page(s) 293)
- CILLIERS, P. 2005, «Complexity, Deconstruction and Relativism», *Theory, Culture & Society*, Vol. 22, N° 5, doi :10.1177/0263276405058052, p. 255–267, ISSN 0263-2764. (page(s) 54)
- CIMELLARO, G. P. et V. ARCIDIACONO. 2013, «Resilience-based design for urban cities», dans *Resilience and Urban Risk Management*, Édité par D. Serre, B. Barroca et R. Laganier, crc press Editions, CRC Press, Paris, ISBN 9780415621472, p. 127–141. (page(s) 317)
- CIMELLARO, G. P., A. M. REINHORN et M. BRUNEAU. 2010a, «Framework for analytical quantification of disaster resilience», *Engineering Structures*, Vol. 32, doi :10.1016/j.engstruct.2010.08.008, p. 3639–3649, ISSN 01410296. (page(s) 43)
- CIMELLARO, G. P., A. M. REINHORN et M. BRUNEAU. 2010b, «Seismic resilience of a hospital system», *Structure and Infrastructure Engineering*, Vol. 6, N° 1-2, doi :10.1080/15732470802663847, p. 127–144, ISSN 1573-2479. (page(s) 43)
- CNRS. 2016, «Les fabriques urbaines en questions - Argument de la journée», dans *5ème journée d'étude de la démarche de Prospective nationale de recherche urbaine, 18 mai*, Centre national de la recherche scientifique, Paris. (page(s) 28)
- COCHRAN, I. 2009, «Infrastructures de transport en France : Vulnérabilité au changement climatique et possibilités d'adaptation», Rapport, Caisse des Dépôts, Paris. (page(s) 14, 16)
- CODE DE LA DÉFENSE. 2007, «Article R1332-2 du Code de La Défense», . (page(s) 259)
- COMES, T. et B. VAN DE WALLE. 2014, «Measuring Disaster Resilience : The Impact of Hurricane Sandy on Critical Infrastructure Systems», dans *11th International ISCRAM Conference*, Édité par S. Hiltz, M. Pfaff, L. Plotnick et P. Shih, November 2013, University Park, Pennsylvania, USA, p. 195–204. (page(s) 74)

- COMFORT, L. K. et T. W. HAASE. 2006, «Communication, Coherence, and Collective Action : The Impact of Hurricane Katrina on Communications Infrastructure», *Public Works Management & Policy*, Vol. 10, N° 4, doi :10.1177/1087724X06289052, p. 328–343, ISSN 1087-724X. (page(s) 273)
- COMMISSARIAT GÉNÉRAL AU DÉVELOPPEMENT DURABLE. 2013, «Approche intégrée de la résilience des territoires - Séminaire de travail 5 février 2013», Rapport 82, MEDDE - Commissariat Général au Développement Durable, Paris, doi :10.4267/2042/51490. (page(s) 260)
- COMMISSION EUROPÉENNE. 2007, «Directive 2007/60/CE du 23 octobre 2007 relative à l'évaluation et à la gestion des risques d'inondation», . (page(s) 50, 171)
- COMMISSION EUROPÉENNE. 2011, «Livre blanc - Feuille de route pour un espace européen unique des transports, vers un système de transport compétitif et économe en ressources», Rapport, Commission Européenne, Bruxelles, doi :COM(2011)144final. (page(s) 16)
- COMMISSION EUROPÉENNE. 2012, «Directive 2012/18/UE du Parlement Européen et du Conseil du 4 juillet 2012 concernant la maîtrise des dangers liés aux accidents majeurs impliquant des substances dangereuses», . (page(s) 82)
- COMPTON, K., T. ERMOLIEVA et J. LINNERTHOOTH-BAYER. 2002, «Integrated Flood Risk Management for Urban Infrastructure : Managing the Flood Risk to Vienna's Heavy Rail Mass Rapid Transit System», dans *Second Annual IIASA-DPRI Meeting "Integrated Disaster Risk Management : Megacity Vulnerability and Resilience"*, 29-31 July, Laxenburg, Austria, p. 1–20. (page(s) 125)
- CONSTAS, M. A., T. R. FRANKENBERGER, J. HODDINOTT, J. LUMA et L. RUSSO. 2014, «Resilience Measurement Principles : Toward an Agenda for Measurement Design», Rapport, Food Security Information Network (World Food Programme) - The Technical Series. (page(s) 38)
- COQUILLARD, P. et D. R. C. HILL. 1997, *Modélisation et Simulation d'Ecosystèmes : des modèles déterministes aux simulations à événements discrets*, masson Editions, Recherche en Ecologie, Paris, 273 p.. (page(s) 35, 86)
- COSEA. 2013, «Note méthodologique Hydraulique - Assainissement - Drainage», Rapport, CONstruction SEA Tours-Bordeaux. (page(s) 216)
- COURSAGET, A. 2010, «La sécurité des activités d'importance vitale : premier bilan du SGDSN», *Sécurité et stratégie*, Vol. 4, N° 2, p. 5–17. (page(s) 260)
- COURSAGET, A. et L. HAAS. 2014a, «De la résilience à la continuité d'activité», *Sécurité et stratégie*, Vol. 3, N° 18, p. 1–3. (page(s) 260)
- COURSAGET, A. et L. HAAS. 2014b, «Le plan de continuité d'activité (PCA) : Approche méthodologique», *Sécurité et stratégie*, Vol. 3, N° 18, p. 13–20. (page(s) 261)
- COWI. 2009, «COWI climate change services - Mitigation, adaptation and development (Second edition)», Rapport, Denmark. (page(s) 198)
- COZZANI, V., G. GUBINELLI, G. ANTONIONI, G. SPADONI et S. ZANELLI. 2005, «The assessment of risk caused by domino effect in quantitative area risk analysis», *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 127, N° 1-3, doi :10.1016/j.jhazmat.2005.07.003, p. 14–30, ISSN 03043894. (page(s) 82, 83)
- COZZANI, V. et E. SALZANO. 2004, «Threshold values for domino effects caused by blast wave interaction with process equipment», *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, Vol. 17, N° 6, doi :10.1016/j.jlp.2004.08.003, p. 437–447, ISSN 09504230. (page(s) 82)
- CRABBÉ, A. et H. MEES. 2013, «Flood management in Flanders : from 3 steps to 3 layers», URL <http://www.starflood.eu/column/flood-management-in-flanders-from-3-steps-to-3-layers>. (page(s) 50)
- CRED. 2015, «The Human Cost of Weather-Related Disasters (1995-2015)», Rapport, Centre for Research on the Epidemiology of Disasters (CRED), Belgique. (page(s) 33)

- CRÉTON-CAZANAVE, L. 2010, *Penser l'alerte par les distances. Entre planification et émancipation, l'exemple du processus d'alerte aux crues rapides sur le bassin versant du Vidourle*, Thèse de doctorat en géographie, Université de Grenoble. (page(s) 34)
- CUMMING, G. S. 2011a, *Spatial Resilience in Social-Ecological Systems*, Springer Netherlands, London, 254 p., doi :10.1007/978-94-007-0307-0. (page(s) 27)
- CUMMING, G. S. 2011b, «Spatial resilience : Integrating landscape ecology, resilience, and sustainability», *Landscape Ecology*, Vol. 26, N° 7, doi :10.1007/s10980-011-9623-1, p. 899–909, ISSN 09212973. (page(s) 27)
- CUMMING, G. S. et J. COLLIER. 2005, «Change and identity in complex systems», *Ecology and Society*, Vol. 10, N° 1, doi :29, ISSN 17083087. (page(s) 58)
- CUTTER, S. L. 2006, *Hazards, Vulnerability and Environmental Justice*, Earthscan Risk in Society, Routledge, London, ISBN 978-1844073115, 448 p.. (page(s) 105)
- CUTTER, S. L. 2014, «The Landscape of Resilience Measures», dans *Resilient America Roundtable - Workshop on Measures of Community Resilience, September 5th*, National Academy of Sciences Building - Washington, DC. (page(s) 38, 59)
- CUTTER, S. L., K. D. ASH et C. T. EMRICH. 2014, «The geographies of community disaster resilience», *Global Environmental Change*, Vol. 29, doi :10.1016/j.gloenvcha.2014.08.005, p. 65–77, ISSN 09593780. (page(s) 38, 44, 45, 57, 325)
- CUTTER, S. L., L. BARNES, M. BERRY, C. BURTON, E. EVANS, E. TATE et J. WEBB. 2008, «A place-based model for understanding community resilience to natural disasters», *Global Environmental Change*, Vol. 18, N° 4, doi :10.1016/j.gloenvcha.2008.07.013, p. 598–606, ISSN 09593780. (page(s) 29, 106)
- CUTTER, S. L., J. T. MITCHELL et M. S. SCOTT. 2000, «Revealing the Vulnerability of People and Places : A Case Study of Georgetown County, South Carolina», *Annals of the Association of American Geographers*, Vol. 90, N° 4, doi :10.1111/0004-5608.00219, p. 713–737, ISSN 0004-5608. (page(s) 73)
- DA SILVA, J., S. KERNAGHAN et A. LUQUE. 2012, «A systems approach to meeting the challenges of urban climate change», *International Journal of Urban Sustainable Development*, , N° September 2012, doi :10.1080/19463138.2012.718279, p. 125–145, ISSN 1946-3138. (page(s) 48, 49, 325)
- DALZIELL, E. P. et S. T. MCMANUS. 2004, «Resilience, Vulnerability, and Adaptive Capacity : Implications for System Performance», dans *International Forum for Engineering Decision Making (IFED), December 6-8*, Stoos, Switzerland. (page(s) 212)
- DAUPHINÉ, A. et D. PROVITOLLO. 2007, «La résilience - un concept pour la gestion des risques», *Annales de géographie*, Vol. 2, p. 115–125. (page(s) 27, 33, 34, 106)
- DAVOINE, P.-A., B. MOISUC, J. GENSEL et A. ARNAUD. 2009, «GenGHIS : environnement pour le développement d' applications de géovisualisation à données géo-référencées multidimensionnelles», dans *Festival International de Géographie, 1-4 octobre*, Saint-Dié-des-Vosges. (page(s) 302)
- DCSSI. 2004, «Expression des Besoins et Identification des Objectifs de Sécurité - Mémento», Rapport, Direction Centrale de la Sécurité des Systèmes d'Information - Secrétariat général de la défense nationale, Paris. (page(s) 114)
- DE ROSNAY, J. 1975, *Le microscope, vers une vision globale*, seuil Editions, 295 p.. (page(s) 69, 70)
- DE SAUSSURE, F. 1995, *Cours de linguistique*, payot Editions, 526 p.. (page(s) 70)
- DEBARBIEUX, B. 1998, «Les problématiques de l'image et de la représentation en géographie», dans *Les concepts de la géographie humaine*, Édité par A. Bailly, armand colin Editions, Paris, p. 199–211. (page(s) 61)
- DEDIEU, F. 2009, «Alerte et catastrophe : le cas de la tempête de 1999, un risque scélérat», *Sociologie*

- du Travail*, Vol. 51, N° 3, doi :10.1016/j.soctra.2009.06.001, p. 379–401, ISSN 00380296. (page(s) 280)
- DEHOTIN, J., B. CHAZELLE, L. LAMBERT et P. BREIL. 2014, «Diagnostic de l'impact du ruissellement sur la plateforme ferroviaire avec la méthode IRIP», dans *2ème Symposium International en Géotechnique Ferroviaire - GEORAIL 2014, 6-7 novembre*, Marne-la-Vallée, p. 383–394. (page(s) 239)
- DEKKER, S. 2012, «Complexity, signal detection, and the application of ergonomics : Reflections on a healthcare case study», *Applied Ergonomics*, Vol. 43, N° 3, doi :10.1016/j.apergo.2011.07.003, p. 468–472, ISSN 00036870. (page(s) 54, 73)
- DEKKER, S., E. HOLLNAGEL, D. D. WOODS et R. COOK. 2008, «Resilience Engineering : New directions for measuring and maintaining safety in complex systems», Rapport, Lund University School of Aviation. (page(s) 53, 54, 55, 62, 246)
- DELVOSALLE, C. 1996, «Domino effects phenomena : Definition, Overview and Classification», dans *1st European Seminar on Domino Effects, September*, Leuven, Belgium. (page(s) 81)
- DELVOSALLE, C., C. FIEVEZ et S. BROHEZ. 2002, «A Methodology and a Software (DOMINOXL) for Studying Domino Effects», dans *15th International Congress of Chemical and Process Engineering, 25-29 August*, Praha, Czech Republic. (page(s) 85)
- D'ERCOLE, R. et P. METZGER. 2009, «Vulnérabilité territoriale : une nouvelle approche des risques en milieu urbain», *Cybergeo : European Journal of Geography*, , N° 2209, p. 16. (page(s) 73, 285)
- D'ERCOLE, R., J.-C. THOURET, O. DOLLFUS et J.-P. ASTÉ. 1994, «Les vulnérabilités des sociétés et des espaces urbanisés : concepts, typologie, modes d'analyse», *Revue de géographie alpine*, Vol. 82, N° 4, doi :10.3406/rga.1994.3776, p. 87–96, ISSN 0035-1121. (page(s) 105)
- DHS. 2006, «National Infrastructure Protection Plan», Rapport, U.S. Department of Homeland Security, Washington, D.C. (page(s) 73)
- DIAB, Y. 1992, *Comportement structurel des conduites rigides enterrées*, Thèse de doctorat en génie civil et science de l'habitat, Université Claude Bernard Lyon 1. (page(s) 108)
- DIAB, Y. 2012, «Comment la notion de ville durable peut-elle faire évoluer la gestion des villes dans les pays du Sud?», dans *Villes durables. Une approche opérationnelle pour les villes du Sud*, Actes de la journée annuelle d'Étude AdP – Villes en Développement CNAM, Paris, p. 7–15. (page(s) 32, 61, 116)
- DIAB, Y. et A. SOUCY. 2013, «La résilience de la ville intérieure de Montréal : observation, analyse et pistes d'évolution», dans *Congrès International de l'AFTES 2014, 13-15 octobre*, Lyon, France. (page(s) 32, 61)
- DIREN ILE-DE-FRANCE. 2002, «La crue d'août 2002 à Prague», Rapport, DIREN Ile-de-France, Cachan. (page(s) 195)
- DJAMENT-TRAN, G. 2015, «La résilience, une question d'échelles», dans *Résilience, sociétés et territoires face à l'incertitude, aux risques et aux catastrophes*, iste Editions, chap. 3, Ecologie, p. 61–79. (page(s) 61)
- DJAMENT-TRAN, G., A. LE BLANC, S. LHOMME, S. RUFAT et M. REGHEZZA-ZITT. 2012, «Ce que la résilience n'est pas, ce qu'on veut lui faire dire», . (page(s) 27, 28, 29)
- DJAMENT-TRAN, G. et M. REGHEZZA-ZITT. 2012, *La résilience urbaine. Les villes face aux catastrophes*, le manuscrit Editions, 360 p.. (page(s) 25)
- D'LIMA, M. et F. MEDDA. 2015, «A new measure of resilience : An application to the London Underground», *Transportation Research Part A : Policy and Practice*, Vol. 81, doi :10.1016/j.tra.2015.05.017, p. 35–46, ISSN 09658564. (page(s) 43)
- DOBNEY, K., C. J. BAKER, A. QUINN et L. CHAPMAN. 2009, «Quantifying the effects of high summer temperatures due to climate change on buckling and rail related delays in south-east United King-

- dom», *Meteorological Applications*, Vol. 16, N° 2, doi :10.1002/met, p. 245–251. (page(s) 14)
- DOBNEY, K., C. J. BAKER, A. QUINN et L. CHAPMAN. 2010, «Quantifying the Effects of High Summer Temperatures due to Climate Change on Buckling and Rail Related Delays in the UK», dans *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F : Journal of Rail and Rapid Transit*, April. (page(s) 16)
- DOLL, C. et S. KLUG. 2012, «Impacts of Weather Extremes to Transport : Selecting Efficient Adaption Strategies - Summary Report of the Final Project Conference», Rapport, Report prepared within the research project WEATHER (Weather Extremes : Impacts on Transport Systems and Hazards for European Regions) funded under the 7th framework program of the European Commission, Athens, 23 April. (page(s) 15)
- DONNADIEU, G., D. DURAND, D. NEEL, E. NUNEZ et L. SAINT-PAUL. 2003, «L'Approche systémique : de quoi s'agit-il?», Rapport, Association Française de Science des Systèmes Cybernétiques Cognitifs Et Techniques, Paris. (page(s) 69)
- DOVERS, S. R. et J. W. HANDMER. 1992, «Uncertainty, sustainability and change», *Global Environmental Change*, Vol. 2, N° 4, doi :10.1016/0959-3780(92)90044-8, p. 262–276, ISSN 09593780. (page(s) 26)
- DRUZDZEL, M. J. et F. J. DÍEZ. 2003, «Combining knowledge from different sources in causal probabilistic models», *The Journal of Machine Learning Research*, Vol. 4, doi :10.1162/jmlr.2003.4.3.295, p. 295–316, ISSN 1532-4435. (page(s) 223, 238)
- DUBOIS-MAURY, J. et C. CHALINE. 2004, *Les risques urbains (2ème édition)*, armand colin Editions, Paris, 210 p.. (page(s) 33)
- DUCO, F. 2012, *Méthodologies d'évaluation de la vulnérabilité sismique de bâtiments existants à partir d'une instrumentation in situ*, Thèse de doctorat en génie mécanique, mécanique des matériaux, Université de Toulouse. (page(s) 85)
- DUFFAUT, P. 2010, «L'espace souterrain au service de la ville dense et durable», dans *CIGOS-2010 : Immeubles de grande hauteur et Ouvrages souterrains, 18-19 Novembre*, Paris, France, p. 1–12. (page(s) 147)
- DUFFAUT, P. et M. LABBÉ. 1995, «Les réseaux comme germe d'urbanisme souterrain», *Tunnels et Ouvrages Souterrains*, Vol. 130, p. 255–260. (page(s) 147)
- DUINMEIJER, A. et R. BOUWKNEGT. 2004, «Betrouwbaarheid Railinfrastructuur 2003 (Reliability Rail Infrastructure 2003)», Rapport, ProRail, Utrecht. (page(s) 13)
- DUPUY, G. 1981, «Pour un génie urbain problématique», *Les Annales de la Recherche Urbaine*, Vol. 13, p. 3–21. (page(s) 32)
- DURAND, D. 2013, *La systémique, Que sais-je?*, Presses universitaires de France, Paris, 128 p.. (page(s) 70, 310, 331)
- DURVILLE, J.-L., B. FLURY-HÉRARD, L. RIMOUX et L. WINTER. 2013, «Vulnérabilité des réseaux d'infrastructures aux risques naturels - Rapport du CGEDD», Rapport, Conseil général de l'Environnement et du Développement durable. (page(s) 260, 270)
- EC. 2008, «On the identification and designation of European critical infrastructures and the assessment of the need to improve their protection», URL <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=URISERV:j10013>. (page(s) 73)
- EDDOWES, M., D. WALLER, P. TAYLOR, B. BRIGGS, T. MEADE et I. FERGUSON. 2003, «Safety Implications of Weather, Climate and Climate Change : Final Report (AEAT/RAIR/76148/R03/005)», Rapport, Rail Safety and Standards Board (RSSB), United Kingdom. (page(s) 14)
- EEA. 2014, «Adaptation of transport to climate change in Europe - Challenges and options across

- transport modes and stakeholders», Rapport, European Environment Agency, Luxembourg, doi : 10.2800/56672. (page(s) 198, 276)
- EIVP. 2016, «Site web de l'EIVP - Thématiques de recherches. Thème 1 : résilience urbaine», URL http://www.eivp-paris.fr/index.php/La_recherche/Theme_1:_resilience_urbaine_?idpage=176. (page(s) 115)
- ENEI, R., C. DOLL, S. KLUG, I. PARTZSCH, N. SEDLACEK, N. NESTEROVA, J. KIEL, L. RUDZIKAITE, A. PAPANIKOLAOU et V. MITSAKIS. 2011, «Deliverable 2 : Vulnerability of transport systems. Main report. (project WEATHER)», Rapport, Report prepared within the research project WEATHER (Weather Extremes : Impacts on Transport Systems and Hazards for European Regions) funded under the 7th framework program of the European Commission. (page(s) 15, 306)
- ERRAC & UITP. 2012, «Metro, light rail and tram systems in Europe», Rapport, The European Rail Research Advisory Council & Union Internationale des Transports Publics. (page(s) 62)
- EUSGELD, I., C. NAN et S. DIETZ. 2011, «System-of-systems approach for interdependent critical infrastructures», *Reliability Engineering and System Safety*, Vol. 96, N° 6, doi :10.1016/j.ress.2010.12.010, p. 679–686, ISSN 09518320. (page(s) 113)
- FABER, M. H. 2007, «Assessing and Managing Risks due to Natural Hazards», dans *First International Symposium on Geotechnical Safety and Risk (ISGSR2007)*, 18-19 October, Tongji, China, p. 53–70. (page(s) 223)
- FABIANI, J.-L. et J. THEYS. 1987, *La Société vulnérable - Evaluer et maîtriser les risques*, presses de l'école normale supérieure Editions, Paris, ISBN 2-7288-0132-0, 678 p.. (page(s) 29)
- FAURE, C. 2013, «Deux visages du calcul des probabilités : bayésien et fréquentiste», URL <http://www.christian-faure.net/2013/08/31/deux-visages-du-calcul-des-probabilites-bayesiens-et-frequentistes/>. (page(s) 219, 220)
- FEIZIZADEH, B., P. JANKOWSKI et T. BLASCHKE. 2014, «A GIS based spatially-explicit sensitivity and uncertainty analysis approach for multi-criteria decision analysis», *Computers & Geosciences*, Vol. 64, N° March 2014, p. 81–95. (page(s) 293)
- FEKETE, A. 2011, «Common criteria for the assessment of critical infrastructures», *International Journal of Disaster Risk Science*, Vol. 2, N° 1, doi :10.1007/s13753-011-0002-y, p. 15–24, ISSN 2095-0055. (page(s) 84, 311)
- FEKETE, A., G. HUFSCHMIDT et S. KRUSE. 2014, «Benefits and Challenges of Resilience and Vulnerability for Disaster Risk Management», *International Journal of Disaster Risk Science*, Vol. 5, N° 1, doi :10.1007/s13753-014-0008-3, p. 3–20, ISSN 20950055. (page(s) 29)
- FEKETE, A., K. TZAVELLA, I. ARMAS, J. BINNER, M. GARSCHAGEN, C. GIUPPONI, V. MOJTAHED, M. PETTITA, S. SCHNEIDERBAUER et D. SERRE. 2015, «Critical Data Source ; Tool or Even Infrastructure? Challenges of Geographic Information Systems and Remote Sensing for Disaster Risk Governance», *ISPRS International Journal of Geo-Information*, Vol. 4, N° 4, doi :10.3390/ijgi4041848, p. 1848–1869, ISSN 2220-9964. (page(s) 287)
- FLOODRESILIENCY. 2012, «FloodResilienCity», URL <http://www.floodresiliency.eu/>. (page(s) 50)
- FOLKE, C. 2006, «Resilience : The emergence of a perspective for social-ecological systems analyses», *Global Environmental Change*, Vol. 16, N° 3, doi :10.1016/j.gloenvcha.2006.04.002, p. 253–267, ISSN 09593780. (page(s) 71, 74)
- FOLKE, C., S. CARPENTER, T. ELMQVIST, L. GUNDERSON, C. S. HOLLING, B. H. WALKER, J. BENGTSSON, F. BERKES, J. COLDING, K. DANELL, M. FALKENMARK, L. GORDON, R. KASPERSON, N. KAUTSKY,

- A. KINZIG, S. LEVIN, K.-G. MÄLER, F. MOBERG, L. OHLSSON, P. OLSSON, E. OSTROM, W. REID, J. ROCKSTRÖM, H. SAVENIJE et U. SVEDIN. 2002, «Resilience and Sustainable Development : Building Adaptive Capacity in a World of Transformations», Rapport, The Environmental Advisory Council to the Swedish Government, Stockholm. (page(s) 106, 212)
- FORDAHL, M. 2005, «Post-Katrina landscape turned into wireless lab», URL <http://www.nbcnews.com/id/9591546/>. (page(s) 273, 330)
- FRANCIS, R. et B. BEKERA. 2014, «A metric and frameworks for resilience analysis of engineered and infrastructure systems», *Reliability Engineering and System Safety*, Vol. 121, doi :10.1016/j.res.2013.07.004, p. 90–103, ISSN 09518320. (page(s) 34)
- FRANKENBERGER, T. R., M. A. CONSTAS, S. NELSON et L. STARR. 2014, «Current Approaches To Resilience Programming Among Nongovernmental Organizations», Rapport, International Food Policy Research Institute. (page(s) 38)
- FUND MAURIN, M. 2016, *Méthode pour l'évaluation des couvertures d'infrastructures routières et ferroviaires. Approche par la modélisation fonctionnelle d'un objet technique urbain.*, Thèse de doctorat en génie urbain, Université Paris-Est. (page(s) 96)
- GALLAND, J.-P. 2003, «Calculer, gérer, réduire les risques : des actions disjointes?», *Annales des Ponts et Chaussées*, Vol. 106, p. 37–44. (page(s) 285)
- GALLOPÍN, G. C. 2006, «Linkages between vulnerability, resilience, and adaptive capacity», *Global Environmental Change*, Vol. 16, N° 3, doi :10.1016/j.gloenvcha.2006.02.004, p. 293–303, ISSN 09593780. (page(s) 75, 106)
- GARRIGUES, S. 2015, «Retour d'expérience sur l'ouragan Sandy. Quels enseignements pour la gestion d'une crise majeure en France?», dans *7èmes rencontres Géographes et Assureurs - "Intempéries : Crises et Post-crisis. Quels retours d'expérience?"*, 5 mars, Champs-sur-Marne, p. 142–157. (page(s) 270)
- GAUTIER, C. 2016, «La communication de crise : exemple de la RATP», dans *Résilience, vulnérabilité des territoires et génie urbain*, Édité par B. Landau et Y. Diab, Presses des Ponts, p. 223–231. (page(s) 262, 263)
- GAUTIER, P.-E. 2010, «Problèmes actuels en mécanique dans le domaine ferroviaire : vers l'omniprésence du non-linéaire et du stochastique», *Mécanique & Industries*, Vol. 11, N° Mai 2010, doi : 10.1051/meca/2010060, p. 167–175, ISSN 12962139. (page(s) 109)
- GAUTIER, P.-E., C. SACRÉ, D. DELAUNAY et C. DERSIGNY. 2001, «"TGV Méditerranée" high speed line safety against cross-winds : a slow-down system based on anemometric measurements and spatial short-term meteorological prediction», dans *World Congress on Railway Research, 25-29 November, 1, Cologne, Germany*, p. 1–8. (page(s) 317, 374)
- GEELS, F. W. 2004, «From sectoral systems of innovation to socio-technical systems : Insights about dynamics and change from sociology and institutional theory», *Research Policy*, Vol. 33, N° 6-7, doi :10.1016/j.respol.2004.01.015, p. 897–920, ISSN 00487333. (page(s) 72)
- GERSONIUS, B. 2012, *The resilience approach to climate adaptation applied for flood risk*, Thèse de doctorat, Academic Board of the UNESCO, doi :978-0-415-62485-5. (page(s) 30)
- GERSONIUS, B., R. ASHLEY et C. ZEVENBERGEN. 2012, «The identity approach for assessing socio-technical resilience to climate change : example of flood risk management for the Island of Dordrecht», *Natural Hazards and Earth System Science*, Vol. 12, N° 7, doi :10.5194/nhess-12-2139-2012, p. 2139–2146, ISSN 15618633. (page(s) 30, 50, 51, 57, 71, 325)
- GILBERT, S. W., D. T. BUTRY, J. F. HELGESON et R. E. CHAPMAN. 2015, «Community Resilience Economic Decision Guide for Buildings and Infrastructure Systems», Rapport, National Institute of

- Standards and Technology - U.S. Department of Commerce Penny, Gaithersburg. (page(s) 45)
- GIRAUD, M. 2005, «Sûreté de fonctionnement des systèmes - Principes et définitions», *Techniques de l'ingénieur*, N° Novembre, p. 1–19. Réf. : E3850 V1. (page(s) 110)
- GIRAULT, M. 1964, «Première initiation aux processus de Markov», *Revue de Statistique Appliquée*, Vol. 12, N° 3, p. 5–14, ISSN 0035-175. (page(s) 117)
- GLATRON, S. 1997, *L'évaluation des risques technologiques majeurs en milieu urbain : approche géographique : le cas de la distribution des carburants dans la région Ile-de-France*, Thèse de doctorat, Université Paris 1. (page(s) 285)
- GLEDHILL, J. et I. LINES. 1998, «Development of methods to assess the significance of domino effects from major hazard sites», Rapport, WS Atkins Safety & Reliability for the Health and Safety Executive, United Kingdom. (page(s) 81)
- GLEYZE, J.-F. 2005, *La vulnérabilité des réseaux de transport dans un contexte de risques*, Thèse de doctorat en analyse théorique et épistémologique en géographie, Université Paris VII - Diderot. (page(s) 92, 93, 105, 293, 326)
- GOLDFARB, B. et C. PARDOUX. 2011, *Introduction à la méthode statistique - 6e édition*, Dunod, ISBN 9782100558926, 376 p.. (page(s) 219, 224)
- GOMARASCA, M. A. 2009, *Basics of Geomatics*, Springer Netherlands, ISBN 978-1-402-09014-1, 656 p.. (page(s) 286)
- GONZVA, M., M. BALSELLS et B. BARROCA. 2015, «Mobilisation de l'analyse fonctionnelle pour l'étude de la résilience des quartiers et des systèmes de transport guidé face au risque inondation», *Techniques, Sciences, Méthodes*, N° 7-8, p. 64–75. (page(s) 115, 155)
- GONZVA, M., B. BARROCA et P.-E. GAUTIER. 2014a, «Résilience des systèmes de transport guidé en milieu urbain face à différents risques naturels - Rapport d'avancement 1», Rapport, Projet National Ville 10D-Ville d'idées - Thème "Environnement" - Tranche 1, Paris. (page(s) 123, 124, 326)
- GONZVA, M., B. BARROCA, P.-E. GAUTIER et Y. DIAB. 2016a, «Analysis of disruptions cascade effect within and between urban sociotechnical systems in a context of risks», dans *FLOODrisk 2016 - 3rd European Conference on Flood Risk Management, 17-21 October*, Lyon, France. (page(s) 72, 311, 313, 331)
- GONZVA, M., B. BARROCA, P.-É. GAUTIER et Y. DIAB. 2016b, «Modeling disruptions causing domino effects in urban guided transport systems faced by flood hazards», *Natural Hazards*, doi :10.1007/s11069-016-2680-7, p. 1–19, ISSN 1573-0840. (page(s) 136, 327)
- GONZVA, M., B. BARROCA, P.-E. GAUTIER et Y. DIAB. 2016c, «Resilience of guided transport systems against natural risks», dans *11th World Congress on Railway Research, 29 May-2 June*, Milano, Italy. (page(s) 174, 195)
- GONZVA, M., B. BARROCA, S. LHOMME, P.-E. GAUTIER et Y. DIAB. 2016d, «Apport de la sûreté de fonctionnement à l'analyse spatialisée du risque inondation», *Revue Internationale de Géomatique - Numéro spécial "Innovations Géomatiques pour les Risques Naturels et Technologiques"*, Vol. 26, N° 3 (juillet-septembre), p. 329–361. (page(s) 61, 111, 113, 256, 283, 284, 289, 330, 334)
- GONZVA, M., B. BARROCA, P.-A. ZITT, P.-E. GAUTIER et Y. DIAB. 2016e, «Improving the Resilience of Guided Transport Systems for Natural Risks», dans *The Third International Conference on Railway Technology : Research, Development and Maintenance, 5-8 April*, Édité par J. Pombo, Civil-Comp Press, Stirlingshire, United Kingdom, doi :10.4203/ccp.110.212. (page(s) 156, 223, 226, 327, 329)
- GONZVA, M., Y. DIAB, B. BARROCA et P.-E. GAUTIER. 2014b, «Résilience des systèmes de transport guidé face aux risques naturels», dans *Congrès Lambda-Mu 19 de Maîtrise des Risques et Sûreté de Fonctionnement*, Dijon, France, p. 10. (page(s) 56, 62, 87, 88, 326)

- GONZVA, M. et P.-E. GAUTIER. 2014, «Résilience des systèmes de transport guidé : du risque de vents traversiers vers le risque hydrologique ?», dans *2ème Symposium International en Géotechnique Ferroviaire - GEORAIL 2014, 6-7 novembre*, IFSTTAR, Marne-la-Vallée, France, p. 407–416. (page(s) [97](#), [213](#), [326](#), [371](#))
- GONZVA, M. et P.-E. GAUTIER. 2016, «Natural Risk Study : Report on Earthquake Hazard», Rapport, Union Internationale des Chemins de Fer (UIC) & SYSTRA, Paris, France. (page(s) [89](#), [326](#))
- GONZVA, M., P.-E. GAUTIER, B. BARROCA et Y. DIAB. 2016f, «La résilience des systèmes de transport : des défaillances par effet domino vers des stratégies d'exploitation dégradée», dans *Résilience, vulnérabilité des territoires et génie urbain*, Édité par B. Landau et Y. Diab, Presses des Ponts, ISBN 978-2-85978-504-8, p. 211–222. (page(s) [198](#), [248](#))
- GORDON, G. A. et C. J. SECREST. 2006, «Railroad Security Efforts Post Hurricanes Katrina and Rita», dans *AREMA Annual Technical Conference, September 17-20*, Louisville, Kentucky. (page(s) [249](#), [250](#))
- GORDON, J. E. 1978, *Structures or why things don't fall down*, plenum press Editions, Penguin Books Ltd, Harmondsworth, England, 212 p.. (page(s) [25](#))
- GRALEPOIS, M. 2008, *Les risques collectifs dans les agglomérations françaises - Contours et limites d'une approche territoriale de prévention et de gestion des risques à travers le parcours des agents administratifs locaux*, Thèse de doctorat en aménagement de l'espace et urbanisme, Université Paris-Est. (page(s) [272](#))
- GRIOT, C. 2010, «Modelling and simulation for critical infrastructure interdependency assessment : a meta-review for model characterisation», *International Journal of Critical Infrastructures*, Vol. 6, N° 4, doi :10.1504/IJCIS.2010.037453, p. 363–379, ISSN 1475-3219. (page(s) [112](#))
- GROENEMEIJER, P. 2015, «Hazard Identification in the RAIN project [Presentation PowerPoint]», Rapport, RAIN Workshop on Past Severe Weather Hazards, RAIN Project, 27 February, Berlin. (page(s) [309](#), [330](#))
- GUARNIERI, F. et S. TRAVADEL. 2014, «Fukushima-Daiichi , le temps de l'ingénierie de l'urgence», *Papiers de Recherche du Centre de Recherche sur les Risques et les Crises*, , N° Mai 2014. (page(s) [56](#))
- GUILLERME, A. 2014, «Apports du génie urbain pour la conception et la gestion des infrastructures», dans *Penser la ville et agir par le souterrain*, Édité par B. Barroca, presses des ponts Editions, Paris, ISBN 978-2-85978-461-4, p. 278. (page(s) [31](#))
- HAIMES, Y. Y. 2004, *Risk Modeling, Assessment, and Management*, John Wiley & Sons, Inc., Charlottesville, ISBN 0-471-48048-7, 860 p.. (page(s) [74](#))
- HAJIALIZADEH, D. 2015, «Assessing the impact of extreme weather events for single mode failures», dans *RAIN project - Climate Change and Weather Modelling Workshop, 9th November*, Dublin, Ireland, p. 55. (page(s) [222](#), [329](#))
- HALLEGATTE, S. 2011, «S'adapter au changement climatique en termes de délais plutôt que de coûts», *Avancées*, Vol. 6, N° Novembre, p. 28–30. (page(s) [277](#))
- HANLEY, N. et C. L. SPASH. 1993, *Cost-benefit analysis and the environment*, Edward Elgar Publishing Limited, Cheltenham, UK, ISBN 9264010041, doi :10.1086/426308. (page(s) [171](#))
- HCFDC. 2013, «Retour d'expérience suite à l'ouragan Sandy sur la côte Est des Etats-Unis», Rapport, Haut Comité Français pour la Défense Civile, Paris. (page(s) [200](#), [253](#))
- HEASLIP, K., W. LOUISELL et J. COLLURA. 2009, «A methodology to evaluate transportation resiliency for regional network», dans *88th Transportation Research Board (TRB) Annual Meeting, January 11-15*, Washington DC. (page(s) [59](#))
- HELLSTRÖM, T. 2007, «Critical infrastructure and systemic vulnerability : Towards a planning fra-

- mework», *Safety Science*, Vol. 45, N° 3, doi :10.1016/j.ssci.2006.07.007, p. 415–430, ISSN 09257535. (page(s) 107)
- VAN HERK, S., C. ZEVENBERGEN, J. RIJKE et R. ASHLEY. 2011, «Collaborative research to support transition towards integrating flood risk management in urban development», *Journal of Flood Risk Management*, Vol. 4, N° 4, doi :10.1111/j.1753-318X.2011.01113.x, p. 306–317, ISSN 1753318X. (page(s) 26, 34)
- HERNANDEZ, J. 2010, *ReNew Orleans ? : Résilience urbaine, mobilisation civique et création d'un « capital de reconstruction » à la Nouvelle-Orléans après Katrina*, Thèse de doctorat en géographie, Université Paris X. (page(s) 26, 29)
- HERNANDEZ, J. 2012, «Résiliences contradictoires et résilience toxique dans la Nouvelle-Orléans post-Katrina», dans *Résilience urbaines, les villes face aux catastrophes*, Édité par G. Djament-Tran et M. Reghezza-Zitt, le manuscrit Editions, p. 204–235. (page(s) 29)
- HERNANDEZ-FAJARDO, I. et L. DUEÑAS-OSORIO. 2011, «Sequential propagation of seismic fragility across interdependent lifeline systems», *Earthquake Spectra*, Vol. 27, N° 1, doi :10.1193/1.3544052, p. 23–43, ISSN 87552930. (page(s) 53)
- HEYLIGHEN, F., P. CILLIERS et C. GERSHENSON. 2007, «Complexity and Philosophy», dans *Complexity, Science and Society*, Édité par J. Bogg et R. Geyer, chap. 8, Radcliffe Publishing, Oxford, UK, p. 117–134. (page(s) 55)
- HOLLING, C. S. 1973, «Resilience and Stability of Ecological Systems», *Annual Review of Ecology and Systematics*, Vol. 4, doi :10.1146/annurev.es.04.110173.000245, p. 1–23, ISSN 00664162. (page(s) 26, 71)
- HOLLNAGEL, E. 2011, «Understanding Accidents, or How (Not) to Learn from the Past», Rapport, Odense, Denmark. (page(s) 71)
- HOLLNAGEL, E., J. PARIÈS, D. D. WOODS et J. WREATHALL. 2012, *Resilience Engineering in Practice : A Guidebook*, Ashgate Studies in Resilience Engineering, Ashgate Publishing Limited, ISBN 9781409486534, 362 p.. (page(s) 73)
- HOLLNAGEL, E., D. D. WOODS et N. LEVENSON. 2006, *Resilience Engineering : Concepts and Precepts*, ashgate Editions, Hampshire, England, 397 p.. (page(s) 53, 54, 55, 57, 246)
- HOLSE, D. 2014, «The Metro has been designed for climate change», Ministry of the Environment and Food of Denmark / Danish Agency for Water and Nature Management. (page(s) 199)
- HUGHES, J. et K. HEALY. 2014, «Measuring the resilience of transport infrastructure», Rapport, NZ Transport Agency Research Report 546. (page(s) 58, 59, 71)
- HUSSAIN, M. 2013, «Resilience : meaningless jargon or development solution ?», The Guardian, Tuesday 5 March. (page(s) 28)
- INFRARISK. 2013, «Novel Indicators for identifying critical INFRAstructure at RISK from natural hazards (2013-2016)», Rapport, Funded by the 7th framework program of the European Commission. Coordinated by Roughan & O'donovan Limited Dublin, Ireland. URL www.infrarisk-fp7.eu. (page(s) 309)
- INHESJ. 2015, «Inondation extrême : quelles réponses à l'échelle nationale et européenne ? Rapport du Groupe de diagnostic stratégique n°1. 25e Session nationale "Sécurité et Justice" (2013/2014)», Rapport, Institut National des Hautes Etudes de la Sécurité et de la Justice, Paris. (page(s) 272, 273)
- IRGC. 2006, «Managing and Reducing Social Vulnerabilities from Coupled Critical Infrastructures», Rapport, International Risk Governance Council, Geneva, Switzerland. (page(s) 245)
- JAKOUBEK, M. 2007, «Flood Protection of Prague Metro after the 2002 flood», dans *The 4th Dimension of Metropolises*, Édité par Barták, Hrdina, Romancov et Zlámal, Taylor & Francis Group, London,

- ISBN 9780415408073, p. 1303–1308. (page(s) 80, 195)
- JASSBI, J., L. M. CAMARINHA-MATOS et J. BARATA. 2015, «A Framework for Evaluation of Resilience of Disaster Rescue Networks», dans *Risks and Resilience of Collaborative Networks*, October, Springer, p. 146–158. (page(s) 59)
- JENSEN, F. V. 2001, *Bayesian Networks and Decision Graphs*, springer-verlag Editions, New York, ISBN 0387952594. (page(s) 221, 222)
- JHA, A. K., R. BLOCH et J. LAMOND. 2012, *Cities and Flooding : A Guide to Integrated Urban Flood Risk Management for the 21st Century*, World Bank, Washington DC, ISBN 9780821388662, 638 p., doi :10.1596/978-0-8213-8866-2. (page(s) 95)
- JHA, M. K. et R. A. KEELE. 2012, *Using Dynamic Bayesian Networks for Investigating the Impacts of Extreme Events*, ISBN 978-953-51-0556-5, 114 p.. (page(s) 221, 230)
- JIN, X. S., X. B. XIAO et L. LING. 2012, «Study on the Safety Boundary for High Speed Trains in Severe Environments», dans *1st International Workshop on High-speed and Intercity Railways (IWHIR), July 19-22*, Vol. 1, Hong Kong, China, p. 201–224. (page(s) 90, 372)
- JOHANSSON, J. 2010, *Risk and Vulnerability Analysis of Interdependent Technical Infrastructures Addressing Socio-Technical Systems*, Industrial automation, Lund University. (page(s) 71)
- JOHNSON, C. W., B. KIRWAN et T. LICU. 2009, «The interaction between safety culture and degraded modes : A survey of national infrastructures for air traffic management», *Risk Management*, Vol. 11, N° 3, doi :10.1057/rm.2009.10, p. 241–284, ISSN 1460-3799. (page(s) 246, 247, 257)
- JOHNSON, C. W. et C. SHEA. 2007a, «A Comparison of the Role of Degraded Modes of Operation in the Causes of Accidents in Rail and Air Traffic Management», dans *2nd Institution of Engineering and Technology (IET) Systems Safety Conference, October 22-24*, The IET, London, UK, p. 89–94. (page(s) 257, 258)
- JOHNSON, C. W. et C. SHEA. 2007b, «The Contribution of Degraded Modes of Operation to Accidents in the US, UK and Australian Rail Industries», dans *25th International Systems Safety Conference, August 13-17*, Édité par A. Boyer et N. Gauthier, International Systems Safety Society, Baltimore, Maryland, USA, p. 626–636. (page(s) 247)
- JOHNSON, C. W. et C. SHEA. 2007c, «Understanding the contribution of degraded modes of Operation as a Cause of Incidents and Accidents in Air Traffic management», dans *25th Annual Conference of the International Systems Safety Society (ISSC)*, p. 20. (page(s) 246)
- JOLIVEAU, T. 2004, *Géomatique et gestion environnementale du territoire. Recherche sur un usage géographique des SIG*, Mémoire d'habilitation à diriger des recherches, Université de Rouen. (page(s) 286)
- JØRGENSEN, S. E. 2012, *Integration of Ecosystem Theories : A Pattern*, Ecology & Environment, Springer Netherlands, ISBN 9789401003810, 420 p.. (page(s) 35, 86)
- JOURDAN, J.-L., A. KADDOURI et J. TOURNEBIZE. 2013, «Des trains et du climat», URL <http://www.paristechreview.com/2013/05/02/trains-climat/>. (page(s) 16, 276, 277)
- JOUSSE, G. 2009, *Traite de riscologie : La science du risque*, imestra Editions, ISBN 978-2950988874, 598 p.. (page(s) 26)
- KADDOURI, A. 2014, «Quand le climat déraile!», *Revue Générale des Chemins de Fer*, Vol. Mars, N° 236, p. 37–42. (page(s) 277)
- KADRI, F., B. BIRREGAH et E. CHÂTELET. 2014, «The impact of natural disasters on critical infrastructures : A domino effect-based study», *Journal of Homeland Security and Emergency Management*, Vol. 11, N° 2, doi :10.1515/jhsem-2012-0077, p. 217–241, ISSN 15477355. (page(s) 81, 84)
- KADRI, F. et E. CHÂTELET. 2013, «Domino Effect Analysis and Assessment of Industrial Sites : A Review

- of Methodologies and Software Tools», *International Journal of Computers and Distributed Systems*, N° 2, p. 1–10. (page(s) 85)
- KADRI, F., E. CHÂTELET et B. BIRREGAH. 2011, «Analyse d'Effet Domino : Méthodes et Outils», *Workshop interdisciplinaire sur la sécurité globale*, N° Janvier, p. 1–15. (page(s) 81, 82, 84)
- KADRI, F., E. CHÂTELET et G. CHEN. 2012a, «Quantitative Risk Assessment of Domino Effect Caused by Heat Load», *International Journal of Systems Control*, Vol. 3, p. 42–48. (page(s) 84)
- KADRI, F., P. LALLEMENT et E. CHÂTELET. 2012b, «The Quantitative Risk Assessment of domino effect on Industrial Plants Using Colored Stochastic Petri Nets», dans *11th International Probabilistic Safety Assessment and Management Conference and the Annual European Safety and Reliability Conference 2012, PSAM11 – ESREL 2012, 25-29 June*, Helsinki, Finland. (page(s) 84)
- KANSO, A. 2005, *Evaluation des Modèles de Calcul des Flux Polluants des Rejets Urbains par Temps de Pluie - Apport de l'Approche Bayésienne.*, Thèse de doctorat en sciences et techniques de l'environnement, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées. (page(s) 221)
- KAPLAN, S. 1997, «The Words of Risk Analysis», *Risk Analysis*, Vol. 17, N° 4, p. 407–417. (page(s) 220)
- KAUFMAN, S., C. QING, N. LEVENSON et M. HANSON. 2012, «Transportation During and After Hurricane Sandy», Rapport, Rudin Center for Transportation. (page(s) 274, 275, 330)
- KERBAL, A. 1990, «La genèse du mode dégradé en milieu industriel», *Le Travail Humain*, Vol. 53, N° 4, p. 369–372, ISSN 00411868, 21043663. (page(s) 246)
- KERMISCH, C. 2012, «Vers une définition multidimensionnelle du risque», *Vertigo*, Vol. 12, N° 2, doi : 10.4000/vertigo.12214. (page(s) 220)
- KHAN, F. I. et S. A. ABBASI. 1997, «Risk analysis of a chloralkali industry situated in a populated area using the software package MAXCRED-II», *Process Safety Progress*, Vol. 16, N° 3, doi :10.1002/prs.680160312, p. 172–184, ISSN 1547-5913. (page(s) 85)
- KHAN, F. I. et S. A. ABBASI. 1998, «DOMIFFECT (DOMIno eFFECT) : User-friendly software for domino effect analysis», *Environmental Modelling and Software*, Vol. 13, N° 2, doi :10.1016/S1364-8152(98)00018-8, p. 163–177, ISSN 13648152. (page(s) 85)
- KHAN, F. I. et S. A. ABBASI. 1999, «Major accidents in process industries and an analysis of causes and consequences», *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, Vol. 14, N° 1, doi :10.1016/S0950-4230(00)00016-4, p. 85, ISSN 09504230. (page(s) 82)
- KLEIN, R. J. T., R. J. NICHOLLS et F. THOMALLA. 2004, «Resilience to natural hazards : How useful is this concept?», *Environmental Hazards*, Vol. 5, N° 1-2, doi :10.1016/j.hazards.2004.02.001, p. 35–45, ISSN 14642867. (page(s) 26, 28, 29)
- KOETSE, M. J. et P. RIETVELD. 2009, «The impact of climate change and weather on transport : An overview of empirical findings», *Transportation Research Part D : Transport and Environment*, Vol. 14, N° 3, doi :10.1016/j.trd.2008.12.004, p. 205–221, ISSN 13619209. (page(s) 13, 14)
- KOOP, G. 2003, *Bayesian Econometrics*, John Wiley & Sons, New-York, ISBN 978-0470845677, 376 p.. (page(s) 221)
- KRÖGER, W. 2008, «Critical infrastructures at risk : A need for a new conceptual approach and extended analytical tools», *Reliability Engineering & System Safety*, Vol. 93, N° 12, doi :10.1016/j.res.2008.03.005, p. 1781–1787, ISSN 09518320. (page(s) 73, 74, 91, 113)
- KUNIEDA, M. 1972, «Theoretical Study on the Mechanics of Overturn of Railway Rolling Stock», *Railway Technical Research Report*, Vol. 793, p. 1–15. (page(s) 88, 371)
- KWADIJK, J. C. J., M. HAASNOOT, J. P. M. MULDER, M. M. C. HOOGVLIET, A. B. M. JEUKEN, R. A. A. VAN DER KROGT, N. G. C. VAN OOSTROM, H. A. SCHELFHOUT, E. H. VAN VELZEN, H. VAN WAVEREN et M. J. M. DE WIT. 2010, «Using adaptation tipping points to prepare for climate change and sea

- level rise : a case study in the Netherlands», *Wiley Interdisciplinary Reviews : Climate Change*, Vol. 1, N° 5, doi :10.1002/wcc.64, p. 729–740, ISSN 17577780. (page(s) 51)
- LA PORTE, T. M. 2006, «Organizational Strategies for Complex System Resilience, Reliability and Adaptation», dans *Seeds of Disaster, Roots of Response. How Private Action Can Reduce Public Vulnerability*, Édité par P. E. Auerswald, T. M. La Porte et E. Michel-Kerjan, E., Cambridge University Press, p. 135–153. (page(s) 33, 34, 73)
- LAB'URBA. 2016, «Site internet du Lab'Urba EA 3482», URL <http://www.laburba.fr/axes-et-équipes/>. (page(s) 32)
- LADRIÈRE, J. 2016, «SYSTÈME, épistémologie», URL <http://www.universalis.fr/encyclopedie/systeme-epistemologie/>. (page(s) 69)
- LAGADEC, P. 2009, «Audit des capacités de gestion des crises. Cadrage, Evaluation, Initiatives - Cahier N°2009-19», Rapport, Ecole Polytechnique & Centre National pour la Recherche Scientifique, Palaiseau. (page(s) 258)
- LAIR, J. 2000, *Evaluation de la durabilité des systèmes constructifs du bâtiment*, Thèse de doctorat en sciences et techniques, Université Blaise-Pascal. (page(s) 115)
- LAJOIE, G. 2007, *Recherches en modélisation urbaine*, Mémoire d'habilitation à diriger des recherches, Université de La Réunion. (page(s) 70)
- LAPRIE, J.-C. 2008, «From Dependability to Resilience», dans *38th IEEE/IFIP International Conference On Dependable Systems and Networks*, Anchorage. (page(s) 256)
- LAROUZEE, J., F. GUARNIERI et D. BESNARD. 2014, «Le modèle de l'erreur humaine de James Reason», Research Report CRC_WP_2014_24, MINES ParisTech. (page(s) 257)
- LASNIER, G. 2011, *Sûreté de fonctionnement des équipements et calculs de fiabilité*, lavoisier Editions, 208 p.. (page(s) 117)
- LAVÉDRINE, P. 2009, «Intérêts et limites de la sûreté de fonctionnement», dans *Ières Rencontres Internationales de gouvernance des risques en santé, 15-16 juin*, Toulouse, France, p. 20. (page(s) 320)
- LAWRENCE, W. W. 1976, *Of Acceptable Risk : Science and the Determination of Safety*, William Kaufmann, ISBN 978-0913232309, 180 p.. (page(s) 212)
- LE FEON, S. 2014, *Evaluation environnementale des besoins de mobilité des grandes aires urbaines en France - Approche par Analyse de Cycle de Vie*, Thèse de doctorat en sciences et génie de l'environnement, École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Étienne. (page(s) 16, 69)
- LE LAY, Y.-F. 2016, «Notion à la une : représentation», *Géoconfluences*, , N° 15 Janvier. (page(s) 61)
- LE MOIGNE, J.-L. 1994, *La théorie du système général : théorie de la modélisation*, presses universitaires de france Editions, 358 p.. (page(s) 70)
- LE MOIGNE, J.-L. 1999, *La modélisation des systèmes complexes*, dunod Editions, Sciences Humaines, 178 p.. (page(s) 74)
- LEBOEUF, M. 2014, *Grande vitesse ferroviaire*, le cherche-midi Editions, Paris, ISBN 9782749134536, 832 p.. (page(s) 315)
- LEE, J. Y., J. W. LEE, J. KO et E. S. YOON. 2005, «Optimization for Allocating the Explosive Facilities in Order to Minimize the Domino Effect Using Nonlinear Programming», *Korean Journal of Chemical Engineering*, Vol. 22, N° 5, p. 649–656. (page(s) 85)
- LEES, F. 1980, *Lees' Loss Prevention in the Process Industries, 1st Edition*, Butterworths. (page(s) 81)
- LEES, F. 2012, *Lees' Loss Prevention in the Process Industries : Hazard Identification, Assessment and Control, 4th Edition*, Butterworth-Heinemann, ISBN 978-0123971890, 3776 p.. (page(s) 81)
- LEGROS, D. 2009, *Maitrise des risques dans les systèmes de transport : Proposition d'une nouvelle approche de modélisation dynamique*, Thèse de doctorat en informatique temps réel, robotique et

- automatique. (page(s) 70, 91)
- LEROY, A. et J.-P. SIGNORET. 1992, *Le risque technologique*, Que sais-je?, Presses universitaires de France, Paris, 127 p.. (page(s) 114)
- LEVIÄKANGAS, P., A. TUOMINEN, R. MOLARIUS, H. KOJO, J. SCHABEL, S. TOIVONEN, J. KERÄNEN, J. LUDVIGSEN, A. VAJDA, H. TUOMENVIRTA, I. JUGA, P. NURMI, J. RAUHALA, F. REHM, T. GERZ, T. MUEHLHAUSEN, J. SCHWEIGHOFER, S. MICHAELIDES, M. PAPADAKIS, N. DOTZEK et P. GROENE-MEIJER. 2011, *EWENT project D1. Extreme weather impacts on transport systems*, VTT Technical Research Centre of Finland, Finland, ISBN 9789513875091, 136 p.. URL <http://ewent.vtt.fi/Deliverables/D1/W168.pdf>. (page(s) 216)
- LHOMME, S. 2012, *Les réseaux techniques comme vecteur de propagation des risques en milieu urbain - Une contribution théorique et pratique à l'analyse de la résilience urbaine*, Thèse de doctorat en géographie, Université Paris-Diderot. (page(s) 13, 17, 26, 27, 28, 33, 34, 40, 41, 54, 71, 72, 81, 84, 94, 106, 112, 113, 115, 118, 212, 218, 277, 278, 284, 319, 325, 326, 330)
- LHOMME, S. 2015, «Analyse spatiale de la structure des réseaux techniques dans un contexte de risques», *Cybergeo : European Journal of Geography*, doi :10.4000/cybergeo.26763, p. 14, ISSN 12783366. (page(s) 34)
- LHOMME, S., D. SERRE, Y. DIAB et R. LAGANIER. 2010, «Les réseaux techniques face aux inondations ou comment définir des indicateurs de performance de ces réseaux pour évaluer la résilience urbaine», *Bulletin de l'Association de géographes français*, p. 487–502. (page(s) 17, 27, 29, 33, 40, 41, 57, 259, 325)
- LHOMME, S., D. SERRE, Y. DIAB et R. LAGANIER. 2011, «L'étude des effets dominos de systèmes fortement interdépendants à l'aide de méthodes de Sûreté de Fonctionnement - Application aux réseaux techniques urbains en cas d'inondation», dans *XXIXème Rencontres Universitaires de Génie Civil, 2-31 mai*, Tlemcen, Algérie, p. 60–69. (page(s) 33, 75, 127, 155, 326)
- LHOMME, S., D. SERRE, Y. DIAB et R. LAGANIER. 2013, «Analyzing resilience of urban networks : A preliminary step towards more flood resilient cities», *Natural Hazards and Earth System Science*, Vol. 13, N° 2, doi :10.5194/nhess-13-221-2013, p. 221–230, ISSN 15618633. (page(s) 27)
- LITMAN, T. A. 2006, «Lessons From Katrina and Rita : What Major Disasters Can Teach Transportation Planners», *Journal Of Transportation Engineering*, Vol. 132, N° January, p. 11–18. (page(s) 251, 329)
- LITMAN, T. A. 2016, «Evaluating Accessibility for Transportation Planning - Measuring People's Ability To Reach Desired Goods and Activities», Rapport, Victoria Transport Policy Institute. (page(s) 60, 69)
- LIU, M. 1997, «Introduction générale», dans *Fondements et pratiques de la recherche-action*, l'harmatta Editions, Logiques Sociales, ISBN 2-7384-5780-0, p. 350. (page(s) 35)
- LIVERMAN, D. 1990, «Vulnerability to global environmental change», *Understanding Global Environmental Change : The Contributions of Risk Analysis and Management*, p. 27–44. (page(s) 106)
- LUNA, B. Q., L. GARRE et Y. YANG. 2015, «A Bayesian Network approach for risk assessment to a spatially distributed power infrastructure in a GIS environment», dans *48th ESReDA Seminar on Critical Infrastructures Preparedness : Status of Data for Resilience Modelling, Simulation and Analysis, May 28-29*, Wroclaw, Poland. (page(s) 239, 240, 329)
- MAGNAN, A. 2010, «Questions de recherche autour de l'adaptation au changement climatique», *Natures Sciences Sociétés*, Vol. 18, N° 3, p. 329–333. (page(s) 16, 41)
- MALCZEWSKI, J. 2004, «GIS-based land-use suitability analysis : a critical overview», *Progress in Planning*, Vol. 62, N° 1, p. 3–65. (page(s) 293)
- MANCHE, Y. 2000, *Analyse spatiale et mise en place de systèmes d'information pour l'évaluation de la*

- vulnérabilité des territoires de montagne face aux risques naturels*, Thèse de doctorat en géographie, Université Joseph Fourier - Grenoble I. (page(s) 287)
- MANCHE, Y., M. VILLANOVA-OLIVER, H. MARTIN et R. BURNET. 2002, «Un système d'information dans le domaine des risques naturels : le projet SIRVA», *Revue Internationale de Géomatique*, Vol. 12, N° 1, p. pp. 59–76. (page(s) 287)
- MANYENA, S. B. 2006, «The concept of resilience revisited», *Disasters*, Vol. 30, N° 4, doi :10.1111/j.0361-3666.2006.00331.x, p. 433–450. (page(s) 30, 106)
- MARTINAND, C. 1986, «Le génie urbain - Rapport au ministre de l'équipement, du logement, de l'aménagement du territoire et des transports», Rapport, La Documentation française, Paris. (page(s) 31, 32)
- MATZENBERGER, J., N. HARGREAVES, D. RAHA et P. DIAS. 2015, «A novel approach to assess resilience of energy systems», *International Journal of Disaster Resilience in the Built Environment*, Vol. 6, N° 2, doi :10.1108/IJDRBE-11-2013-0044, p. 168–181, ISSN 1759-5908. (page(s) 106)
- MAZUR, L. et D. FAIRCHILD. 2015, «Is "resilience" the new sustainababble?», Grist.org, January 14th. (page(s) 28)
- MCENTIRE, D. A., C. FULLER, C. W. JOHNSTON et R. WEBER. 2002, «A Comparison of Disaster Paradigms : The Search for a Holistic Policy Guide», *Public Administration Review*, Vol. 62, N° 3, doi : 10.1111/1540-6210.00178, p. 267–281, ISSN 00333352. (page(s) 28)
- MCINERNEY, P. A. 2001, «Special Commission of Inquiry into the Glenbrook Rail Accident - Final Report», Rapport, New South Wales Independent Transport Safety and Reliability Regulator, Sydney, Australia. (page(s) 257)
- MEDDE. 2012, «Première évaluation nationale des risques d'inondation, Principaux résultats – EPRI 2011», Rapport, Ministère de l'Écologie du Développement Durable et de l'Énergie. (page(s) 13, 33, 95, 255)
- MEEROW, S., J. P. NEWELL et M. STULTS. 2016, «Defining urban resilience : A review», *Landscape and Urban Planning*, Vol. 147, N° August, doi :10.1016/j.landurbplan.2015.11.011, p. 38–49, ISSN 01692046. (page(s) 24)
- MEKKI, M. 2015, *Approche probabiliste dans la détermination des courbes de vulnérabilité des structures en génie civil*, Thèse de doctorat en mécanique, Université de Bordeaux. (page(s) 85)
- MERAD, M. 2003, *Apport des méthodes d'aide multicritère à la décision pour l'analyse et la gestion des risques liés aux mouvements de terrains induits par les ouvrages souterrains*, Thèse de doctorat en sciences de gestion, Université Paris-Dauphine. (page(s) 34)
- MERLIN, P. et F. CHOAY. 2015, *Dictionnaire de l'urbanisme et de l'aménagement*, Quadrige Dicos poche, Presses universitaires de France, ISBN 9782130630685, 880 p.. (page(s) 31)
- MESCHINET DE RICHEMOND, N. et M. REGHEZZA. 2010, «La gestion du risque en France : contre ou avec le territoire?», *Annales de Géographie*, Vol. 673, N° 3, doi :10.3917/ag.673.0248, p. 248–267, ISSN 0003-4010. (page(s) 34, 92, 105, 248)
- METZGER, P. et R. D'ERCOLE. 2011, «Les risques en milieu urbain : éléments de réflexion», *EchoGéo*, Vol. 18, N° Décembre, doi :10.4000/echogeo.12640, p. 13. (page(s) 33)
- MICHEL-KERJAN, E. 2003, «Risques catastrophiques et réseaux vitaux : de nouvelles vulnérabilités», *Flux*, Vol. 51, p. 6–15. (page(s) 77, 81, 253)
- MILLER, F., H. OSBAHR, E. BOYD, F. THOMALLA, S. BHARWANI, G. ZIERVOGEL, B. WALKER, J. BIRK-MANN, S. VAN DER LEEUW, J. ROCKSTRÖM, J. HINKEL, T. DOWNING, C. FOLKE et D. NELSON. 2010, «Resilience and Vulnerability : Complementary or Conflicting Concepts?», *Ecological Economics*, Vol. 15, N° 3. (page(s) 24)

- MITCHELL, T., M. VAN AALST et P. S. VILLANUEVA. 2010, «Assessing Progress on Integrating Disaster Risk Reduction and Climate Change Adaptation in Development Processes», Rapport, Strengthening Climate Resilience, Brighton, UK. (page(s) 28)
- MOATTY, A. 2015, *Pour une Géographie des Reconstructions post-catastrophe : Risques, Sociétés et Territoires*, Thèse de doctorat en géographie et aménagement de l'espace, Montpellier - Paul Valéry. (page(s) 29, 261, 269, 271)
- MORGAN, M. et M. HENRION. 1990, *Uncertainty, a guide to dealing with uncertainty in quantitative risk and policy analysis*, cambridge Editions. (page(s) 238)
- MORIN, E. 1977, *La méthode, Tome 1 : la nature de la nature*, le seuil Editions, Points. (page(s) 70)
- MORTUREUX, Y. 2001, «La sûreté de fonctionnement : méthodes pour maîtriser les risques», *Techniques de l'Ingénieur*, Vol. 33, N° 0, p. 17. (page(s) 110, 307)
- MUCCHIELLI, A. 1991, *Les méthodes qualitatives*, Que sais-je? N°2591, Presses universitaires de France, Paris. (page(s) 218)
- MÜHLHAUSEN, T., M. KREUZ, J. BLÄSCHE, J. SCHWEIGHOFER, P. LEVIÄKANGAS, R. MOLARIUS, S. ATHANASATOS, N. SIEDL et T. REICHER. 2010, «EWENT project D3.4. Consequences of extreme weather», Rapport, Finland. URL <http://ewent.vtt.fi/Deliverables>. (page(s) 14, 216)
- MULLER-MAHN, D. 2012, *The Spatial Dimension of Risk : How Geography Shapes the Emergence of Riskscapes*, Earthscan risk in society series, New York, ISBN 9781849710855. (page(s) 283)
- MUÑIZ, I. et A. GALINDO. 2005, «Urban form and the ecological footprint of commuting. The case of Barcelona», *Ecological Economics*, Vol. 55, N° 4, doi :10.1016/j.ecolecon.2004.12.008, p. 499–514, ISSN 09218009. (page(s) 16)
- MURRAY-TUITE, P. M. 2006, «A comparison of transportation network resilience under simulated system optimum and user equilibrium conditions», dans *Proceedings of the 2006 Winter Simulation Conference*, Édité par L. F. Perrone, F. P. Wieland, J. Liu, B. G. Lawson, D. M. Nicol et R. M. Fujimoto, ISBN 1424405017, p. 1398–1405. (page(s) 59)
- NAÏM, P., P.-H. WUILLEMIN, P. LERAY, O. POURRET et A. BECKER. 2011, *Réseaux bayésiens (3ème édition)*, eyrolles Editions, 424 p.. (page(s) 219, 220, 221, 224)
- NAN, C., I. EUSGELD et W. KRÖGER. 2012, «Hidden Vulnerabilities due to Interdependencies between Two Systems», dans *Critical Information Infrastructures Security : 7th International Workshop, CRI-TIS 2012, September 17-18*, Lillehammer, Norway, p. 252–263. (page(s) 112)
- NASH, A., D. HUERLIMANN, J. SCHUETTE et V. P. KRAUSS. 2010, «RailML - A standard data interface for railroad applications», dans *Timetable Planning and Information Quality*, Édité par I. A. Hansen, WIT Press, UK, ISBN 978-1-84564-500-7, p. 3–10, doi :10.2495/978-1-84564-500-7/01. (page(s) 297, 298, 299, 330)
- NEAPOLITAN, R. E. 2004, *Learning Bayesian Networks*, Pearson, ISBN 978-0130125347, 674 p.. (page(s) 221)
- NEJJARI, Y. 2011, «Connaissances de base en Access», Rapport. URL <http://www.ininfo.fr>. (page(s) 157)
- NELSON, D. R., W. N. ADGER et K. BROWN. 2007, «Adaptation to Environmental Change : Contributions of a Resilience Framework», *Annual Review of Environment and Resources*, Vol. 32, N° 1, doi :10.1146/annurev.energy.32.051807.090348, p. 395–419, ISSN 1543-5938. (page(s) 106, 107)
- NEWMAN, P. et J. R. KENWORTHY. 1999, *Sustainability and Cities : Overcoming Automobile Dependence*, island pre Editions, Washington DC, ISBN 978-1559636605, 450 p.. (page(s) 16)
- NIAC. 2010, «A Framework for Establishing Critical Infrastructure Resilience Goals», Rapport, National Infrastructure Advisory Council, United States of America. (page(s) 44, 325)

- NICOLET, J.-L. 2008, «Risques et accidents majeurs - Retour d'expérience cindynique», *Techniques de l'Ingénieur*, Vol. 33. Réf. : SE1055 V1. (page(s) 247, 257)
- NIST. 2015, «Community Resilience Planning Guide for Buildings and Infrastructure Systems - Volume II - NIST Special Publication 1190», Rapport, National Institute of Standards and Technology - U.S. Department of Commerce Penny, doi :10.6028/NIST.SP.1190v1. (page(s) 59)
- NOUCHER, M., G. FRAN, M. NOUCHER et G. FRAN. 2008, «Pas de décision collective sans appropriation individuelle. Enjeux et limites des technologies de l'information géographique au service du "décider ensemble"», dans *Conférence OPDE 2008 (Les Outils pour Décider Ensemble)*, 5-6 juin, Québec, Canada. (page(s) 286)
- NOVEMBER, V. 2006, «Le risque comme objet géographique», *Cahiers de géographie du Québec*, Vol. 50, N° 141, doi :10.7202/014868ar, p. 289–296, ISSN 0007-9766. (page(s) 285)
- NOVEMBER, V., M. PENELAS et P. VIOT. 2008, «« L'effet Lully » : un territoire à l'épreuve d'une inondation», *Cosmopolitiques*, , N° 17 Juin, p. 89–106. (page(s) 285)
- NOYES, D. et F. PÉRÈS. 2007, «Analyse des systèmes - Sécurité de fonctionnement», *Techniques de l'Ingénieur*, Vol. 33, doi :SE4040, p. 14. (page(s) 108, 110, 111, 326)
- OCDE. 2014, «Etude de l'OCDE sur la gestion des risques d'inondation : La Seine en île-de-France 2014», Rapport, OCDE, Paris, France, doi :10.1787/9789264207929-fr. (page(s) 34, 191)
- OFFICE, C. 2010, «Strategic Framework and Policy Statement on improving the Resilience of Critical Infrastructure to Disruption from Natural Hazards», Rapport, Cabinet Office of UK, London. (page(s) 204, 328)
- OH, E. H., A. DESHMUKH et M. HASTAK. 2010, «Vulnerability Assessment of Critical Infrastructure, Associated Industries, and Communities during Extreme Events», dans *Construction Research Congress, May 8-10*, Banff, Alberta, Canada, p. 449–458. (page(s) 221)
- OMER, M., A. MOSTASHARI et R. NILCHIANI. 2013, «Assessing resilience in a regional road-based transportation network», *International Journal of Industrial and Systems Engineering*, Vol. 13, N° 4, doi :10.1504/IJISE.2013.052605, p. 389–408, ISSN 17485037. (page(s) 59)
- O'ROURKE, T. D. 2007, «Critical Infrastructure, Interdependencies, and Resilience», *Bridge-Washington-National Academy of Engineering*, Vol. 37, N° 1, p. 22–29. (page(s) 39, 73)
- ORR. 2005, «Railway Safety Principles and Guidance - Part 1», Rapport, Office of Rail Regulation, Norwich, UK. (page(s) 247)
- OSLAKOVIC STIPANOVIC, I., H. TER MAAT, A. HARTMANN et G. DEWULF. 2012, «Climate Change and Infrastructure Performance : Should We Worry About?», *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, Vol. 48, doi :10.1016/j.sbspro.2012.06.1152, p. 1775–1784, ISSN 18770428. (page(s) 61)
- OSLAKOVIC STIPANOVIC, I., H. TER MAAT, A. HARTMANN et G. DEWULF. 2013, «Risk Assessment Of Climate Change Impacts On Railway Infrastructure», dans *Engineering Project Organization Conference*, Édité par P. Carrillo et P. Chinowsky, Devil's Thumb Ranch, Colorado. (page(s) 61)
- OUYANG, M., L. DUEÑAS-OSORIO et X. MIN. 2012, «A three-stage resilience analysis framework for urban infrastructure systems», *Structural Safety*, Vol. 36-37, doi :10.1016/j.strusafe.2011.12.004, p. 23–31, ISSN 01674730. (page(s) 53)
- PAIRET, J.-Y. 2009, *Méthodologie d'évaluation de la résilience*, Mémoire de maîtrise ès sciences appliquées (génie industriel), Université de Montréal. (page(s) 203, 254, 255, 329)
- PAMS CAPOCCIONI, C., D. COEUR, D. CHENIER, B. CHAZELLE, C. SAINT-MARC et M. LANG. 2013a, «Impacts des inondations historiques sur un réseau de transport : Exemple des installations et des circulations ferroviaires en France», dans *Congrès SHF : Evénements extrêmes d'inondation 2013, 13-14 novembre*, Paris, France. (page(s) 84, 94, 108, 232)

- PAMS CAPOCCIONI, C., D. NIVON, J. AMBLARD, G. DE CESARE et T. GHILARDI. 2013b, «Analysis of ballast transport in the event of overflowing of the drainage system on HSL», dans *RTSE – International Workshop Ballast : Issues & Challenges*, DECEMBER, Paris. (page(s) 213, 217)
- PAMS CAPOCCIONI, C., D. NIVON, J. AMBLARD, G. DE CESARE et T. GHILARDI. 2015, «Analyse de risques pour les circulations ferroviaires d'un débordement de drainage sur ligne à grande vitesse (LGV)», *La Houille Blanche*, , N° 4, doi :10.1051/lhb/20150044, p. 39–45, ISSN 0018-6368. (page(s) 77, 78, 83, 158, 214, 216, 217, 218, 229, 278)
- PAMS CAPOCCIONI, C., D. NIVON et L.-G. CHENOT. 2012, «Les crues à grandes vitesses», *Revue Générale des Chemins de Fer*, Vol. 221, p. 100–106. (page(s) 229, 277)
- PAPROTNY, D. et O. MORALES-NAPOLES. 2015, «Extreme river discharges and storm surges in Europe Extreme hydrological events River floods», dans *RAIN project - Climate Change and Weather Modelling Workshop, 9th November*, Dublin, Ireland, p. 1–25. (page(s) 222)
- PAPROTNY, D., O. MORALES-NAPOLES et B. JONKMAN. 2015, «Assessment of flood hazard on European scale : concepts and methods», dans *RAIN project - Workshop on hazardous past weather events, 27th February*, Berlin, Germany, p. 25. URL <http://rain-project.eu/rain-workshop-hazardous-past-weather-events/>. (page(s) 222)
- PASCHE, E. et T. GEISLER. 2005, «New strategies of damage reduction in urban areas prone to flood», dans *Urban flood management*, pelling Editions, Taylor & Francis Group, London, p. 101–117. (page(s) 34, 106)
- PAVARD, B., J. DUGDALE, N. BELLAMINE-BEN SAOUD, S. DARCY et P. SALEMBIER. 2009, «Conception de systèmes socio-techniques robustes», dans *La sécurité en action*, Édité par G. De Terssac, Y. Bois-sières et I. Gaillard, octarès Editions, p. 128–134. (page(s) 246, 273, 274, 330)
- PCCIP. 2001, «Report on the Federal Agenda in Critical Infrastructure Protection Research and Development», Rapport, President's Commission on Critical Infrastructure Protection. (page(s) 74)
- PEARL, J. 1988, *Probabilistic Reasoning in Intelligent Systems : Networks of Plausible Inference*, Morgan Kaufmann, San Francisco, California, USA, ISBN 978-1558604797, 552 p.. (page(s) 222, 224)
- PÉRÈS, F. 2005, «Les Réseaux Bayésiens - Cours», Rapport, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tarbes (ENIT), Tarbes. (page(s) 241)
- PERROT, B., T. PROSVIRNOVA, A. RAUZY et J.-P. SAHUT D'IZARN. 2010, «Introduction au nouveau langage de modélisation pour la Sûreté de Fonctionnement : Altarica Nouvelle Génération», dans *Congrès Lambda-Mu 17 de Maîtrise des Risques et Sûreté de Fonctionnement, 5-7 octobre*, La Rochelle, France, p. 1–10. (page(s) 117)
- PERROW, C. 1984, *Normal accidents : Living with high risk systems (Updated edition)*, Princeton University Press, ISBN 978-0691004129, 464 p.. (page(s) 72)
- PETRI, C. A. 1963, «Fundamentals of theory of asynchronous information flow», dans *IFIP Congress 62, August 27-September 1*, North Holland Publ. Comp, p. 386–390. (page(s) 117)
- PEYRAS, L. 2002, *Diagnostic et analyse de risques liés au vieillissement des barrages - Développement de méthodes d'aide à l'expertise*, Thèse de doctorat en génie civil, Université Blaise Pascal - Clermont II. (page(s) 85, 111, 115, 221)
- PEYRAS, L. 2009, *Evaluation de la performance et des risques des ouvrages hydrauliques de génie civil*, Mémoire d'habilitation à diriger des recherches, Université Blaise Pascal-Clermont II. (page(s) 214)
- PIERDET, C. 2015, «La résilience, propriété systémique», dans *Résilience, sociétés et territoires face à l'incertitude, aux risques et aux catastrophes*, Édité par M. Reghezza-Zitt et S. Rufat, iste Editions, chap. 4, Ecologie, p. 81–94. (page(s) 71, 82)
- PIGEON, P. 2012, «Apports de la résilience à la géographie des risques : l'exemple de La Faute-

- sur-Mer», *VertigO - la revue électronique en sciences de l'environnement*, Vol. 12, N° 1, p. 1–21. (page(s) 26, 28)
- PIMM, S. L. 1984, «The complexity and stability of ecosystems», *Nature*, Vol. 307, N° 5949, p. 321–326. (page(s) 26)
- PLATT, R. H. 1995, «Lifelines : An Emergency Management Priority for the United States in the 1990s», *Disasters*, Vol. 15, N° 2, doi:10.1111/j.1467-7717.1991.tb00446.x, p. 172–176, ISSN 03613666. (page(s) 73)
- PLESSIS, C. 2008, «Understanding cities as social-ecological systems», dans *World Sustainable Building Conference – SB'08, 21-25 September*, Melbourne, Australia, ISBN 9786465037. (page(s) 71, 72)
- PONCHART, I. et M. CHRETIEN. 2014, «Remise en état d'urgence du remblai ferroviaire de Coarrazze après une crue majeure du Gave de Pau», dans *2ème Symposium International en Géotechnique Ferroviaire - GEORAIL 2014, 6-7 novembre*, Marne-la-Vallée, France, p. 473–482. (page(s) 161, 162)
- PRÉFECTURE DE POLICE. 2016, «EU SEQUANA 2016 - Exercice Zonal de gestion de crise. Scénario de crue majeure», Rapport, Préfecture de Police - Service de la communication, Paris. (page(s) 244)
- PROST, T. 1999, *Le risque, frontière du génie urbain. Identification et organisation des connaissances utiles pour l'aide à la décision dans les réseaux techniques urbains (eau potable et assainissement)*, Thèse de doctorat en conception en bâtiment et techniques urbaines, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon. (page(s) 32, 35)
- PROVITOLLO, D. 2005, «Un exemple d'effets de dominos : la panique dans les catastrophes urbaines Introduction», *Cybergeo : European Journal of Geography*, , N° 328, doi :10.4000/cybergeo.2991. (page(s) 17, 77, 83, 200)
- PROVITOLLO, D. 2007, «Vulnérabilité aux inondations méditerranéennes en milieu urbain : une nouvelle démarche géographique», *Annales de géographie*, , N° 653. (page(s) 107)
- PROVITOLLO, D. 2009, «Vulnérabilité et résilience, géométrie variable de deux concepts», dans *Ecole Normale Supérieure*, Paris-ULM, France. Présentation. (page(s) 59)
- PROVITOLLO, D. et M. REGHEZZA-ZITT. 2015, «Résilience et vulnérabilité : de l'opposition au continuum», dans *Résiliances - sociétés et territoires face à l'incertitude, aux risques et aux catastrophes*. (page(s) 59)
- PSC. 2009, «National Strategy for Critical Infrastructure», Rapport, Public Safety Canada, Canada. URL www.ahmac.gov.au. (page(s) 73)
- PUMAIN, D., T. PAQUOT et R. KLEINSCHMAGER. 2006, *Dictionnaire "La ville et l'urbain"*, economica Editions, Villes, ISBN 978-2717852240, 320 p.. (page(s) 31)
- QUENAULT, B. 2013a, «Du double affrontement ontologique/axiologique autour de la résilience aux risques de catastrophe : les spécificités de l'approche française», *VertigO - la revue électronique en sciences de l'environnement*, Vol. 13, N° 3, doi :10.4000/vertigo.14510, ISSN 1492-8442. (page(s) 245, 285)
- QUENAULT, B. 2013b, «Retour critique sur la mobilisation du concept de résilience en lien avec l'adaptation des systèmes urbains au changement climatique», *EchoGéo*, Vol. 24, N° 2013, doi : 10.4000/echogeo.13403, p. 1–19. (page(s) 16, 28, 255)
- QUENAULT, B. 2014, «La résurgence/convergence du triptyque "catastrophe-résilience- adaptation" pour (re)penser la "fabrique urbaine" face aux risques climatiques», *Développement durable et territoires*, Vol. 5, N° 3, doi :10.4000/developpementdurable.10683. (page(s) 28, 286)
- QUENAULT, B. 2015a, «De Hyogo à Sendai, la résilience comme impératif d'adaptation aux risques de catastrophe : nouvelle valeur universelle ou gouvernement par la catastrophe?», *Développement durable et territoires*, Vol. 6, N° 3, doi :10.4000/developpementdurable.11010. (page(s) 106, 286)

- QUENAULT, B. 2015b, «La résilience comme injonction politique post-Xynthia», *EspacesTemps.net*, p. 1–41. Travaux, 26-05-2015. (page(s) 29)
- QUOST, X. 2005, *Modélisation de l'effet du vent sur les trains à grande vitesse - Etude dynamique et stochastique appliquée aux risques de renversement*, Thèse de doctorat en mécanique, Ecole Centrale Lyon. (page(s) 371)
- RAIN. 2014, «Risk Analysis of Infrastructure Networks in response to extreme weather (2014-2017)», Rapport, Funded by the 7th framework program of the European Commission. Coordinated by Deirdre Savage, Trinity College, Dublin, Ireland. URL <http://rain-project.eu>. (page(s) 309)
- REASON, J. 2000, «Human Error : models and management», *British Medical Journal*, Vol. 320, N° 7237, p. 768–770. (page(s) 258, 330)
- REED, D. A., K. C. KAPUR et R. D. CHRISTIE. 2009, «Methodology for assessing the resilience of networked infrastructure», *IEEE Systems Journal*, Vol. 3, N° 2, doi :10.1109/JSYST.2009.2017396, p. 174–180, ISSN 19328184. (page(s) 44)
- REGGANI, A., P. NIJKAMP et D. LANZI. 2015, «Transport resilience and vulnerability : The role of connectivity», *Transportation Research Part A : Policy and Practice*, Vol. 81, doi :10.1016/j.tra.2014.12.012, p. 4–15, ISSN 09658564. (page(s) 60)
- REGHEZZA, M. 2006, *Réflexions autour de la vulnérabilité métropolitaine : la métropole parisienne face au risque de crue centennale*, Thèse de doctorat en géographie, Université Paris X - Nanterre. (page(s) 34)
- REGHEZZA, M. et J.-F. GLEYZE. 2007, «La vulnérabilité structurelle comme outil de compréhension des mécanismes d'endommagement», *Géocarrefour*, Vol. 82. (page(s) 34, 92, 249)
- REGHEZZA-ZITT, M. 2014, «Utiliser la polysémie de la résilience pour comprendre les différentes approches du risque et leur possible articulation», *EchoGéo*, Vol. 24, N° 2013, doi :10.4000/echogeo.13401. (page(s) 30, 173)
- REGHEZZA-ZITT, M. 2015, *De l'avènement du Monde à celui de la planète : le basculement de la société du risque à la société de l'incertitude*, Mémoire d'habilitation à diriger les recherches, Université Paris 1 - Panthéon Sorbonne. (page(s) 27, 29, 41, 77, 83)
- REGHEZZA-ZITT, M. et S. RUFAT. 2015, *Résilience, sociétés et territoires face à l'incertitude, aux risques et aux catastrophes*, iste éditions Editions, Ecologie, ISBN 978-1-78405-071-9, 226 p.. (page(s) 25)
- REGHEZZA-ZITT, M., S. RUFAT, G. DJAMENT-TRAN, A. LE BLANC et S. LHOMME. 2012, «What Resilience Is Not : Uses and Abuses», *Cybergeo : European Journal of Geography*, Vol. 621, p. 1–31. (page(s) 25, 27, 28, 29, 33)
- REID, R. et L. C. BOTTERILL. 2013, «The Multiple Meanings of 'Resilience' : An Overview of the Literature», *Australian Journal of Public Administration*, Vol. 72, N° 1, doi :10.1111/1467-8500.12009, p. 31–40, ISSN 03136647. (page(s) 27)
- RENNI, E., G. ANTONIONI, S. BONVICINI et G. SPADONI. 2009, «A novel framework for the quantitative assessment of risk due to major accidents triggered by lightnings», *Chemical Engineering Transactions*, p. 311–316. (page(s) 85)
- RENSCHLER, C. S., A. E. FRAZIER, L. A. ARENDT, G. P. CIMELLARO, A. M. REINHORN et M. BRUNEAU. 2010, «Developing the "PEOPLES" resilience framework for defining and measuring disaster resilience at the community scale», dans *9th U.S. National and 10th Canadian Conference on Earthquake Engineering, July 25-29, 1827, Toronto, Canada*, p. 10. (page(s) 45, 46, 57, 325)
- REVET, S. 2011, «Penser et affronter les désastres : un panorama des recherches en sciences sociales et des politiques internationales», *Critique internationale*, Vol. 52, N° 3, p. 157–173. (page(s) 41)
- REY, B. 2015, *Résilience systémique d'un territoire composé d'activités essentielles suite à une pertur-*

- bation majeure - Approches systémique et spatiale*, Thèse de doctorat en génie de l'environnement, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne. (page(s) 260)
- REYNAUD, J.-D. 1989, *Les règles du jeu. L'action collective et la régulation*, armand colin Editions, U-Sociologie, Paris, 306 p.. (page(s) 272)
- RICHARD, G., V. BECUE, B. BARROCA, J. IDT et P.-E. GAUTIER. 2016, «La mixité fonctionnelle participative à l'intégration urbaine des infrastructures aériennes de transport?», dans *34èmes Rencontres Universitaires de Génie Civil de l'AUGC, 25 mai*, Liège, Belgique. (page(s) 96)
- RICHARDSON, G. E. 2002, «The Metatheory of Resilience and Resiliency», *Journal of Clinical Psychology*, Vol. 58, p. 307–321. (page(s) 25)
- RIERA, D., F. MILCENT, J. PARISOT et E. CLÉMENT. 2012, «Modélisation Dynamique en Sûreté de Fonctionnement : une avancée pour l'analyse des systèmes complexes», *18ème Congrès de Maîtrise des Risques et Sûreté de Fonctionnement, 16-18 octobre*, p. 1–10. (page(s) 117)
- RIGHI, A. W., T. A. SAURIN et P. WACHS. 2015, «A systematic literature review of resilience engineering : Research areas and a research agenda proposal», *Reliability Engineering & System Safety*, Vol. 141, doi :10.1016/j.ress.2015.03.007, p. 142–152, ISSN 09518320. (page(s) 56)
- RIJKE, J., J. V. SMITH, B. GERSONIUS, S. VAN HERK, A. PATHIRANA, R. ASHLEY, T. WONG et C. ZEVENBERGEN. 2014, «Operationalising resilience to drought : Multi-layered safety for flooding applied to droughts», *Journal of Hydrology*, Vol. 519, N° 0, p. 2652–2659, ISSN 0022-1694. (page(s) 50)
- RINALDI, S. M., J. P. PEERENBOOM et T. K. KELLY. 2001, «Identifying, Understanding, and Analyzing Critical Infrastructure Interdependencies», *IEEE Control Systems Magazine*, Vol. 21, N° 6, p. 11–25. (page(s) 74, 75)
- ROBERT, B. et L. MORABITO. 2008, «The operational tools for managing physical interdependencies among critical infrastructures», *International Journal of Critical Infrastructures*, Vol. 4, N° 4, doi : 10.1504/IJCIS.2008.020156, p. 353, ISSN 1475-3219. (page(s) 301, 302, 330)
- ROBERT, B. et L. MORABITO. 2009, *Réduire la vulnérabilité des infrastructures essentielles.*, lavoisier Editions, TEC&Doc, Paris, ISBN 978-2-7430-1164-2., 80 p.. (page(s) 17, 33, 74, 203, 246)
- ROBERT, B., W. PINEL, J.-Y. PAIRET, B. REY, C. COEUGNARD, Y. HÉMOND, G. YAN et I. CLOUTIER. 2009, *Résilience organisationnelle - Concepts et méthodologie d'évaluation*, Presses internationales Polytechnique, Québec, Canada, ISBN 9782553015403, 52 p.. (page(s) 248)
- ROCHE, P.-A., J. MIQUEL et E. GAUME. 2012, *Hydrologie quantitative : Processus, modèles et aide à la décision*, Ingénierie et développement durable, Springer Paris, ISBN 9782817801056, 590 p.. (page(s) 173)
- ROSE, A. 2007, «Economic resilience to natural and man-made disasters : Multidisciplinary origins and contextual dimensions», *Environmental Hazards*, Vol. 7, p. 383–398. (page(s) 27, 43)
- ROSSETTI, B. M. A. 2002, «Potential Impacts of Climate Change on Railroads», dans *The Potential Impacts of Climate Change on Transportation Workshop*, p. 209–221. (page(s) 13)
- ROYER, M. 2009, «HAZOP : une méthode d'analyse des risques - Présentation et contexte», *Techniques de l'ingénieur*, Vol. 33, p. 16. Réf. : SE4030. (page(s) 114)
- RSSB. 2016, «Tomorrow's Railway and Climate Change Adaptation : Final Report», Rapport, Rail Safety and Standards Board Ltd., London. (page(s) 276)
- RTE. 2012, «Etude sur la technique souterraine appliquée au projet Avelin-Gavrelle», Rapport, Réseau de transport d'électricité. (page(s) 315)
- RUFAT, S. 2011, «Critique de la résilience pure», , p. 1–19 Article de recherche. (page(s) 29)
- SAINT-MARC, C., D. CHENIER, D. COEUR, C. PAMS CAPOCCIONI, P.-A. DAVOINE et M. VILLANOVA-OLIVER. 2014a, «Apprendre du passé pour optimiser la prévention et la gestion des inondations sur

- le ferroviaire», dans *2ème Symposium International en Géotechnique Ferroviaire - GEORAIL 2014*, 6-7 novembre, Marne-la-Vallée. (page(s) [108](#), [304](#))
- SAINT-MARC, C., C. PAMS CAPOCCIONI et P.-A. DAVOINE. 2014b, «Cartographie des impacts de l'inondation d'octobre 1940 sur les voies ferrées», . (page(s) [304](#), [305](#), [330](#))
- SAJALOLI, B., S. SERVAIN-COURANT, S. DOURNEL et D. ANDRIEU. 2011, «L'inscription paysagère du risque d'inondation dans les politiques urbaines des agglomérations ligériennes, proposition d'un marqueur de résilience spatiale», *Revue Géographique de l'Est*, Vol. 51, N° 3-4. (page(s) [34](#))
- SAURIN, T. A., A. W. RIGHI et É. HENRIQSON. 2013, «Characteristics of Complex Socio-Technical Systems and Guidelines for their Management : the role of resilience», dans *Resilience Engineering Association : 5th International Symposium, 25-27 June*, Soesterberg, The Netherlands. (page(s) [71](#), [72](#))
- SAURIN, T. A. et S. SOSA GONZALEZ. 2013, «Assessing the compatibility of the management of standardized procedures with the complexity of a sociotechnical system : Case study of a control room in an oil refinery», *Applied Ergonomics*, Vol. 44, N° 5, doi :10.1016/j.apergo.2013.02.003, p. 811–823, ISSN 00036870. (page(s) [73](#))
- SCARWELL, H.-J. et R. LAGANIER. 2004, *Risque d'inondation et aménagement durable des territoires*, presses universitaires de france Editions, Lille, ISBN 2-85939-870-8, 239 p.. (page(s) [283](#))
- SCHIPPER, E. L. F. et L. LANGSTON. 2015, «A comparative overview of resilience measurement frameworks analysing indicators and approaches», *Overseas Development Institute - Working Paper 422*, , N° July, doi :10.13140/RG.2.1.2430.0882, p. 30, ISSN 2052-7209. (page(s) [38](#))
- SERRE, D. 2005, *Evaluation de la performance des digues de protection contre les inondations - Modélisation de critères de décision dans un Système d'Information Géographique*, Thèse de doctorat en sciences de l'information géographique, Marne-la-Vallée. (page(s) [72](#), [74](#), [94](#), [109](#), [111](#), [115](#))
- SERRE, D. 2011, *La ville résiliente aux inondations - Méthodes et outils d'évaluation*, Mémore d'habilitation à diriger des recherches, Université Paris-Est. (page(s) [17](#), [26](#), [27](#), [33](#), [34](#), [49](#), [72](#), [74](#), [109](#), [113](#))
- SERRE, D. 2013, «Une ville résiliente aux inondations?», Conférence publique, 25 mars 2013. (page(s) [33](#))
- SERRE, D. 2014, «Approcher la résilience urbaine par la technique. Construction d'un socle scientifique préalable à la résilience intégrée», dans *Fragilités et résilience. Les nouvelles frontières de la mondialisation*, karthala Editions, Hommes et Sociétés, Paris, ISBN 978-2811111090, p. 245–262. (page(s) [108](#))
- SERRE, D. 2015a, «Adapter les systèmes territoriaux à travers leurs composants : le cas des réseaux critiques», dans *Résilience, sociétés et territoires face à l'incertitude, aux risques et aux catastrophes*, iste éditions Editions, chap. 6, Ecologie, London, ISBN 978-1-78405-071-9, p. 109–121. (page(s) [60](#), [82](#), [84](#), [86](#), [249](#))
- SERRE, D. 2015b, «Concevoir la résilience urbaine : un défi face à des complexités», dans *Complexité et désordre - Éléments de réflexion*, Édité par EDP Sciences. (page(s) [33](#), [72](#), [287](#))
- SERRE, D., B. BARROCA et R. LAGANIER. 2013, *Resilience and Urban Risk Management*, crc press/ Editions, Leiden, The Netherlands, 192 p.. (page(s) [25](#))
- SERRE, D., J. DOUVINET, S. LHOMME, M. BALSELLS et B. BARROCA. 2016, «Résilience des territoires - Articuler les méthodes et disciplines pour proposer des améliorations stratégiques», dans *CIST - En quête de territoire(s) ? / Looking for territories ?*, March 17-18, Grenoble, France, p. 446–451. (page(s) [33](#), [34](#))
- SGDSN. 2013, «Guide pour réaliser un plan de continuité d'activité», Rapport, Secrétariat général de

- la défense et de la sécurité nationale, Paris. (page(s) 261, 269, 330)
- SIMON, H. 1990, «Prediction and Prescription in System Modeling», *Operations Research*, Vol. 38, N° 1, p. 7–14. (page(s) 86)
- SIMON, H. A. 1991, *Sciences des systèmes, sciences de l'artificiel*, dunod Editions, Afcet systèmes, Paris, ISBN 978-2040198152, 229 p.. (page(s) 109)
- SINAÏ, A., R. STEVENS, H. CARTON et P. SERVIGNE. 2015, *Petit traité de résilience locale*, charles léopold mayer Editions, Paris, ISBN 9782843771866, 120 p.. (page(s) 25, 30)
- SNCF. 2004, «Surveillance et maintenance de la voie - Stabilité de la voie - Mesures à prendre en cas de diminution inopinée ou de risque de diminution de la stabilité de la voie (IN 0319)», Rapport. (page(s) 214, 215, 328)
- SNCF. 2006, «Référentiel Technique pour la réalisation des LGV - Partie Génie Civil (IN 3278)», Rapport, France. (page(s) 216)
- SNCF. 2015, «Le risque inondation - Réponse de l'opérateur SNCF pour l'Île-de-France», dans *Commission CDSE PCA - 6 octobre*, Direction de la Sûreté, Paris, ISBN 9782747213905, ISSN 1268-4783, p. 23, doi :10.3917/re.049.0062. (page(s) 265)
- SNCF. 2016a, «Exercice de protection du RER C contre les inondations», URL http://www.youtube.com/watch?v=ZEH_nKjy_Y8. (page(s) 268)
- SNCF. 2016b, «Vers la reprise du RER C», *Le Blog du RER C - Transilien*, N° 9 juin. (page(s) 267)
- SØRENSEN, L. L. E. 2015, «Integrating adaptation in the design of the Metro of Copenhagen (2015)», . (page(s) 199, 328)
- ŠOTIĆ, A. et R. RAJIĆ. 2015, «The Review of the Definition of Risk», *Journal of Applied Knowledge Management*, Vol. 3, N° 3, p. 17–26. (page(s) 212)
- SOURGET, F., P.-E. GAUTIER, L.-M. CLÉON et G. SOURIS. 2005, «Protection de la ligne TGV-Méditerranée face aux vents traversiers», *Génie Logiciel*, Vol. 75, p. 57–65. (page(s) 317, 331, 372, 373, 374)
- STRAUB, D. 2005, «Natural hazards risk assessment using Bayesian networks», dans *Ninth International Conference on Structural Safety and Reliability (ICOSSAR 05), June 19-23, Rome, Italy*. (page(s) 221, 222)
- TALON, A. 2006, *Evaluation des scénarii de dégradation des produits de construction*, Thèse de doctorat en génie civil, Université Blaise Pascal - Clermont II. (page(s) 115, 218)
- TALON, A., D. BOISSIER et L. PEYRAS. 2009, «Démarches d'analyse de risques - Méthodes qualitatives d'analyse de risques», Cours en ligne de l'Université Numérique Ingénierie et Technologie. (page(s) 39, 112)
- TERRIN, J.-J. 2014, *Le projet du projet - Concevoir la ville contemporaine*, parentheses Editions, Marseille, ISBN 978-2-86364-289-4, 320 p.. (page(s) 28, 29)
- THE RESILIENCE ALLIANCE. 2010, «Assessing Resilience in Social-Ecological Systems : Workbook for Practitioners (Version 2)», Rapport. (page(s) 53, 54, 57, 325)
- THE RESILIENCE ALLIANCE. 2016, «Resilience Alliance Webpage», URL <http://www.resalliance.org>. (page(s) 52)
- THIBAUT, S. 2000, «Le génie urbain», dans *La ville et l'urbain, l'état des savoirs*, Édité par T. Paquot, M. Lussault et S. Body-Gendrot, la découverte Editions, p. 244–254. (page(s) 31)
- THORNES, J. et B. DAVIS. 2002, «Mitigating the impact of weather and climate on railway operations in the UK», dans *ASME/IEEE Joint Rail Conference, April 23-25, Washington, DC, USA*, p. 29–38. (page(s) 13)
- TIERNEY, K. et M. BRUNEAU. 2007, «Conceptualizing and measuring resilience - A Key to Disaster Loss

- Reduction», *TR News*, Vol. 250, N° May-June, p. 14–18, ISSN 07386826. (page(s) 43, 325)
- TIMMERMAN, P. 1981, «Vulnerability, Resilience and the Collapse of Society : A Review of Models and Possible Climatic Applications», *Environmental Monograph*, Vol. 1, N° 1, doi :10.1002/joc.3370010412, p. 1–45. (page(s) 26, 106)
- TISSERON, S. 2014, *La résilience*, presses universitaires de France Editions, Que sais-je? (5ème édition), ISBN 9782130577959, 128 p.. (page(s) 25, 30, 56)
- TOLMER, C.-E. 2016, *Contribution à la définition d'un modèle d'ingénierie concourante pour la mise en oeuvre des projets d'infrastructures linéaires urbaines : prise en compte des interactions entre enjeux, acteurs, échelles et objets*, Thèse de doctorat en génie urbain, Université Paris-Est. (page(s) 72)
- TOUBIN, M. 2014, *Améliorer la résilience urbaine par un diagnostic collaboratif - L'exemple des services urbains parisiens face à l'inondation*, Thèse de doctorat en géographie, Université Paris-Diderot. (page(s) 17, 72, 94, 205, 245, 248, 253, 254, 256, 259, 269, 270, 272, 275, 284, 311, 320, 329)
- TOUBIN, M. 2015, «Une métropole résiliente face au risque inondation : du concept à l'action?», dans *La résilience urbaine - Synthèse des petits déjeuners décideurs-chercheurs 2014*, Paris, ISBN 9782737119613, p. 12–13. (page(s) 258)
- TOUBIN, M., S. LHOMME, Y. DIAB et D. SERRE. 2013, «La Résilience urbaine : un nouveau concept opérationnel vecteur de durabilité urbaine?», *Développement durable et territoires*, Vol. 3, N° Mai 2012, p. 1–15. (page(s) 27, 35, 43, 106, 287)
- TOUBIN, M., D. SERRE, Y. DIAB et R. LAGANIER. 2012, «An auto-diagnosis tool to highlight interdependencies between urban technical networks», *Natural Hazards and Earth System Science*, Vol. 12, N° 7, doi :10.5194/nhess-12-2219-2012, p. 2219–2224, ISSN 1684-9981. (page(s) 203)
- TRUCCO, P., E. CAGNO et M. DE AMBROGGI. 2012, «Dynamic functional modelling of vulnerability and interoperability of Critical Infrastructures», *Reliability Engineering & System Safety*, Vol. 105, doi :10.1016/j.ress.2011.12.003, p. 51–63, ISSN 09518320. (page(s) 74, 311)
- TURNER, B. L., R. E. KASPERSON, P. A. MATSON, J. J. MCCARTHY, R. W. CORELL, L. CHRISTENSEN, N. ECKLEY, J. X. KASPERSON, A. LUERS, M. L. MARTELLO, C. POLSKY, A. PULSIPHER et A. SCHILLER. 2003, «A framework for vulnerability analysis in sustainability science», *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, Vol. 100, N° 14, doi :10.1073/pnas.1231335100, p. 8074–8079, ISSN 0027-8424. (page(s) 106)
- UNISDR. 2012, «How to make cities more resilient - A Handbook For Local Government Leaders», Rapport April, United Nations, Geneva. (page(s) 28)
- UNISDR. 2015, «Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015-2030», Rapport, The United Nations Office for Disaster Risk Reduction, Sendai, Japan. (page(s) 28)
- UNITED NATIONS. 2014, «World Urbanization Prospects : The 2014 Revision, Highlights (ST/ESA/SER.A/352)», Rapport, United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division, New-York. (page(s) 16)
- USHIJIMA, M. 2006, «Strong wind measures of East Japan Railway Company Masataka», Dublin council meeting of Rail Safety and Standards Board, 25 October. (page(s) 88, 371)
- VALADAS, E. 2003, *Identification des scénarios de dégradations des chaussées bitumineuses épaisses*, Mémoire pour l'obtention du diplôme d'ingénieur en génie civil, Université Blaise-Pascal. (page(s) 115)
- VALENCIA DAVID, N. 2006, *Risques naturels, aléa et vulnérabilité mécanique : cas de constructions en maçonnerie vis-à-vis des séismes et inondations*, Thèse de doctorat en génie civil, Université de Marne-la-Vallée. (page(s) 85)
- VENTURA, C., H. JUAREZ GARCIA et J. MARTI. 2010, «Understanding Interdependencies among Criti-

- cal Infrastructures», dans *9th U.S. National and 10th Canadian Conference on Earthquake Engineering, July 25-29*, Paper 1899, Toronto, Ontario, Canada. (page(s) 33, 73)
- VEYRET, Y., G. CHARRY et N. MESCHINET DE RICHEMOND. 2004, *Risques naturels et aménagement en Europe*, armand colin Editions, ISBN 978-2200267827, 254 p.. (page(s) 283)
- VEYRET, Y. et M. REGHEZZA. 2006, «Vulnérabilité et risques - L'approche récente de la vulnérabilité», *Responsabilité & Environnement*, , N° 43. (page(s) 105)
- VILLEMEUR, A. 1997, *Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels - Fiabilité, facteurs humains, informatisation*, eyrolles Editions, Direction des études et recherches d'Electricité de France, Paris, 822 p.. (page(s) 110, 113)
- VINET, F. 2003, *Crués et inondations dans la France méditerranéenne. Les crués torrentielles des 12 et 13 novembre 1999 (Aude, Tarn, Pyrénées Orientales et Hérault)*, du temps Editions, Nantes, 224 p.. (page(s) 232)
- VINET, F. 2010, *Le risque inondation. Diagnostic et gestion*, tec & doc Editions, Science du Risque et du Danger (SRD), ISBN 9782743012632, 318 p.. (page(s) 29)
- VON BERTALANFFY, L. 1993, *Théorie générale des systèmes, Nouvelle édition*, dunod Editions, ISBN 2-10-001841-8, 308 p.. (page(s) 69)
- VTPI. 2016, «Evaluating Transportation Resilience -», Rapport, Victoria Transport Policy Institute, Victoria, British Columbia, Canada. URL <http://www.vtppi.org/tdm/tdm88.htm>. (page(s) 44)
- VUGRIN, E. D., D. E. WARREN, M. A. EHLEN et R. C. CAMPHOUSE. 2010, «A framework for assessing the resilience of infrastructure and economic systems», *Sustainable and Resilient Critical Infrastructure Systems : Simulation, Modeling, and Intelligent Engineering*, p. 77–116. (page(s) 38, 43)
- VUILLET, M. 2012, *Élaboration d'un modèle d'aide à la décision basé sur une approche probabiliste pour l'évaluation de la performance des digues fluviales*, Thèse de doctorat en génie urbain, Université Paris-Est Marne-la-Vallée. (page(s) 72, 94, 111, 115, 218, 221, 238)
- WALKER, B. H., N. ABEL, J. M. ANDERIES et P. RYAN. 2009, «Resilience, Adaptability and Transformability in the Goulburn-Broken Catchment, Australia», *Ecology and Society*, Vol. 14, N° 1. (page(s) 27, 30)
- WALKER, B. H., C. S. HOLLING, S. R. CARPENTER et A. KINZIG. 2004, «Resilience, Adaptability and Transformability in Social-ecological Systems», *Ecology and Society*, Vol. 9, N° 2, doi :10.1103/PhysRevLett.95.258101, ISSN 1708-3087. (page(s) 25, 71)
- WALSH, B. 2013, «Adapt or Die : Why the Environmental Buzzword of 2013 Will Be "Resilience"», *Time Magazine*, Science, 8th January. (page(s) 28)
- WEBER, P., G. MEDINA-OLIVA, C. SIMON et B. IUNG. 2012, «Overview on Bayesian networks applications for dependability, risk analysis and maintenance areas», *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, Vol. 25, N° 4, doi :10.1016/j.engappai.2010.06.002, p. 671–682, ISSN 09521976. (page(s) 221)
- WEBER, P. et C. SIMON. 2016, «Réseaux bayésiens : un nouveau formalisme de modélisation pour la sûreté de fonctionnement», *Bibliothèque Virtuelle de Maîtrise des risques - Groupe AFNOR*. (page(s) 117, 222)
- WEGENER, M. 1994, «Operational Urban Models State of the Art», *Journal of the American Planning Association*, Vol. 60, N° 1, doi :10.1080/01944369408975547, p. 17–29, ISSN 0194-4363. (page(s) 17)
- WEICHSELGARTNER, J. 2004, «Changer au rythme des changements : les défis s'adressant à la gestion des risques naturels», dans *Risques naturels et aménagement en Europe*, armand colin Editions, Paris, p. 212–221. (page(s) 285)
- WEICHSELGARTNER, J. 2014, «Challenges and opportunities for building urban resilience», *A/Z ITU*

- Journal of the Faculty of Architecture*, Vol. 11, N° 1, p. 20–35. (page(s) [28](#), [30](#))
- WEICHSSELGARTNER, J. et I. KELMAN. 2014, «Geographies of resilience : Challenges and opportunities of a descriptive concept», *Progress in Human Geography*, , N° May, doi :10.1177/0309132513518834, p. 0309132513518834, ISSN 0309-1325, 1477-0288. (page(s) [30](#), [286](#))
- WISNER, B., P. BLAIKIE, T. CANNON et I. DAVIS. 2003, *At Risk : natural hazards, people's vulnerability and disasters - Second edition*, ISBN 978-0415252164, 496 p., doi :10.4324/9780203428764. (page(s) [77](#))
- WOLOSZYN, P. et B. QUENAULT. 2013, «Vulnérabilité territoriale et résiliences : résistances et capacité adaptatives face aux aléas climatiques», dans *International Conference of Territorial Intelligence : "Territorial Intelligence, Socio-Ecological Transition and Resilience of the Territories"*, 30-31 May, Besançon, France. (page(s) [28](#))
- WOLSHON, B. 2002, «Planning for the Evacuation of New Orleans», *Institute of Transportation Engineering (ITE) Journal*, , N° February, p. 44–49. (page(s) [250](#))
- WOODS, D. D. 1988, «Coping with complexity : the psychology of human behavior in complex systems», dans *Tasks, Errors, and Mental Models*, Édité par L. Goodstein, H. Andersen et S. Olsen, Taylor and Francis. (page(s) [54](#))
- YATCHINOVSKY, A. 2005, *L'approche systémique : pour gérer l'incertitude et la complexité*, ESF (page(s) [70](#))
- YUSTA, J. M., G. J. CORREA, R. LACAL-ARANTEGUI et R. LACAL-ARANTEGUI. 2011, «Methodologies and applications for critical infrastructure protection : State-of-the-art», *Energy Policy*, Vol. 39, N° 10, doi :10.1016/j.enpol.2011.07.010, p. 6100–6119, ISSN 03014215. (page(s) [33](#), [39](#))
- ZEVENBERGEN, C., A. CASHMAN, N. EVELPIDOU, E. PASCHE, S. GARVIN et R. ASHLEY. 2010, *Urban Flood Management*, CRC Press, ISBN 9780415559447, 340 p.. (page(s) [17](#))
- ZHANG, L., X. WU, M. J. SKIBNIEWSKI, J. ZHONG et Y. LU. 2014, «Bayesian-network-based safety risk analysis in construction projects», *Reliability Engineering & System Safety*, Vol. 131, doi :10.1016/j.res.2014.06.006, p. 29–39, ISSN 09518320. (page(s) [220](#))
- ZIMMERMAN, R. et C. E. RESTREPO. 2006, «The next step : quantifying infrastructure interdependencies to improve security», *International Journal of Critical Infrastructures*, Vol. 2, doi :10.1504/IJCIS.2006.009439, p. 215, ISSN 1475-3219. (page(s) [75](#))
- ZWINGELSTEIN, G. 1996, *La maintenance basée sur la fiabilité*, hermes sciences publication Editions, Diagnostic et Maintenance, ISBN 9782866015459, 666 p.. (page(s) [110](#), [111](#), [112](#), [114](#), [116](#), [119](#), [120](#))
- ZWINGELSTEIN, G. 1999, «Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels complexes», *Techniques de l'ingénieur*. Réf. : S8250 V1. (page(s) [110](#), [203](#))
- ZWINGELSTEIN, G. 2009, «Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels complexes - Analyse prévisionnelle et bases de données de fiabilité», *Techniques de l'ingénieur*. Réf. : S8251 V1. (page(s) [111](#), [112](#), [326](#))



Quatrième partie

Annexes



Annexe A

Genèse de la thèse : l'exemple du risque de vents traversiers

La logique de caractérisation complète du risque inondation par une liaison globale de l'aléa, des conséquences matérielles et des conséquences fonctionnelles est issue du travail porté en France par la SNCF dans les années 2000 concernant le risque de vents traversiers sur les Lignes à Grande Vitesse (LGV). Ce risque a fait l'objet d'un important travail européen de recherche ayant conduit à une caractérisation globale du risque de vents traversiers sur la LGV Méditerranée. Le risque, entièrement couvert par une démarche de caractérisation, bénéficie d'une gestion probabiliste des effets sur l'exploitation et permet de faire circuler sur des lignes soumises aux vents traversiers des TGV avec des niveaux de sécurité équivalents aux autres lignes. Cette section reprend les étapes-clés de cette démarche qui constitue les bases de la réflexion qui a mené à la modélisation probabiliste entreprise dans le cas du risque inondation (GONZVA et GAUTIER, 2014).

A.1 Contexte de la sensibilité des LGV au risque de vents traversiers

De nombreux exemples à travers le monde démontrent empiriquement la vulnérabilité des systèmes de transport, en particulier des systèmes de transport guidé classiques et à grande vitesse (Figure A.1a et Figure A.1b). Ce risque est étudié depuis les années 1970 dans les pays d'Asie au sein desquels les lignes sont fortement exposées et a ensuite été internationalement analysé notamment avec le développement de la grande vitesse ferroviaire (USHIJIMA, 2006; KUNIEDA, 1972).

La Ligne à Grande Vitesse Méditerranée constitue en France un exemple probant dans l'étude du risque de vents traversiers pour plusieurs raisons. Premièrement, il s'agit d'une ligne localisée dans la vallée du Rhône où de forts vents (le Mistral et la Tramontane) soufflent régulièrement. Deuxièmement, plusieurs ouvrages d'art et remblais de grande hauteur et longueur existent le long de cette ligne, ce qui a pour conséquence une amplification importante de l'intensité de l'aléa due à cette sur-exposition. Troisièmement, un autre paramètre générant une plus forte vulnérabilité est lié au type de véhicule : le TGV-Duplex est sur deux niveaux ce qui l'expose particulièrement aux vents latéraux. Enfin, la vitesse d'exploitation à 300 km/h a un effet prépondérant dans la vulnérabilité de la ligne qui devient alors plus sensible qu'à des vitesses d'exploitation de lignes classiques (en deçà de 200 km/h). Ainsi, le risque majeur pour le système de transport soumis à un aléa de vents traversiers est le renversement de véhicules constitutifs du train (QUOST, 2005, p. 22).



(a) Renversement d'un train en Suisse suite à d'im- (b) Renversement d'un train en Chine suite à d'im-
portantes rafales de vent, 2007 (Source : *Medienbe-* portantes rafales de vent, 2007 (JIN *et al.*, 2012)
richt der Kantonspolizei Appenzell Innerrhoden)

L'exposition de la ligne Méditerranée ainsi que l'élaboration de stratégies de protection face aux vents ont nécessité une analyse de risque mobilisant des domaines scientifiques divers tels que l'aérodynamique, la dynamique ferroviaire, la météorologie et la modélisation stochastique et statistique (SOURGET *et al.*, 2005).

A.2 Analyse de la vulnérabilité des LGV face au risque de vents traversiers

En premier lieu, une étude météorologique a permis d'évaluer l'exposition globale de la ligne aux vents. En effet, par un découpage de la ligne en douze zones (de 5 à 30 km de longueur), dont chacune a fait l'objet de l'installation d'une station anémométrique, il a été possible d'observer en continue la vitesse et la direction du vent au niveau de la ligne. À partir de ces mesures du vent moyen, en amplitude et en direction en des points particuliers de la ligne, il a été nécessaire d'appliquer deux coefficients, chacun lié à un type de considération : spatiale pour le premier et temporelle pour le second (Figure A.2).

Un premier coefficient C_t de transfert spatial du vent moyen a été appliqué à la valeur de vitesse de vent moyen sur une zone afin d'obtenir la valeur de vitesse du vent sur un découpage plus fin de la ligne en éléments de 50 m de long. Ce coefficient a été évalué pour chaque direction du vent moyen. Un second coefficient C_R de rafale de vent appliqué à la vitesse du vent moyen permet de déterminer, sur chaque site de 50 m de long, l'amplitude du vent moyen. Ce coefficient permet ainsi d'évaluer des turbulences locales du vent instantané, en vitesse et en direction. Finalement, la vitesse du vent instantané V_i est obtenue à partir de l'application de ces deux coefficients sur la vitesse du vent moyen V_m , comme le montre l'Équation A.1.

$$V_i = C_t \times C_R \times V_m \quad (\text{A.1})$$

Cette équation apporte ainsi la modélisation de la distribution du vent instantané tout au long de la ligne (SOURGET *et al.*, 2005).

Le risque fait également l'objet d'une modélisation. Comme précisé précédemment, le risque majeur pour le système de transport soumis à un aléa de vents traversiers est le renversement d'un ou de plusieurs véhicules constitutifs du train. Un travail de détermination des forces au niveau du contact roue-rail au moment où l'essieu se soulève à cause du vent a été nécessaire pour caractériser le risque. Or, la difficulté du calcul de ces forces n'a pas rendu possible la prévision du renversement par des valeurs limites de déchargement d'une roue sur l'autre roue (SOURGET *et al.*, 2005). C'est la raison

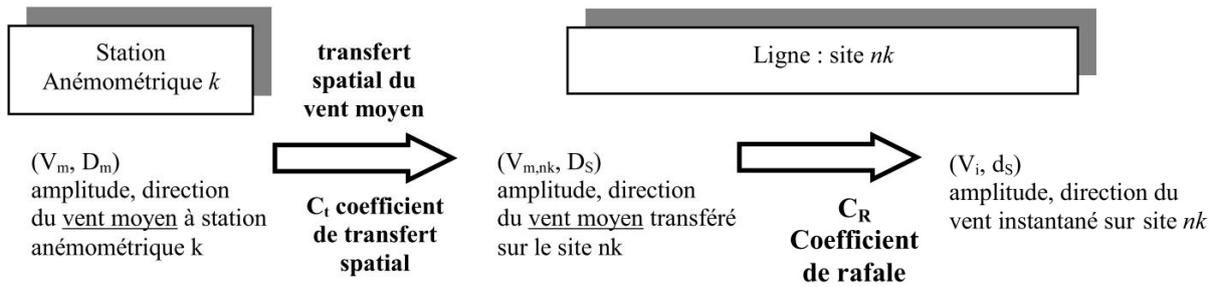


FIGURE A.2 – Principe de modélisation de l'aléa vents traversiers (SOURGET *et al.*, 2005)

pour laquelle un critère conservatif a été retenu correspondant à l'évènement critique précurseur du renversement. Cet évènement correspond à un déchargement relatif des roues de 90 % (Équation A.2 où Q_0 représente la charge statique par côté de véhicule et ΔQ le déchargement du aux forces latérales exercées par le vent).

$$\frac{\Delta Q}{Q_0} = 90 \% \tag{A.2}$$

Le calcul du vent limite conduisant à un déchargement relatif de 90 % est alors mené pour tous les angles d'incidence du vent par rapport à la ligne, par pas de 10°, à l'aide de simulations numériques permettant de déterminer la réponse du train en fonction d'une modélisation spatio-temporelle des rafales de vent. De cette façon, pour différentes configurations de ligne (sur remblai, en courbe, etc.) un ensemble d'abaques de vents appelés « *Characteristics Wind Curves* » est calculé (Figure A.3). Ces abaques indiquent, en fonction de l'angle du vent par rapport à la ligne, la vitesse maximale de vent conduisant à un déchargement de 90 % du bogie le plus déchargé (SOURGET *et al.*, 2005).

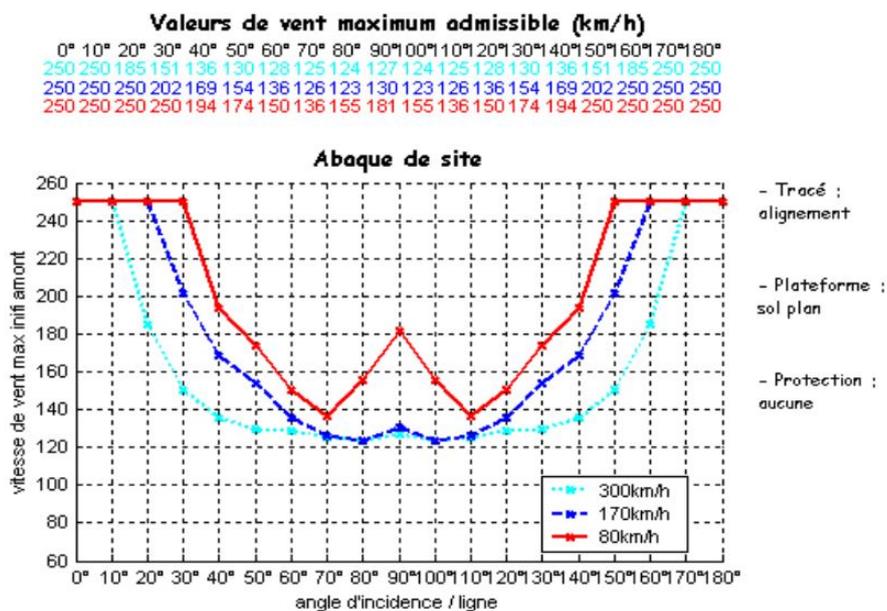


FIGURE A.3 – Exemple de courbes caractéristiques CWC pour différentes vitesses de circulation dans le cas d'un tracé en alignement droit (SOURGET *et al.*, 2005)

A.3 Stratégies d'amélioration de la résilience de la LGV Méditerranée face au risque de vents traversiers

La modélisation du phénomène physique qu'est l'aléa ainsi que le critère de sécurité qui définit l'évènement précurseur à au risque de retournement permettent d'élaborer une méthode d'estimation quantitative du risque. La probabilité de renversement $P(R)$ d'un train sur une zone de la ligne Méditerranée équivaut alors à la probabilité que le vent instantané soit supérieur ou égal à l'abaque CWC, plus une marge ΔV fixe établie à partir d'essais faits sur des maquettes en soufflerie.

A partir de cette probabilisation du risque, de l'aléa d'un vent traversier caractérisé par une intensité donnée (vitesse et direction du vent) jusqu'aux conséquences fonctionnelles c'est-à-dire le renversement du train, deux types de stratégies de protection ont été mis en place.

Premièrement, sur les sites les plus exposés, des **murs anti-vents** ont été positionnés (Figure A.4a). Les sites les plus exposés correspondent à des sections de la ligne au niveau desquelles une vitesse de circulation des trains à 80 km/h ne suffit pas à garantir le non renversement de trains. Ces murs anti-vents permettent alors d'assurer un niveau de protection pour des vents d'intensité correspondante à des périodes de retour de 50 ans (GAUTIER *et al.*, 2001).

Deuxièmement, un **système de régulation automatique de la vitesse des trains** est mis en œuvre (Figure A.4b). Essentiellement pour des raisons évidentes de coûts, il est impossible d'implanter des murs anti-vent tout au long de la ligne pour assurer la sécurité des circulations à 300 km/h. C'est la raison pour laquelle la sécurité des trains est assurée en optimisant la qualité du service de transport au travers d'une vitesse d'exploitation la plus élevée possible. Pour déterminer la vitesse maximale que peut avoir un train en présence de vents latéraux, un **système de surveillance anémométrique** est déployé sur la ligne. Des stations anémométriques ont été implantées sur des sites fortement exposés. A partir de la vitesse et la direction du vent observées antérieurement, la station calcule et prédit la vitesse et la direction du vent pour les prochaines minutes. Selon la prévision, la station anémométrique a la possibilité d'agir sur la signalisation de sa zone pour commander la réduction de vitesse nécessaire pour garantir la sécurité des circulations (SOURGET *et al.*, 2005). Ce système dynamique a la possibilité de réduire la vitesse d'exploitation *via* un ralentissement progressif du train.

Ainsi, les murs anti-vent correspondent à une **protection locale structurelle** développée durant les étapes de conception du système tandis que la régulation automatique de la vitesse des trains est une **protection globale organisationnelle** implémentée durant l'exploitation du système de transport.

Finalement, l'ensemble de cette démarche permet donc une caractérisation complète du risque appliqué au système et provoqué par un aléa de vents traversiers. Cette caractérisation couvre globalement le risque, de l'aléa jusqu'aux effets sur le service fourni par le système de transport.

Il est important de constater que le risque de vents traversiers ne génère qu'un seul évènement redouté, celui du renversement du train, en impactant un seul élément du système et de façon directe. Or, le risque inondation est quant à lui multiple et plus complexe à modéliser puisqu'il impacte des éléments de plusieurs sous-systèmes, de façon directe mais aussi par le biais d'effets domino indirects et, génère un grand nombre d'évènements redoutés.



(a) Exemple de mur anti-vent positionné au niveau des zones critiques le long de la LGV Méditerranée (source : SNCF)



(b) Station anémométrique le long de la LGV Méditerranée (source : SNCF)

FIGURE A.4 – Stratégies de protection face au risque de vents traversiers sur la LGV Méditerranée



Annexe B

Application des méthodes de Sûreté de Fonctionnement dans la recherche

Cette annexe contient les différentes applications faites dans le cadre de cette recherche de méthodes issues de la Sûreté de Fonctionnement dans le cas d'un système de transport guidé soumis au risque inondation.

Parmi ces applications, les Blocs-Diagrammes Fonctionnels (BdF) et les tableaux d'AMDE sont présentés ci-dessous dans le cas d'un système de transport guidé positionné en souterrain, positionné en surface et positionné en aérien faisant face à un risque inondation.

Ces deux méthodes sont essentielles au travail de recherche car ce sont les données d'entrée du modèle d'interdépendances qui permet l'identification et la production de l'ensemble des scénarios de défaillances par effet domino, lorsque survient une inondation.

B.1 Blocs-Diagrammes Fonctionnels

Par souci de synthèse dans la représentation des BdF des trois configurations d'implantation présentant chacune deux types d'interaction (*contact* et *dépendance*) en situation normale et un troisième type d'interaction (*vulnérabilité*) en situation de crise (lorsque survient une inondation), six BdF sont réalisés :

- un BdF **commun** pour la configuration en **souterrain**, en **surface** et en **aérien** synthétisant dans chaque cas les interactions de **dépendance**, dans la mesure où ces interactions ne sont pas fonctions de l'implantation en **situation normale** ;
- un BdF **souterrain**, un BdF **surface** et un BdF **aérien** synthétisant dans chaque cas les interactions de **contact** et les interactions de **vulnérabilité**, en **situation de crise** ;

B.1.1 Situation normale

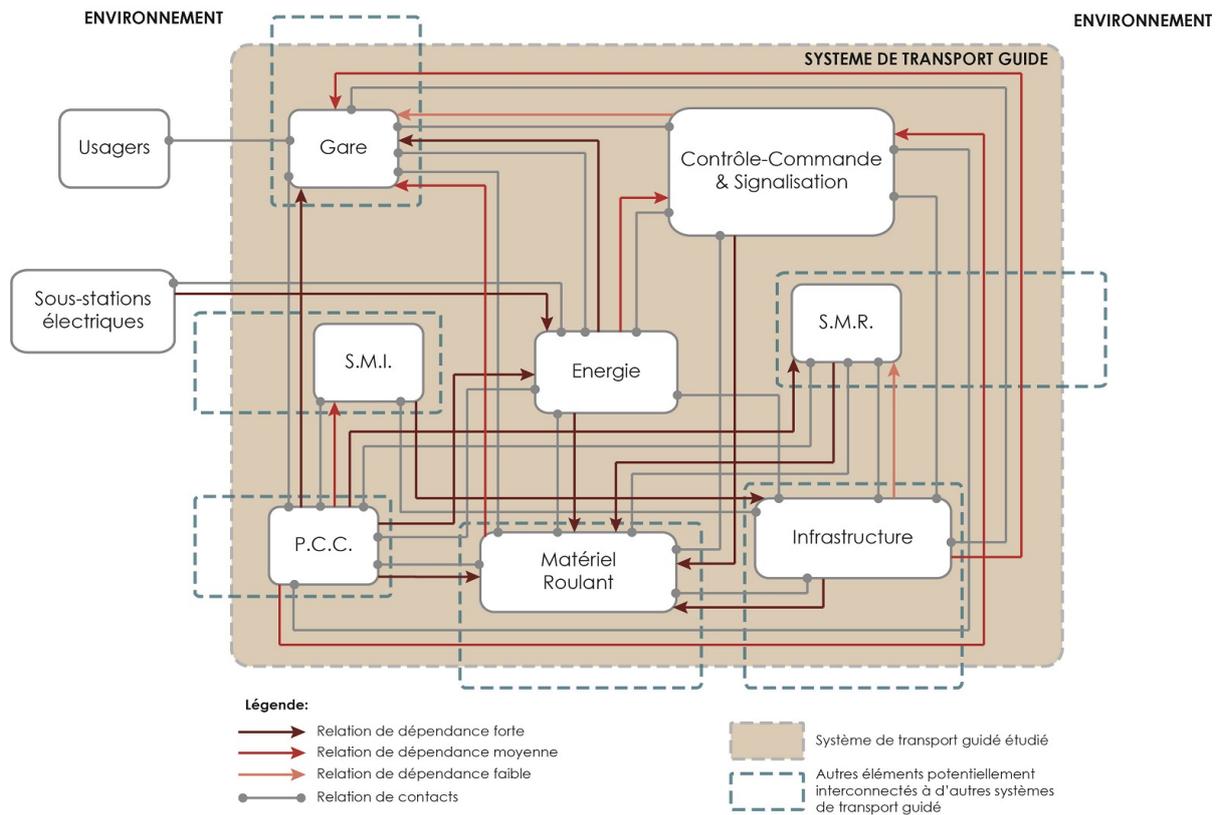


FIGURE B.1 – Bloc-Diagramme Fonctionnel d'un système de transport guidé **aérien**, en **surface** et en **souterrain**, en situation **normale**

B.1.2 Situation de crise

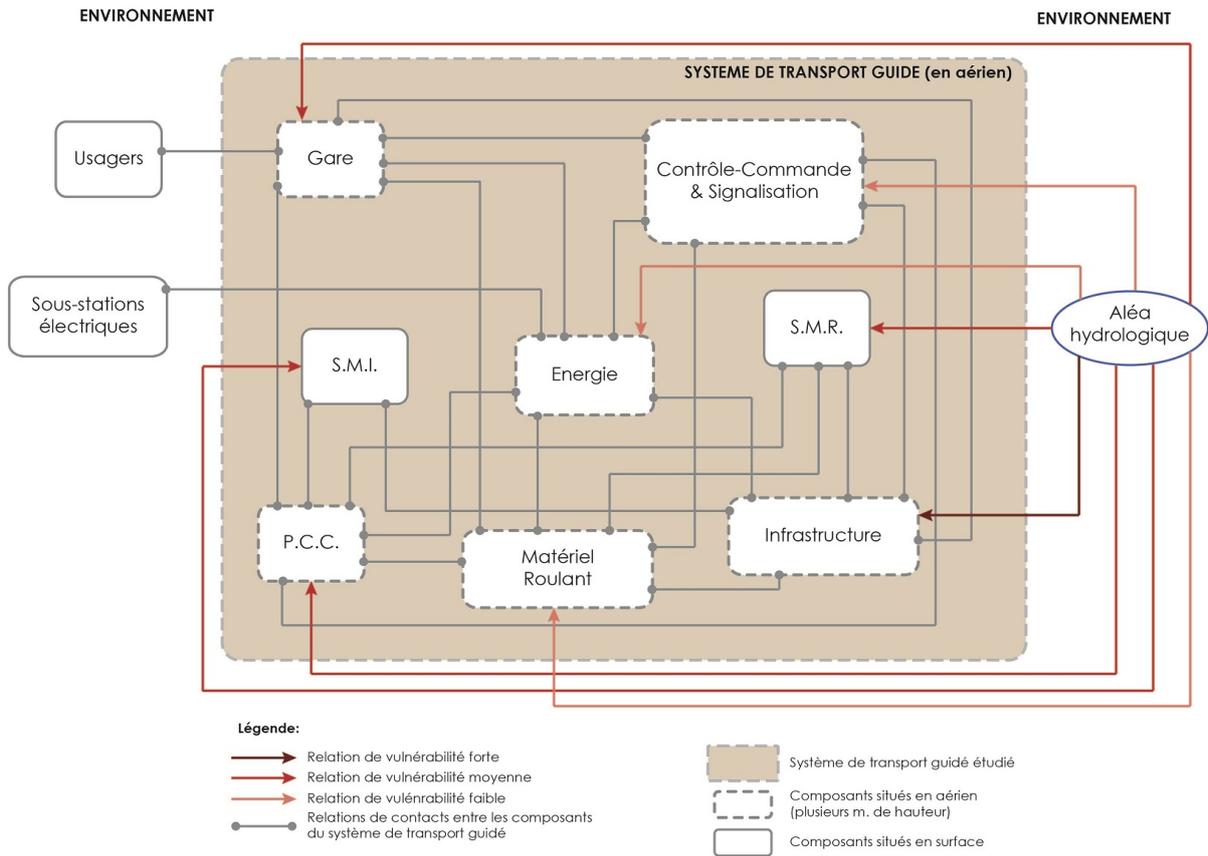


FIGURE B.2 – Bloc-Diagramme Fonctionnel d'un système de transport guidé **aérien** en situation de **crise**, lors d'une inondation

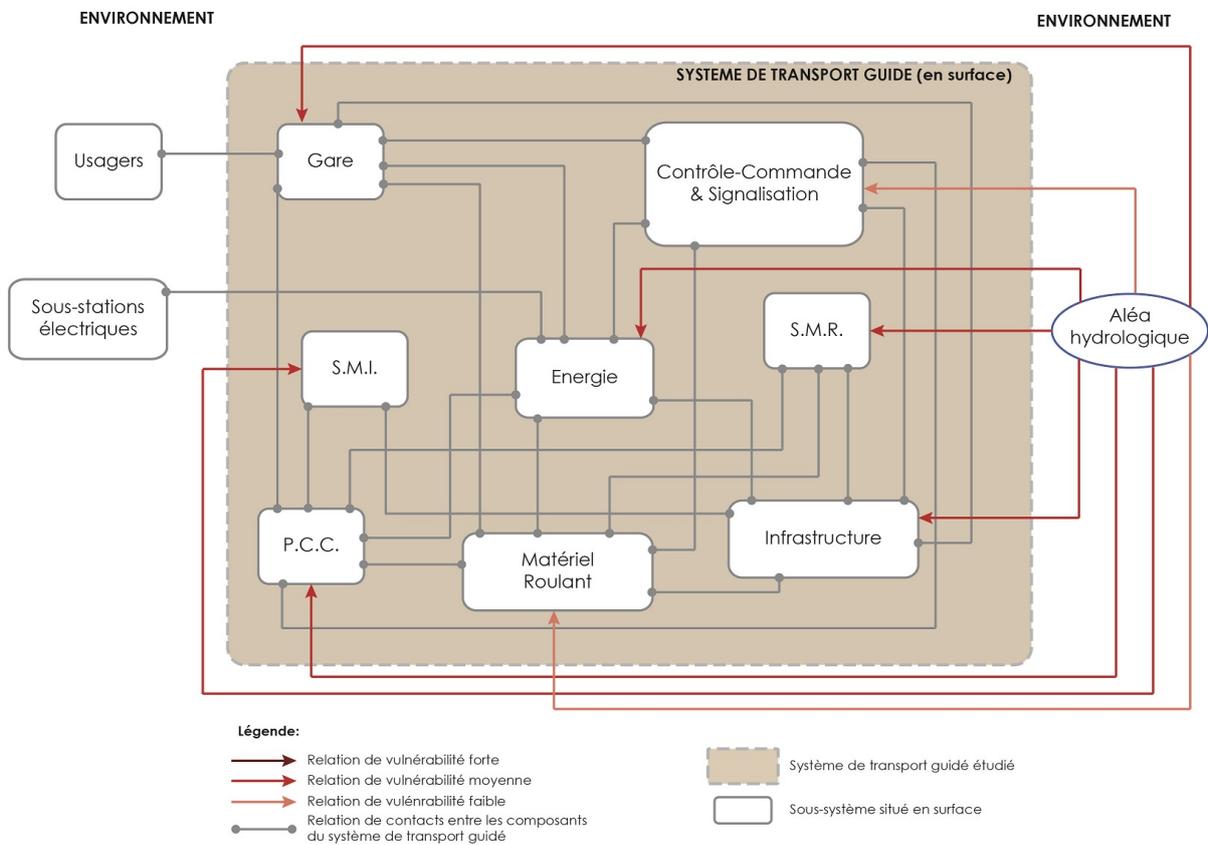


FIGURE B.3 – Bloc-Diagramme Fonctionnel d'un système de transport guidé en **surface** en situation de **crise**, lors d'une inondation

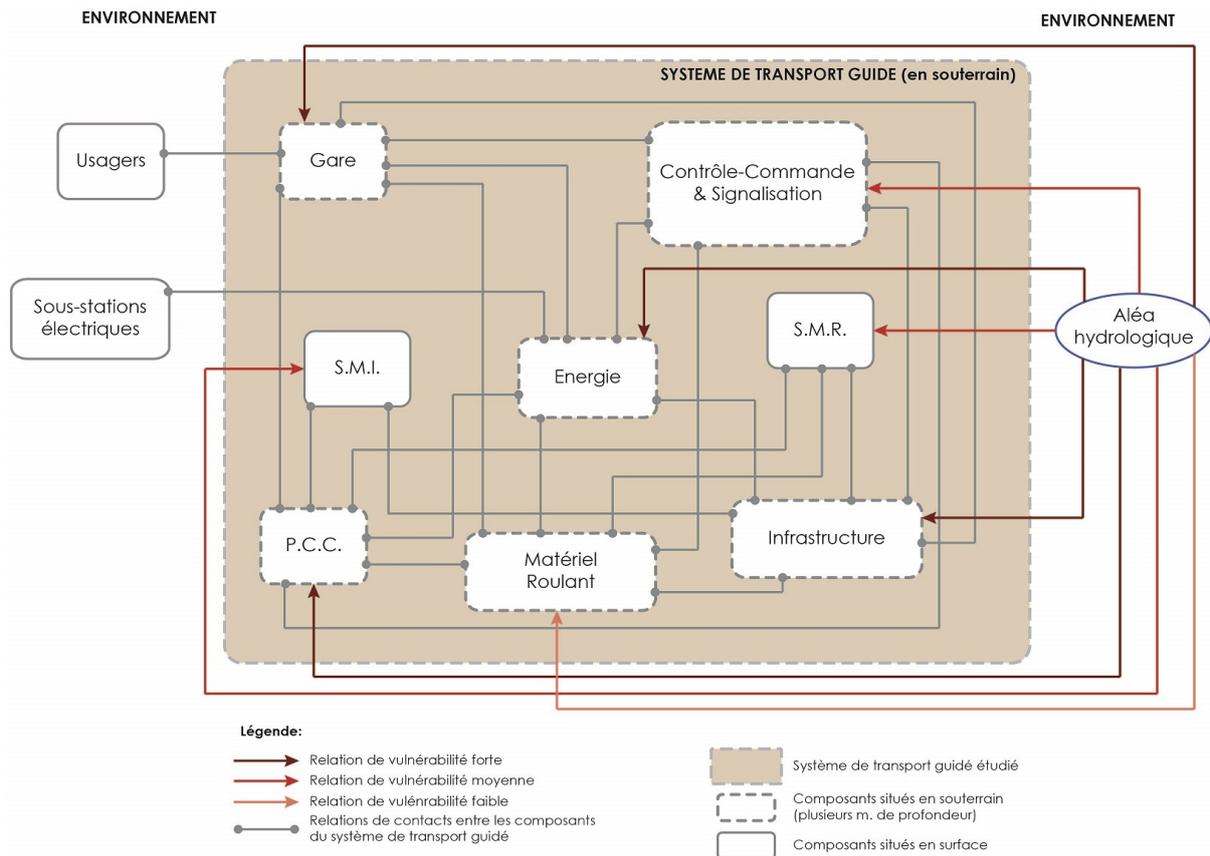


FIGURE B.4 – Bloc-Diagramme Fonctionnel d'un système de transport guidé **souterrain** en situation de **crise**, lors d'une inondation

B.2 Tableaux d'AMDE

L'AMDE est réalisée avec une granularité liée au composant du système de transport guidé. Synthétisés sous forme de tableau, les résultats de l'AMDE listent : les **composants** un à un, avec un **identifiant**, le **sous-système** dans lequel il est inclus, les **fonctions** et **sous-fonctions** numérotées que ce composant assure, ses **modes de défaillance** qui correspondent à la non réalisation de ses fonctions suite à un aléa, les événements qui ont **causé** la survenue de ces modes de défaillance et, enfin, les **effets** sur l'ensemble du système de la dysfonction de ce composant.

Afin de déterminer les spécificités propres aux trois configurations d'implantation étudiées dans cette recherche, **trois AMDE** sont réalisées et présentées ci-dessous.

B.2.1 AMDE d'un système de transport guidé aérien

Sous-système	Composant	N° Fonction	N° composant	Fonction	Défaillance	Causes	Effets
Energie (A)	Ligne aérienne de contact	1	En_A_1	(i) Assurer la continuité fonctionnelle	La fonction	Perturbation dans l'alimentation électrique	Perturbation de la circulation ferroviaire
		1	En_A_1			Interruption de l'alimentation électrique	Interruption de la circulation ferroviaire
		2	En_A_1	(ii) Permettre le bon fonctionnement des composants situés en aval d'un composant donné	La fonction	Endommagement de la LAC	Perturbation dans l'alimentation électrique
		2	En_A_1			Rupture de la LAC	Interruption de l'alimentation électrique
		2	En_A_1			Court-circuit	Perturbation dans l'alimentation électrique
		2	En_A_1			Court-circuit	Interruption de l'alimentation électrique
		3	En_A_1	(iii) Résister aux flux hydrauliques	La fonction	Inclinaison importante du pylône	Endommagement de la LAC
		3	En_A_1			Inclinaison importante du pylône	Rupture de la LAC
		3	En_A_1			Inclinaison importante du pylône	Court-circuit
		3	En_A_1			Chute du pylône	Endommagement de la LAC
		3	En_A_1			Chute du pylône	Rupture de la LAC
		3	En_A_1			Chute du pylône	Court-circuit
	3	En_A_1	Résister aux forces mécaniques exercées par le pylône				
	Rail conducteur latéral ("troisième rail")	4	En_A_2	(i) Assurer la continuité fonctionnelle	La fonction	Perturbation dans l'alimentation électrique	Perturbation de la circulation ferroviaire
		4	En_A_2			Assurer la distribution de l'énergie électrique de traction	Interruption de l'alimentation électrique
		5	En_A_2	(ii) Permettre le bon fonctionnement des composants situés en aval d'un composant donné	La fonction	Endommagement du 3ème rail	Perturbation dans l'alimentation électrique
		5	En_A_2			Rupture du 3ème rail	Interruption de l'alimentation électrique
		5	En_A_2			Submersion du 3ème rail	Perturbation dans l'alimentation électrique
		5	En_A_2			Submersion du 3ème rail	Interruption de l'alimentation électrique
		6	En_A_2	(iii) Résister aux flux hydrauliques	La fonction	Débit trop grand	Endommagement du 3ème rail
		6	En_A_2			Débit trop grand	Rupture du 3ème rail
		6	En_A_2			Débit trop grand	Submersion du 3ème rail
		6	En_A_2			Hauteur d'eau trop grande	Endommagement du 3ème rail
		6	En_A_2			Hauteur d'eau trop grande	Rupture du 3ème rail
		6	En_A_2			Hauteur d'eau trop grande	Submersion du 3ème rail
		6	En_A_2			Durée d'immersion trop grande	Endommagement du 3ème rail
		6	En_A_2			Durée d'immersion trop grande	Rupture du 3ème rail
		6	En_A_2			Durée d'immersion trop grande	Submersion du 3ème rail
		6	En_A_2			Charriage d'éléments massifs par la crue	Endommagement du 3ème rail
		6	En_A_2			Charriage d'éléments massifs par la crue	Rupture du 3ème rail
		6	En_A_2			Composition physico-chimique agressive de l'eau	Endommagement du 3ème rail
	Pylônes et fondations	7	En_A_3	(i) Assurer la continuité fonctionnelle	La fonction	Inclinaison importante du pylône	Endommagement de la LAC
		7	En_A_3			Assurer le support physique de la LAC	Rupture de la LAC
		7	En_A_3			Inclinaison importante du pylône	Court-circuit
		7	En_A_3			Chute du pylône	Endommagement de la LAC
		7	En_A_3			Chute du pylône	Rupture de la LAC
		7	En_A_3			Chute du pylône	Court-circuit
		8	En_A_3	(iii) Résister aux flux hydrauliques	La fonction	Débit trop grand	Inclinaison importante du pylône
		8	En_A_3			Débit trop grand	Chute du pylône
		8	En_A_3			Hauteur d'eau trop grande	Inclinaison importante du pylône
		8	En_A_3			Hauteur d'eau trop grande	Chute du pylône
		8	En_A_3			Durée d'immersion trop grande	Inclinaison importante du pylône
8		En_A_3	Durée d'immersion trop grande			Chute du pylône	
8	En_A_3	Charriage d'éléments massifs par la crue	Inclinaison importante du pylône				
8	En_A_3	Charriage d'éléments massifs par la crue	Chute du pylône				
	9	I_A_1	(i) Assurer la continuité fonctionnelle	La fonction	Submersion partielle des rails	Perturbation de la circulation ferroviaire	
	9	I_A_1			Submersion partielle des rails	Mise en danger des usagers	
	9	I_A_1			Endommagement des rails	Perturbation de la circulation ferroviaire	
	9	I_A_1			Endommagement des rails	Mise en danger des usagers	
	9	I_A_1			Submersion totale des rails	Interruption de la circulation ferroviaire	
	9	I_A_1			Submersion totale des rails	Mise en danger des usagers	

Sous-système	Composant	N° Fonction	N° composant	Fonction	Défaillance	Causes	Effets
	Rails	9	I_A_1			Présence d'obstacles	Interruption de la circulation ferroviaire
		9	I_A_1			Présence d'obstacles	Mise en danger des usagers
		10	I_A_1	(ii) Permettre le bon fonctionnement des composants situés en aval d'un composant donné Assurer le circuit de retour du courant de traction (via les rails de roulement)	La fonction	Submersion partielle des rails	Perturbation de la circulation ferroviaire
		10	I_A_1			Submersion totale des rails	Interruption de la circulation ferroviaire
		11	I_A_1	(iii) Résister aux flux hydrauliques Résister à la composition physico-chimique spécifique de l'eau	La fonction	Débit trop grand	Submersion partielle des rails
		11	I_A_1			Débit trop grand	Submersion totale des rails
		11	I_A_1			Hauteur d'eau trop grande	Submersion partielle des rails
		11	I_A_1			Hauteur d'eau trop grande	Submersion totale des rails
		11	I_A_1			Durée d'immersion trop grande	Submersion partielle des rails
		11	I_A_1			Durée d'immersion trop grande	Submersion totale des rails
		11	I_A_1			Composition physico-chimique agressive de l'eau	Endommagement des rails
	11	I_A_1	Charriage d'éléments massifs par la crue			Présence d'obstacles	
	Traverses et supports de voie	12	I_A_2	(i) Assurer la continuité fonctionnelle Permettre la circulation du matériel roulant Assurer l'ancrage de la voie dans le ballast	La fonction	Dislocation de la voie ferrée	Interruption de la circulation ferroviaire
		12	I_A_2			Dislocation de la voie ferrée	Mise en danger des usagers
		12	I_A_2			Présence d'obstacles	Perturbation de la circulation ferroviaire
		12	I_A_2			Présence d'obstacles	Mise en danger des usagers
		13	I_A_2	(ii) Permettre le bon fonctionnement des composants situés en aval d'un composant donné Transmettre et répartir les efforts au ballast et à la plate-forme Maintenir un écartement constant entre les deux files de rail	La fonction	Submersion des traverses et supports de voie	Dislocation de la voie ferrée
		13	I_A_2			Endommagement des traverses et supports de voie	Dislocation de la voie ferrée
		13	I_A_2			Emportement des traverses et supports de voie	Dislocation de la voie ferrée
		14	I_A_2	(iii) Résister aux flux hydrauliques Résister à la composition physico-chimique spécifique de l'eau	La fonction	Débit trop grand	Submersion des traverses et supports de voie
		14	I_A_2			Débit trop grand	Endommagement des traverses et supports de voie
		14	I_A_2			Débit trop grand	Emportement des traverses et supports de voie
		14	I_A_2			Hauteur d'eau trop grande	Submersion des traverses et supports de voie
		14	I_A_2			Hauteur d'eau trop grande	Endommagement des traverses et supports de voie
		14	I_A_2			Hauteur d'eau trop grande	Emportement des traverses et supports de voie
		14	I_A_2			Durée d'immersion trop grande	Submersion des traverses et supports de voie
		14	I_A_2			Durée d'immersion trop grande	Endommagement des traverses et supports de voie
	14	I_A_2	Durée d'immersion trop grande			Emportement des traverses et supports de voie	
	14	I_A_2	Composition physico-chimique agressive de l'eau			Endommagement des traverses et supports de voie	
	14	I_A_2	Charriage d'éléments massifs par la crue			Présence d'obstacles	
	Appareils de voie	15	I_A_3	(i) Assurer la continuité fonctionnelle Assurer la circulation des flux d'usagers	La fonction	Fonctionnement de l'appareil de voie en voie principale ou en voie déviée	Perturbation de la circulation ferroviaire
		15	I_A_3			Dysfonctionnement total de l'appareil de voie	Interruption de la circulation ferroviaire
		15	I_A_3			Présence d'obstacles	Perturbation de la circulation ferroviaire
15		I_A_3	Présence d'obstacles			Interruption de la circulation ferroviaire	
16		I_A_3	(ii) Permettre le bon fonctionnement des composants situés en aval d'un composant donné Permettre le changement de voie du matériel roulant (bifurcation)	La fonction	Submersion des appareils de voie	Fonctionnement de l'appareil de voie en voie principale ou en voie déviée	
16		I_A_3			Submersion des appareils de voie	Dysfonctionnement total de l'appareil de voie	
17		I_A_3	(iii) Résister aux flux hydrauliques Résister aux chocs et endommagements dus aux embâcles	La fonction	Débit trop grand	Submersion des appareils de voie	
17		I_A_3			Hauteur d'eau trop grande	Submersion des appareils de voie	
17		I_A_3			Durée d'immersion trop grande	Submersion des appareils de voie	
17		I_A_3			Composition physico-chimique agressive de l'eau	Fonctionnement de l'appareil de voie en voie principale ou en voie déviée	
17		I_A_3			Composition physico-chimique agressive de l'eau	Dysfonctionnement total de l'appareil de voie	
17		I_A_3			Charriage d'éléments massifs par la crue	Fonctionnement de l'appareil de voie en voie principale ou en voie déviée	
17	I_A_3	Charriage d'éléments massifs par la crue			Dysfonctionnement total de l'appareil de voie		

Sous-système	Composant	N° Fonction	N° composant	Fonction	Défaillance	Causes	Effets
	Ballast (cas de voie ballastée)	18	I_A_4	(i) Assurer la continuité fonctionnelle Permettre la stabilité de circulation du matériel roulant	La fonction	Dislocation de la voie ferrée	Mise en danger des usagers
		18	I_A_4			Dislocation de la voie ferrée	Interruption de la circulation ferroviaire
		19	I_A_4	(ii) Permettre le bon fonctionnement des composants situés en aval d'un composant donné Répartir les charges sur la plate-forme Immobiliser les traverses dans leur position Assurer le drainage des eaux zénales	La fonction	Emportement du ballast	Dislocation de la voie ferrée
		19	I_A_4			Submersion du ballast	Dislocation de la voie ferrée
		19	I_A_4				
		19	I_A_4				
		19	I_A_4				
		20	I_A_4	(iii) Résister aux flux hydrauliques Résister aux pressions hydromécaniques exercées par la crue	La fonction	Débit trop grand	Emportement du ballast
		20	I_A_4			Débit trop grand	Submersion du ballast
		20	I_A_4			Hauteur d'eau trop grande	Emportement du ballast
		20	I_A_4			Hauteur d'eau trop grande	Submersion du ballast
		20	I_A_4			Durée d'immersion trop grande	Emportement du ballast
		20	I_A_4			Durée d'immersion trop grande	Submersion du ballast
	20	I_A_4	Charriage d'éléments massifs par la crue			Emportement du ballast	
	20	I_A_4					
	Quais	21	I_A_5	(i) Assurer la continuité fonctionnelle Assurer la circulation des flux d'usagers	La fonction	Accès au matériel roulant perturbé pour les usagers	Mise en danger des usagers
		21	I_A_5			Accès au matériel roulant perturbé pour les usagers	Perturbation de la mobilité des usagers
		22	I_A_5	(ii) Permettre le bon fonctionnement des composants situés en aval d'un composant donné Permettre aux usagers l'accès au matériel roulant et aux gares	La fonction	Submersion des quais	Accès au matériel roulant perturbé pour les usagers
		22	I_A_5			Endommagement des quais	Accès au matériel roulant perturbé pour les usagers
		23	I_A_5	(iii) Résister aux flux hydrauliques Eviter la submersion Résister aux pressions hydromécaniques exercées par la crue Résister aux chocs et endommagements dus aux embâcles	La fonction	Inondation de la gare	Submersion des quais
		23	I_A_5			Inondation de la gare	Endommagement des quais
		23	I_A_5			Charriage d'éléments massifs par la crue	Présence d'obstacles
		23	I_A_5				
		24	I_A_5	(iv) Limiter la circulation des flux hydrauliques au sein du système Limiter la circulation des flux hydrauliques vers les autres composants de l'infrastructure	La fonction	Submersion des quais	Endommagement des rails
		24	I_A_5			Submersion des quais	Endommagement des traverses et supports de voie
		24	I_A_5			Submersion des quais	Dysfonctionnement total de l'appareil de voie
		24	I_A_5			Submersion des quais	Emportement du ballast
		24	I_A_5			Submersion des quais	Endommagement du 3ème rail
		24	I_A_5			Submersion des quais	Endommagement des détecteurs de signalisation
		24	I_A_5			Submersion des quais	Endommagement des moteurs d'ADV
		24	I_A_5			Submersion des quais	Endommagement des câbles de signalisation
		24	I_A_5			Submersion des quais	Endommagement des câbles en gare
	24	I_A_5	Submersion des quais			Présence d'obstacles	
	25	I_A_6	(i) Assurer la continuité fonctionnelle Assurer la circulation des flux d'usagers	La fonction	Perturbation de la circulation ferroviaire	Perturbation de la mobilité des usagers	
	25	I_A_6			Interruption de la circulation ferroviaire	Perturbation de la mobilité des usagers	
	26	I_A_6	(ii) Permettre le bon fonctionnement des composants situés en aval d'un composant donné Assurer le support de composants d'un système de transport guidé	La fonction	Mauvaise ancrage au sol de l'ouvrage d'art par érosion/affouillement des piles	Perturbation de la circulation ferroviaire	
	26	I_A_6			Mauvaise ancrage au sol de l'ouvrage d'art par érosion/affouillement des piles	Interruption de la circulation ferroviaire	
	26	I_A_6			Mauvaise ancrage au sol de l'ouvrage d'art par érosion/affouillement des piles	Mise en danger des usagers	
	27	I_A_6	(iii) Résister aux flux hydrauliques Résister aux pressions hydromécaniques exercées par la crue au niveau des piles des ouvrages d'art (érosion, affouillement...)	La fonction	Débit trop grand	Mauvaise ancrage au sol de l'ouvrage d'art par érosion/affouillement des piles	
	27	I_A_6			Hauteur d'eau trop grande	Mauvaise ancrage au sol de l'ouvrage d'art par érosion/affouillement des piles	
	27	I_A_6			Durée d'immersion trop grande	Mauvaise ancrage au sol de l'ouvrage d'art par érosion/affouillement des piles	
	27	I_A_6			Composition physico-chimique agressive de l'eau	Mauvaise ancrage au sol de l'ouvrage d'art par érosion/affouillement des piles	
	27	I_A_6			Charriage d'éléments massifs par la crue	Mauvaise ancrage au sol de l'ouvrage d'art par érosion/affouillement des piles	

Sous-système	Composant	N° Fonction	N° composant	Fonction	Défaillance	Causes	Effets	
Infrastructure (A)	Ouvrage d'art (pont, viaduc, estacade...)	27	I_A_6			Ouvrage d'art vieillissant et vétuste	Mauvaise ancrage au sol de l'ouvrage d'art par érosion/affouillement des piles	
		28	I_A_6	(iv) Limiter la circulation des flux hydrauliques au sein du système Contenir la circulation des flux hydrauliques sur le linéaire de voies le plus court possible Préserver les composants ferroviaires des atteintes de la crue (énergie...)	La fonction	Mauvaise ancrage au sol de l'ouvrage d'art par érosion/affouillement des piles	Endommagement des rails	
		28	I_A_6			Mauvaise ancrage au sol de l'ouvrage d'art par érosion/affouillement des piles	Endommagement des traverses et supports de voie	
		28	I_A_6			Mauvaise ancrage au sol de l'ouvrage d'art par érosion/affouillement des piles	Dysfonctionnement total de l'appareil de voie	
		28	I_A_6			Mauvaise ancrage au sol de l'ouvrage d'art par érosion/affouillement des piles	Emportement du ballast	
		28	I_A_6			Mauvaise ancrage au sol de l'ouvrage d'art par érosion/affouillement des piles	Endommagement du 3ème rail	
		28	I_A_6			Mauvaise ancrage au sol de l'ouvrage d'art par érosion/affouillement des piles	Chute du pylône	
		28	I_A_6			Mauvaise ancrage au sol de l'ouvrage d'art par érosion/affouillement des piles	Endommagement des détecteurs de signalisation	
		28	I_A_6			Mauvaise ancrage au sol de l'ouvrage d'art par érosion/affouillement des piles	Endommagement des moteurs d'ADV	
		28	I_A_6			Mauvaise ancrage au sol de l'ouvrage d'art par érosion/affouillement des piles	Endommagement des câbles de signalisation	
		28	I_A_6			Mauvaise ancrage au sol de l'ouvrage d'art par érosion/affouillement des piles	Endommagement de la gare	
		28	I_A_6			Mauvaise ancrage au sol de l'ouvrage d'art par érosion/affouillement des piles	Endommagement de la salle d'exploitation	
		28	I_A_6			Mauvaise ancrage au sol de l'ouvrage d'art par érosion/affouillement des piles	Endommagement des quais	
		28	I_A_6			Mauvaise ancrage au sol de l'ouvrage d'art par érosion/affouillement des piles	Endommagement de l'ouvrage hydraulique	
	28	I_A_6	Mauvaise ancrage au sol de l'ouvrage d'art par érosion/affouillement des piles			Endommagement du matériel roulant		
			29	I_A_7	(i) Assurer la continuité fonctionnelle Assurer la stabilité et pérennité des équipements ferroviaires	La fonction	Submersion de la voie ferrée	Perturbation de la circulation ferroviaire
			29	I_A_7			Submersion de la voie ferrée	Interruption de la circulation ferroviaire
			29	I_A_7			Submersion de la voie ferrée	Mise en danger des usagers
			30	I_A_7	(iii) Résister aux flux hydrauliques Assurer le drainage des eaux pluviales (et de ruissellement) Résister au poids de l'accumulation des eaux	La fonction	Débit trop grand	Submersion de la voie ferrée
			30	I_A_7			Débit trop grand	Bouchage de l'ouvrage par des éléments charriés
			30	I_A_7			Débit trop grand	Endommagement de l'ouvrage hydraulique
			30	I_A_7			Hauteur d'eau trop grande	Submersion de la voie ferrée
			30	I_A_7			Hauteur d'eau trop grande	Bouchage de l'ouvrage par des éléments charriés
			30	I_A_7			Hauteur d'eau trop grande	Endommagement de l'ouvrage hydraulique
			30	I_A_7			Durée d'immersion trop grande	Submersion de la voie ferrée
			30	I_A_7			Durée d'immersion trop grande	Bouchage de l'ouvrage par des éléments charriés
			30	I_A_7			Durée d'immersion trop grande	Endommagement de l'ouvrage hydraulique
			30	I_A_7			Charriage d'éléments massifs par la crue	Submersion de la voie ferrée
			30	I_A_7			Charriage d'éléments massifs par la crue	Bouchage de l'ouvrage par des éléments charriés
			30	I_A_7			Charriage d'éléments massifs par la crue	Endommagement de l'ouvrage hydraulique
			30	I_A_7			Composition physico-chimique agressive de l'eau	Submersion de la voie ferrée
			30	I_A_7			Composition physico-chimique agressive de l'eau	Bouchage de l'ouvrage par des éléments charriés
			30	I_A_7			Composition physico-chimique agressive de l'eau	Endommagement de l'ouvrage hydraulique
		30	I_A_7	Sous-dimensionnement de l'ouvrage hydraulique			Submersion de la voie ferrée	

Sous-système	Composant	N° Fonction	N° composant	Fonction	Défaillance	Causes	Effets
	Ouvrage hydraulique (tuyaux de drainage)	30	I_A_7	(iv) Limiter la circulation des flux hydrauliques au sein du système Préserver les composants ferroviaires des atteintes de la crue (infrastructure...)	La fonction	Sous-dimensionnement de l'ouvrage hydraulique	Bouchage de l'ouvrage par des éléments charriés
		30	I_A_7			Sous-dimensionnement de l'ouvrage hydraulique	Endommagement de l'ouvrage hydraulique
		31	I_A_7			Endommagement de l'ouvrage hydraulique	Endommagement des rails
		31	I_A_7			Endommagement de l'ouvrage hydraulique	Endommagement des traverses et supports de voie
		31	I_A_7			Endommagement de l'ouvrage hydraulique	Dysfonctionnement total de l'appareil de voie
		31	I_A_7			Endommagement de l'ouvrage hydraulique	Emportement du ballast
		31	I_A_7			Endommagement de l'ouvrage hydraulique	Endommagement du 3ème rail
		31	I_A_7			Endommagement de l'ouvrage hydraulique	Inclinaison importante du pylône
		31	I_A_7			Endommagement de l'ouvrage hydraulique	Chute du pylône
		31	I_A_7			Endommagement de l'ouvrage hydraulique	Endommagement des détecteurs de signalisation
		31	I_A_7			Endommagement de l'ouvrage hydraulique	Endommagement des moteurs d'ADV
		31	I_A_7			Endommagement de l'ouvrage hydraulique	Endommagement des câbles de signalisation
		31	I_A_7			Endommagement de l'ouvrage hydraulique	Inondation de la gare
		31	I_A_7			Sous-dimensionnement de l'ouvrage hydraulique	Endommagement des rails
		31	I_A_7			Sous-dimensionnement de l'ouvrage hydraulique	Endommagement des traverses et supports de voie
		31	I_A_7			Sous-dimensionnement de l'ouvrage hydraulique	Dysfonctionnement total de l'appareil de voie
		31	I_A_7			Sous-dimensionnement de l'ouvrage hydraulique	Emportement du ballast
		31	I_A_7			Sous-dimensionnement de l'ouvrage hydraulique	Endommagement du 3ème rail
		31	I_A_7			Sous-dimensionnement de l'ouvrage hydraulique	Inclinaison importante du pylône
		31	I_A_7			Sous-dimensionnement de l'ouvrage hydraulique	Chute du pylône
		31	I_A_7			Sous-dimensionnement de l'ouvrage hydraulique	Endommagement des détecteurs de signalisation
		31	I_A_7			Sous-dimensionnement de l'ouvrage hydraulique	Endommagement des moteurs d'ADV
		31	I_A_7			Sous-dimensionnement de l'ouvrage hydraulique	Endommagement des câbles de signalisation
		31	I_A_7			Sous-dimensionnement de l'ouvrage hydraulique	Inondation de la gare
		31	I_A_7			Bouchage de l'ouvrage par des éléments charriés	Endommagement des rails
		31	I_A_7			Bouchage de l'ouvrage par des éléments charriés	Endommagement des traverses et supports de voie
		31	I_A_7			Bouchage de l'ouvrage par des éléments charriés	Dysfonctionnement total de l'appareil de voie
		31	I_A_7			Bouchage de l'ouvrage par des éléments charriés	Emportement du ballast
		31	I_A_7			Bouchage de l'ouvrage par des éléments charriés	Endommagement du 3ème rail
		31	I_A_7			Bouchage de l'ouvrage par des éléments charriés	Inclinaison importante du pylône
		31	I_A_7			Bouchage de l'ouvrage par des éléments charriés	Chute du pylône
		31	I_A_7			Bouchage de l'ouvrage par des éléments charriés	Endommagement des détecteurs de signalisation

Sous-système	Composant	N° Fonction	N° composant	Fonction	Défaillance	Causes	Effets
		31	I_A_7			Bouchage de l'ouvrage par des éléments charriés	Endommagement des moteurs d'ADV
		31	I_A_7			Bouchage de l'ouvrage par des éléments charriés	Endommagement des câbles de signalisation
		31	I_A_7			Bouchage de l'ouvrage par des éléments charriés	Inondation de la gare
	Radier ferroviaire (cas de voie bétonnée)	32	I_A_8	(i) Assurer la continuité fonctionnelle Permettre la stabilité de circulation du matériel roulant	La fonction	Endommagement de la dalle ferroviaire	Mise en danger des usagers
		32	I_A_8			Endommagement de la dalle ferroviaire	Perturbation de la circulation ferroviaire
		32	I_A_8			Casse de la dalle ferroviaire	Mise en danger des usagers
		32	I_A_8	(ii) Permettre le bon fonctionnement des composants situés en aval d'un composant donné Assurer le support de composants d'un système de transport guidé	La fonction	Casse de la dalle ferroviaire	Interruption de la circulation ferroviaire
		33	I_A_8			Débit trop grand	Endommagement de la dalle ferroviaire
		33	I_A_8			Débit trop grand	Casse de la dalle ferroviaire
		33	I_A_8			Hauteur d'eau trop grande	Endommagement de la dalle ferroviaire
		33	I_A_8			Hauteur d'eau trop grande	Casse de la dalle ferroviaire
		33	I_A_8			Durée d'immersion trop grande	Endommagement de la dalle ferroviaire
		33	I_A_8			Durée d'immersion trop grande	Casse de la dalle ferroviaire
		33	I_A_8			Ouvrage d'art vieillissant et vétuste	Endommagement de la dalle ferroviaire
		33	I_A_8			Ouvrage d'art vieillissant et vétuste	Casse de la dalle ferroviaire
		33	I_A_8			Charriage d'éléments massifs par la crue	Endommagement de la dalle ferroviaire
		33	I_A_8			Charriage d'éléments massifs par la crue	Casse de la dalle ferroviaire
		33	I_A_8			Composition physico-chimique agressive de l'eau	Endommagement de la dalle ferroviaire
		33	I_A_8			Composition physico-chimique agressive de l'eau	Casse de la dalle ferroviaire
		33	I_A_8			Mauvaise ancrage au sol de l'ouvrage d'art par érosion/affouillement des piles	Endommagement de la dalle ferroviaire
		33	I_A_8			Mauvaise ancrage au sol de l'ouvrage d'art par érosion/affouillement des piles	Casse de la dalle ferroviaire
		34	I_A_8	(iii) Résister aux flux hydrauliques Résister aux pressions hydromécaniques exercées par la crue Eviter la submersion	La fonction	Endommagement de la dalle ferroviaire	Endommagement des rails
		34	I_A_8			Endommagement de la dalle ferroviaire	Endommagement des traverses et supports de voie
		34	I_A_8			Endommagement de la dalle ferroviaire	Dysfonctionnement total de l'appareil de voie
		34	I_A_8			Endommagement de la dalle ferroviaire	Emportement du ballast
		34	I_A_8			Endommagement de la dalle ferroviaire	Endommagement du 3ème rail
		34	I_A_8			Endommagement de la dalle ferroviaire	Inclinaison importante du pylône
		34	I_A_8			Endommagement de la dalle ferroviaire	Chute du pylône
		34	I_A_8			Endommagement de la dalle ferroviaire	Endommagement des détecteurs de signalisation
		34	I_A_8			Endommagement de la dalle ferroviaire	Endommagement des moteurs d'ADV
		34	I_A_8			Endommagement de la dalle ferroviaire	Endommagement des câbles de signalisation
		34	I_A_8			Casse de la dalle ferroviaire	Endommagement des rails
		34	I_A_8			Casse de la dalle ferroviaire	Endommagement des traverses et supports de voie
		34	I_A_8			Casse de la dalle ferroviaire	Dysfonctionnement total de l'appareil de voie
		34	I_A_8			Casse de la dalle ferroviaire	Emportement du ballast
		34	I_A_8			Casse de la dalle ferroviaire	Endommagement du 3ème rail
	34	I_A_8	Casse de la dalle ferroviaire			Inclinaison importante du pylône	
	34	I_A_8	Casse de la dalle ferroviaire			Chute du pylône	
	34	I_A_8	Casse de la dalle ferroviaire			Endommagement des détecteurs de signalisation	
	34	I_A_8	Casse de la dalle ferroviaire	Endommagement des moteurs d'ADV			
	34	I_A_8	Casse de la dalle ferroviaire	Endommagement des câbles de signalisation			
	(A)		35	MR_A	(i) Assurer la continuité fonctionnelle Permettre le transport des flux d'usagers	La fonction	Endommagement du matériel roulant
35			MR_A	Endommagement du matériel roulant			Perturbation de la circulation ferroviaire
35			MR_A	(iii) Résister aux flux hydrauliques Résister aux pressions hydromécaniques exercées par la crue		Endommagement du matériel roulant	Interruption de la circulation ferroviaire
36			MR_A			Débit trop grand	Inondation du matériel roulant
36			MR_A			Hauteur d'eau trop grande	Inondation du matériel roulant

Sous-système	Composant	N° Fonction	N° composant	Fonction	Défaillance	Causes	Effets	
Matériel Roulant	Matériel roulant	36	MR_A	Résister aux chocs et endommagements dus aux embâcles Résister à la composition physico-chimique spécifique de l'eau Eviter la submersion	La fonction	Durée d'immersion trop grande	Inondation du matériel roulant	
		36	MR_A			Charriage d'éléments massifs par la crue	Endommagement du matériel roulant	
		36	MR_A			Composition physico-chimique agressive de l'eau	Endommagement du matériel roulant	
		36	MR_A			Submersion des quais	Inondation du matériel roulant	
		36	MR_A			Inondation de la gare	Inondation du matériel roulant	
		37	MR_A	(iv) Limiter la circulation des flux hydrauliques au sein du système	La fonction	Inondation du matériel roulant	Endommagement des composants "bord" de contrôle-commande et signalisation	
		37	MR_A	Limiter l'atteinte par les flux hydrauliques des composants situés à l'intérieur du matériel roulant (CC&S...)		Inondation du matériel roulant	Endommagement du matériel roulant	
C-C & Signalisation (A)	Composants de contrôle-commande et signalisation « bord » (ERTMS, ETCS...)	38	CCS_A_1	(i) Assurer la continuité fonctionnelle	La fonction	Perturbation de la signalisation ferroviaire	Mise en danger des usagers	
		38	CCS_A_1			Perturbation de la signalisation ferroviaire	Perturbation de la circulation ferroviaire	
		38	CCS_A_1	Assurer une gestion sûre et optimisée de l'exploitation du système de transport guidé		Perturbation de la signalisation ferroviaire	Interruption de la circulation ferroviaire	
		39	CCS_A_1	(ii) Permettre le bon fonctionnement des composants situés en aval d'un composant donné	La fonction	Endommagement des composants "bord" de contrôle-commande et signalisation	Perturbation de la signalisation ferroviaire	
		39	CCS_A_1	Permettre une circulation sûre et optimisée du matériel roulant				
		40	CCS_A_1	(iii) Résister aux flux hydrauliques	La fonction	Inondation du matériel roulant	Endommagement des composants "bord" de contrôle-commande et signalisation	
	40	CCS_A_1	Résister aux pressions hydromécaniques exercées par la crue	Composition physico-chimique agressive de l'eau		Endommagement des composants "bord" de contrôle-commande et signalisation		
	Composants de contrôle-commande et signalisation « sol » : détecteurs (prises d'informations, balises,...)	41	CCS_A_2	(i) Assurer la continuité fonctionnelle	La fonction	Perturbation de la signalisation ferroviaire	Mise en danger des usagers	
		41	CCS_A_2			Perturbation de la signalisation ferroviaire	Perturbation de la circulation ferroviaire	
		41	CCS_A_2	Assurer une gestion sûre et optimisée des itinéraires		Perturbation de la signalisation ferroviaire	Interruption de la circulation ferroviaire	
		42	CCS_A_2	(ii) Permettre le bon fonctionnement des composants situés en aval d'un composant donné	La fonction	Endommagement des détecteurs de signalisation	Perturbation de la signalisation ferroviaire	
		42	CCS_A_2	Permettre une circulation sûre et optimisée du matériel roulant				
		43	CCS_A_2	(iii) Résister aux flux hydrauliques	La fonction	Débit trop grand	Endommagement des détecteurs de signalisation	
		43	CCS_A_2			Résister aux pressions hydromécaniques exercées par la crue	Hauteur d'eau trop grande	Endommagement des détecteurs de signalisation
		43	CCS_A_2			Résister aux chocs et endommagements dus aux embâcles	Durée d'immersion trop grande	Endommagement des détecteurs de signalisation
	43	CCS_A_2	Résister à la composition physico-chimique spécifique de l'eau		Charriage d'éléments massifs par la crue	Endommagement des détecteurs de signalisation		
	44	CCS_A_2			Composition physico-chimique agressive de l'eau	Endommagement des détecteurs de signalisation		
	44	CCS_A_2	(iv) Limiter la circulation des flux hydrauliques au sein du système	La fonction	Endommagement des détecteurs de signalisation	Remontée partielle d'informations au PCC		
	44	CCS_A_2	Préserver les composants ferroviaires des atteintes de la crue (énergie...)		Endommagement des détecteurs de signalisation	Remontée nulle d'informations au PCC		
	Composants de contrôle-commande et signalisation « sol » : mécanismes d'ADV (moteur, informations de position,...)	45	CCS_A_3	(i) Assurer la continuité fonctionnelle	La fonction	Interruption de la circulation ferroviaire	Perturbation de la mobilité des usagers	
		45	CCS_A_3			Assurer une gestion sûre des itinéraires	Interruption de la circulation ferroviaire	Mise en danger des usagers
		45	CCS_A_3			Perturbation de la circulation ferroviaire	Perturbation de la mobilité des usagers	
		45	CCS_A_3			Perturbation de la circulation ferroviaire	Mise en danger des usagers	
		46	CCS_A_3	(ii) Permettre le bon fonctionnement des composants situés en aval d'un composant donné	La fonction	Endommagement des moteurs d'ADV	Interruption de la circulation ferroviaire	
46		CCS_A_3	Permettre le changement de voie sûr et optimisé du matériel roulant (bifurcation)	Endommagement des moteurs d'ADV		Perturbation de la circulation ferroviaire		
47		CCS_A_3	(iii) Résister aux flux hydrauliques	La fonction	Débit trop grand	Endommagement des moteurs d'ADV		
47		CCS_A_3			Résister aux pressions hydromécaniques exercées par la crue	Hauteur d'eau trop grande	Endommagement des moteurs d'ADV	
47		CCS_A_3			Résister aux chocs et endommagements dus aux embâcles	Durée d'immersion trop grande	Endommagement des moteurs d'ADV	
47		CCS_A_3	Résister à la composition physico-chimique spécifique de l'eau		Composition physico-chimique agressive de l'eau	Endommagement des moteurs d'ADV		
47	CCS_A_3			Composition physico-chimique agressive de l'eau	Endommagement des moteurs d'ADV			
47	CCS_A_3	Eviter la submersion		Charriage d'éléments massifs par la crue	Endommagement des moteurs d'ADV			

Sous-système	Composant	N° Fonction	N° composant	Fonction	Défaillance	Causes	Effets		
Composants de contrôle-commande et signalisation « sol » : câbles (transmission, remontées d'informations, ...)		48	CCS_A_3	(iv) Limiter la circulation des flux hydrauliques au sein du système	La fonction	Endommagement des moteurs d'ADV	Fonctionnement de l'appareil de voie en voie principale ou en voie déviée		
		48	CCS_A_3	Préserver les composants ferroviaires des atteintes de la crue (énergie...)		Endommagement des moteurs d'ADV	Dysfonctionnement total de l'appareil de voie		
		48	CCS_A_3			Endommagement des moteurs d'ADV	Remontée partielle d'informations au PCC		
		48	CCS_A_3			Endommagement des moteurs d'ADV	Remontée nulle d'informations au PCC		
		(i) Assurer la continuité fonctionnelle Assurer une gestion sûre et optimisée de l'exploitation du système de transport guidé	49	CCS_A_4	La fonction	Perturbation de la circulation ferroviaire	Mise en danger des usagers		
			49	CCS_A_4		Perturbation de la circulation ferroviaire	Perturbation de la mobilité des usagers		
			49	CCS_A_4		Perturbation de la signalisation ferroviaire	Mise en danger des usagers		
			49	CCS_A_4		Perturbation de la signalisation ferroviaire	Perturbation de la mobilité des usagers		
			49	CCS_A_4		Interruption de la circulation ferroviaire	Mise en danger des usagers		
			49	CCS_A_4		Interruption de la circulation ferroviaire	Perturbation de la mobilité des usagers		
			(ii) Permettre le bon fonctionnement des composants situés en aval d'un composant donné Permettre une circulation sûre et optimisée du matériel roulant	50		CCS_A_4	La fonction	Endommagement des câbles de signalisation	Perturbation de la circulation ferroviaire
				50		CCS_A_4		Endommagement des câbles de signalisation	Interruption de la circulation ferroviaire
		50		CCS_A_4	Endommagement des câbles de signalisation	Perturbation de la signalisation ferroviaire			
		51		CCS_A_4	(iii) Résister aux flux hydrauliques Résister aux pressions hydromécaniques exercées par la crue Résister aux chocs et endommagements dus aux embâcles	Débit trop grand		Endommagement des câbles de signalisation	
		51	CCS_A_4	Hauteur d'eau trop grande		Endommagement des câbles de signalisation			
		51	CCS_A_4	Durée d'immersion trop grande		Endommagement des câbles de signalisation			
		51	CCS_A_4	Composition physico-chimique agressive de l'eau		Endommagement des câbles de signalisation			
			Résister à la composition physico-chimique spécifique de l'eau	51	CCS_A_4	La fonction	Composition physico-chimique agressive de l'eau	Endommagement des câbles de signalisation	
				51	CCS_A_4		Composition physico-chimique agressive de l'eau	Endommagement des câbles de signalisation	
				51	CCS_A_4		Charriage d'éléments massifs par la crue	Endommagement des câbles de signalisation	
52	CCS_A_4			(iv) Limiter la circulation des flux hydrauliques au sein du système Préserver les composants ferroviaires des atteintes de la crue (énergie...)	Endommagement des câbles de signalisation		Remontée partielle d'informations au PCC		
52	CCS_A_4	Endommagement des câbles de signalisation	Remontée nulle d'informations au PCC						
Espaces d'accès		53	G_A_1	(i) Assurer la continuité fonctionnelle Assurer l'interface entre le système de transport guidé et les autres composants urbains	La fonction	Perturbation de la circulation ferroviaire	Perturbation de la mobilité des usagers		
		53	G_A_1			Interruption de la circulation ferroviaire	Perturbation de la mobilité des usagers		
		(ii) Permettre le bon fonctionnement des composants situés en aval d'un composant donné Assurer l'accès des flux d'usagers aux quais	54	G_A_1	La fonction	Inondation de la gare	Accès au matériel roulant perturbé pour les usagers		
			54	G_A_1		Endommagement de la gare	Perturbation de la circulation ferroviaire		
			54	G_A_1		Endommagement de la gare	Interruption de la circulation ferroviaire		
			55	G_A_1		(iii) Résister aux flux hydrauliques Résister aux pressions hydromécaniques exercées par la crue Résister aux chocs et endommagements dus aux embâcles Résister à la composition physico-chimique spécifique de l'eau	Débit trop grand	Inondation de la gare	
		55	G_A_1	Hauteur d'eau trop grande	Inondation de la gare				
		55	G_A_1	Durée d'immersion trop grande	Inondation de la gare				
		55	G_A_1	Charriage d'éléments massifs par la crue	Endommagement de la gare				
			Eviter la submersion	55	G_A_1	La fonction	Composition physico-chimique agressive de l'eau	Endommagement de la gare	
	55			G_A_1	Résister aux flux d'infiltrations d'eau de pluie		Gare implantée en zone inondable	Inondation de la gare	
	56			G_A_1	(iv) Limiter la circulation des flux hydrauliques au sein du système Préserver les composants ferroviaires des atteintes de la crue (énergie...)		Inondation de la gare	Submersion des quais	
	56			G_A_1			Inondation de la gare	Inondation du matériel roulant	
	Electromécanismes (ascenseurs,		57	G_A_2	(i) Assurer la continuité fonctionnelle Assurer la circulation des flux d'usagers	La fonction	Accès au matériel roulant perturbé pour les usagers	Mise en danger des usagers	
			57	G_A_2			Accès au matériel roulant perturbé pour les usagers	Perturbation de la mobilité des usagers	
			(ii) Permettre le bon fonctionnement des composants situés en aval d'un composant donné Permettre aux usagers l'accès aux quais	58	G_A_2	La fonction	Endommagement des électromécanismes	Accès au matériel roulant perturbé pour les usagers	
				58	G_A_2		Inondation de la gare	Accès au matériel roulant perturbé pour les usagers	
			(iii) Résister aux flux hydrauliques Résister aux pressions hydromécaniques exercées par la crue Résister aux chocs et endommagements dus aux embâcles Résister à la composition physico-chimique spécifique de l'eau	59	G_A_2	La fonction	Débit trop grand	Endommagement des électromécanismes	
59				G_A_2	Hauteur d'eau trop grande		Endommagement des électromécanismes		
59				G_A_2	Durée d'immersion trop grande		Endommagement des électromécanismes		
59				G_A_2	Charriage d'éléments massifs par la crue		Endommagement des électromécanismes		

Sous-système	Composant	N° Fonction	N° composant	Fonction	Défaillance	Causes	Effets
Gares (A)	escaliers mécaniques)	59	G_A_2	Eviter la submersion	La fonction	Composition physico-chimique agressive de l'eau	Endommagement des électromécanismes
		59	G_A_2	Résister aux flux d'infiltrations d'eau de pluie		Gare implantée en zone inondable	Endommagement des électromécanismes
		59	G_A_2			Débit trop grand	Inondation de la gare
		59	G_A_2			Hauteur d'eau trop grande	Inondation de la gare
		59	G_A_2			Durée d'immersion trop grande	Inondation de la gare
		60	G_A_2	(iv) Limiter la circulation des flux hydrauliques au sein du système Préserver les composants ferroviaires des atteintes de la crue (énergie...)		Inondation de la gare	Submersion des quais
		60	G_A_2			Inondation de la gare	Endommagement des quais
		60	G_A_2			Inondation de la gare	Submersion des câbles en gare
		60	G_A_2			Inondation de la gare	Endommagement des câbles en gare
	Câbles en gare	61	G_A_3	(i) Assurer la continuité fonctionnelle Assurer une gestion sûre et optimisée de l'exploitation du système de transport guidé	La fonction	Perturbation de la circulation ferroviaire	Mise en danger des usagers
		61	G_A_3			Perturbation de la circulation ferroviaire	Perturbation de la mobilité des usagers
		61	G_A_3			Perturbation de la signalisation ferroviaire	Mise en danger des usagers
		61	G_A_3			Perturbation de la signalisation ferroviaire	Perturbation de la mobilité des usagers
		61	G_A_3			Interruption de la circulation ferroviaire	Mise en danger des usagers
		61	G_A_3			Interruption de la circulation ferroviaire	Perturbation de la mobilité des usagers
		62	G_A_3	(ii) Permettre le bon fonctionnement des composants situés en aval d'un composant donné Permettre une circulation sûre et optimisée du matériel roulant	La fonction	Endommagement des câbles en gare	Perturbation de la circulation ferroviaire
		62	G_A_3			Endommagement des câbles en gare	Interruption de la circulation ferroviaire
		62	G_A_3			Endommagement des câbles en gare	Perturbation de la signalisation ferroviaire
		63	G_A_3	(iii) Résister aux flux hydrauliques Résister aux pressions hydromécaniques exercées par la crue Résister aux chocs et endommagements dus aux embâcles Résister à la composition physico-chimique spécifique de l'eau Eviter la submersion	La fonction	Débit trop grand	Endommagement des câbles en gare
						Hauteur d'eau trop grande	Endommagement des câbles en gare
						Durée d'immersion trop grande	Endommagement des câbles en gare
						Charriage d'éléments massifs par la crue	Endommagement des câbles en gare
						Composition physico-chimique agressive de l'eau	Endommagement des câbles en gare
						Gare implantée en zone inondable	Endommagement des câbles en gare
Endommagement des câbles en gare	Remontée partielle d'informations au PCC						
64	G_A_3	(iv) Limiter la circulation des flux hydrauliques au sein du système Préserver les composants ferroviaires des atteintes de la crue (énergie...)	La fonction	Endommagement des câbles en gare	Remontée nulle d'informations au PCC		
64	G_A_3			Endommagement des câbles en gare	Remontée nulle d'informations au PCC		
SMR (S)	Ensemble "remisage" (de trains voyageurs)	65	SMR_1	(i) Assurer la continuité fonctionnelle Assurer la disponibilité du système de transport guidé	La fonction	Indisponibilité du matériel roulant	Perturbation de la mobilité des usagers
		65	SMR_1				
		66	SMR_1	(ii) Permettre le bon fonctionnement des composants situés en aval d'un composant donné Assurer le remisage du matériel roulant	La fonction	Inondation du bâtiment de maintenance	Indisponibilité du matériel roulant
		66	SMR_1			Inondation du matériel roulant	Indisponibilité du matériel roulant
		67	SMR_1	(iii) Résister aux flux hydrauliques Résister aux pressions hydromécaniques exercées par la crue Résister aux chocs et endommagements dus aux embâcles Résister à la composition physico-chimique spécifique de l'eau Eviter la submersion	La fonction	Débit trop grand	Inondation du bâtiment de maintenance
		67	SMR_1			Débit trop grand	Endommagement du bâtiment de maintenance
		67	SMR_1			Hauteur d'eau trop grande	Inondation du bâtiment de maintenance
		67	SMR_1			Hauteur d'eau trop grande	Endommagement du bâtiment de maintenance
		67	SMR_1			Durée d'immersion trop grande	Inondation du bâtiment de maintenance
		67	SMR_1			Durée d'immersion trop grande	Endommagement du bâtiment de maintenance
		67	SMR_1			Charriage d'éléments massifs par la crue	Endommagement du matériel roulant
		67	SMR_1	Composition physico-chimique agressive de l'eau	Endommagement du bâtiment de maintenance		
		67	SMR_1	Site de maintenance implanté en zone inondable	Inondation du bâtiment de maintenance		
		68	SMR_1	(iv) Limiter la circulation des flux hydrauliques au sein du système Préserver le parc de matériel roulant remisé des atteintes de la crue	La fonction	Inondation du bâtiment de maintenance	Inondation du matériel roulant
68	SMR_1	Inondation du bâtiment de maintenance	Infiltration des eaux de la crue				
69	SMR_2	(i) Assurer la continuité fonctionnelle Assurer l'exploitation du système de transport guidé	La fonction	Indisponibilité du matériel roulant	Perturbation de la mobilité des usagers		
				Perturbation de l'activité de maintenance	Perturbation de la circulation ferroviaire		
70	SMR_2	(ii) Permettre le bon fonctionnement des composants situés en aval d'un composant donné Assurer la maintenance du matériel roulant	La fonction	Inondation du bâtiment de maintenance	Indisponibilité du matériel roulant		
				Inondation du bâtiment de maintenance	Perturbation de l'activité de maintenance		
71	SMR_2	(iii) Résister aux flux hydrauliques		Débit trop grand	Inondation du bâtiment de maintenance		

Sous-système	Composant	N° Fonction	N° composant	Fonction	Défaillance	Causes	Effets		
	Ensemble "maintenance" (de trains voyageurs)	71	SMR_2	Résister aux pressions hydromécaniques exercées par la crue Résister aux chocs et endommagements dus aux embâcles Résister à la composition physico-chimique spécifique de l'eau Eviter la submersion	La fonction	Débit trop grand	Endommagement du bâtiment de maintenance		
		71	SMR_2			Hauteur d'eau trop grande	Inondation du bâtiment de maintenance		
		71	SMR_2			Hauteur d'eau trop grande	Endommagement du bâtiment de maintenance		
		71	SMR_2			Durée d'immersion trop grande	Inondation du bâtiment de maintenance		
		71	SMR_2			Durée d'immersion trop grande	Endommagement du bâtiment de maintenance		
		71	SMR_2			Charriage d'éléments massifs par la crue	Endommagement du matériel roulant		
		71	SMR_2			Composition physico-chimique agressive de l'eau	Endommagement du bâtiment de maintenance		
		71	SMR_2			Site de maintenance implanté en zone inondable	Inondation du bâtiment de maintenance		
		72	SMR_2	(iv) Limiter la circulation des flux hydrauliques au sein du système	La fonction	Inondation du bâtiment de maintenance	Endommagement des composants de l'atelier de maintenance (machines-outils et stocks)		
72	SMR_2	Préserver les composants de l'atelier de maintenance (machines-outils et stocks) des atteintes de la crue	Inondation du bâtiment de maintenance	Infiltration des eaux de la crue					
SMI (S)	Ensemble "remisage" (de trains de travaux)	73	SMI_1	(i) Assurer la continuité fonctionnelle Assurer la disponibilité du système de transport guidé	La fonction	Indisponibilité des trains de travaux	Perturbation de la circulation ferroviaire		
		73	SMI_1			Perturbation de l'activité de maintenance	Interruption de la circulation ferroviaire		
		74	SMI_1	(ii) Permettre le bon fonctionnement des composants situés en aval d'un composant donné Assurer le remisage des trains de travaux	La fonction	Inondation du bâtiment de maintenance	Indisponibilité des trains de travaux		
		74	SMI_1			Inondation des trains de travaux	Indisponibilité des trains de travaux		
		75	SMI_1	(iii) Résister aux flux hydrauliques Résister aux pressions hydromécaniques exercées par la crue Résister aux chocs et endommagements dus aux embâcles Résister à la composition physico-chimique spécifique de l'eau Eviter la submersion	La fonction	Débit trop grand	Inondation du bâtiment de maintenance		
		75	SMI_1			Débit trop grand	Endommagement du bâtiment de maintenance		
		75	SMI_1			Hauteur d'eau trop grande	Inondation du bâtiment de maintenance		
		75	SMI_1			Hauteur d'eau trop grande	Endommagement du bâtiment de maintenance		
		75	SMI_1			Durée d'immersion trop grande	Inondation du bâtiment de maintenance		
		75	SMI_1			Durée d'immersion trop grande	Endommagement du bâtiment de maintenance		
		75	SMI_1			Charriage d'éléments massifs par la crue	Endommagement des trains de travaux		
		75	SMI_1			Composition physico-chimique agressive de l'eau	Endommagement du bâtiment de maintenance		
	75	SMI_1	Site de maintenance implanté en zone inondable	Inondation du bâtiment de maintenance					
	76	SMI_1	(iv) Limiter la circulation des flux hydrauliques au sein du système Préserver le parc de trains de travaux remisés des atteintes de la crue	La fonction	Inondation du bâtiment de maintenance	Inondation des trains de travaux			
	76	SMI_1			Inondation du bâtiment de maintenance	Infiltration des eaux de la crue			
	Ensemble "maintenance" (des équipements fixes)	Ensemble "remisage" (de trains de travaux)	77	SMI_2	(i) Assurer la continuité fonctionnelle Assurer l'exploitation du système de transport guidé	La fonction	Indisponibilité des trains de travaux	Perturbation de la circulation ferroviaire	
			77	SMI_2			Perturbation de l'activité de maintenance	Interruption de la circulation ferroviaire	
			78	SMI_2	(ii) Permettre le bon fonctionnement des composants situés en aval d'un composant donné Assurer la maintenance des équipements fixes du système de transport guidé	La fonction	Inondation du bâtiment de maintenance	Indisponibilité des trains de travaux	
		78	SMI_2	Inondation du bâtiment de maintenance			Perturbation de l'activité de maintenance		
		Ensemble "maintenance" (des équipements fixes)	Ensemble "remisage" (de trains de travaux)	79	SMI_2	(iii) Résister aux flux hydrauliques Résister aux pressions hydromécaniques exercées par la crue Résister aux chocs et endommagements dus aux embâcles Résister à la composition physico-chimique spécifique de l'eau Eviter la submersion	La fonction	Débit trop grand	Inondation du bâtiment de maintenance
				79	SMI_2			Débit trop grand	Endommagement du bâtiment de maintenance
				79	SMI_2			Hauteur d'eau trop grande	Inondation du bâtiment de maintenance
				79	SMI_2			Hauteur d'eau trop grande	Endommagement du bâtiment de maintenance
				79	SMI_2			Durée d'immersion trop grande	Inondation du bâtiment de maintenance
				79	SMI_2			Durée d'immersion trop grande	Endommagement du bâtiment de maintenance
79				SMI_2	Charriage d'éléments massifs par la crue			Endommagement du bâtiment de maintenance	
79				SMI_2	Composition physico-chimique agressive de l'eau			Endommagement du bâtiment de maintenance	
79		SMI_2	Site de maintenance implanté en zone inondable	Inondation du bâtiment de maintenance					
80	SMI_2	(iv) Limiter la circulation des flux hydrauliques au sein du système Préserver les composants de l'atelier de maintenance (machines-outils et stocks) des atteintes de la crue	La fonction	Inondation du bâtiment de maintenance	Endommagement des composants de l'atelier de maintenance (machines-outils et stocks)				
80	SMI_2			Inondation du bâtiment de maintenance	Infiltration des eaux de la crue				
		81	PCC_A_1	(i) Assurer la continuité fonctionnelle		Inondation de la salle d'exploitation	Perturbation de la circulation ferroviaire		

Sous-système	Composant	N° Fonction	N° composant	Fonction	Défaillance	Causes	Effets	
PCC (A)	Salle d'exploitation	81	PCC_A_1	Assurer l'exploitation du système de transport guidé	La fonction	Inondation de la salle d'exploitation	Interruption de la circulation ferroviaire	
		81	PCC_A_1			Remontée partielle d'informations au PCC	Perturbation de la circulation ferroviaire	
		81	PCC_A_1			Remontée partielle d'informations au PCC	Interruption de la circulation ferroviaire	
		81	PCC_A_1			Remontée nulle d'informations au PCC	Perturbation de la circulation ferroviaire	
		81	PCC_A_1			Remontée nulle d'informations au PCC	Interruption de la circulation ferroviaire	
		82	PCC_A_1	(ii) Permettre le bon fonctionnement des composants situés en aval d'un composant donné	Assurer le commandement des différents sous-systèmes	La fonction	Inondation de la salle d'exploitation	Accès au matériel roulant perturbé pour les usagers
		82	PCC_A_1				Inondation de la salle d'exploitation	Perturbation dans l'alimentation électrique
		82	PCC_A_1				Inondation de la salle d'exploitation	Perturbation de la signalisation ferroviaire
		82	PCC_A_1	(iii) Résister aux flux hydrauliques	Résister aux flux d'infiltrations d'eau de pluie Résister aux pressions hydromécaniques exercées par la crue Résister aux chocs et endommagements dus aux embâcles Résister à la composition physico-chimique spécifique de l'eau Eviter la submersion	La fonction	Inondation de la salle d'exploitation	Perturbation de l'activité de maintenance
		83	PCC_A_1				Débit trop grand	Inondation de la salle d'exploitation
		83	PCC_A_1				Débit trop grand	Endommagement de la salle d'exploitation
		83	PCC_A_1				Hauteur d'eau trop grande	Inondation de la salle d'exploitation
		83	PCC_A_1				Hauteur d'eau trop grande	Endommagement de la salle d'exploitation
		83	PCC_A_1				Durée d'immersion trop grande	Inondation de la salle d'exploitation
		83	PCC_A_1				Durée d'immersion trop grande	Endommagement de la salle d'exploitation
		83	PCC_A_1				Charriage d'éléments massifs par la crue	Endommagement de la salle d'exploitation
		83	PCC_A_1				Composition physico-chimique agressive de l'eau	Endommagement de la salle d'exploitation
		83	PCC_A_1				Batiment de commandement implanté en zone inondable	Inondation de la salle d'exploitation
	83	PCC_A_1	Batiment de commandement implanté en zone inondable				Inondation de la salle d'exploitation	
	83	PCC_A_1	Batiment de commandement implanté en zone inondable				Inondation de la salle d'exploitation	
	Câbles du PCC	84	PCC_A_2	(i) Assurer la continuité fonctionnelle	Assurer l'exploitation du système de transport guidé	La fonction	Perturbation de la circulation ferroviaire	Mise en danger des usagers
		84	PCC_A_2				Interruption de la circulation ferroviaire	Mise en danger des usagers
		84	PCC_A_2				Perturbation de la circulation ferroviaire	Perturbation de la mobilité des usagers
		84	PCC_A_2				Interruption de la circulation ferroviaire	Perturbation de la mobilité des usagers
		85	PCC_A_2	(ii) Permettre le bon fonctionnement des composants situés en aval d'un composant donné	Assurer le commandement des différents sous-systèmes	La fonction	Endommagement des câbles du PCC	Perturbation de la circulation ferroviaire
		85	PCC_A_2				Endommagement des câbles du PCC	Interruption de la circulation ferroviaire
		86	PCC_A_2	(iii) Résister aux flux hydrauliques	Résister aux flux d'infiltrations d'eau de pluie Résister aux pressions hydromécaniques exercées par la crue Résister aux chocs et endommagements dus aux embâcles Résister à la composition physico-chimique spécifique de l'eau Eviter la submersion	La fonction	Débit trop grand	Endommagement des câbles du PCC
		86	PCC_A_2				Hauteur d'eau trop grande	Endommagement des câbles du PCC
		86	PCC_A_2				Durée d'immersion trop grande	Endommagement des câbles du PCC
		86	PCC_A_2				Charriage d'éléments massifs par la crue	Endommagement des câbles du PCC
86		PCC_A_2	Composition physico-chimique agressive de l'eau				Endommagement des câbles du PCC	
86		PCC_A_2	Batiment de commandement implanté en zone inondable				Endommagement des câbles du PCC	
87	PCC_A_2	(iv) Limiter la circulation des flux hydrauliques au sein du système	Préserver les composants ferroviaires des atteintes de la crue (énergie...)	La fonction	Endommagement des câbles du PCC	Perturbation dans l'alimentation électrique		
87	PCC_A_2				Endommagement des câbles du PCC	Perturbation de la signalisation ferroviaire		
87	PCC_A_2				Endommagement des câbles du PCC	Accès au matériel roulant perturbé pour les usagers		
87	PCC_A_2				Endommagement des câbles du PCC	Perturbation de l'activité de maintenance		

B.2.2 AMDE d'un système de transport guidé en surface

Sous-système	Composant	N° Fonction	N° composant	Fonction	Défaillance	Causes	Effets
Energie (S)	Ligne aérienne de contact	1	En_S_1	(i) Assurer la continuité fonctionnelle Permettre la circulation du matériel roulant	La fonction	Perturbation dans l'alimentation électrique	Perturbation de la circulation ferroviaire
		1	En_S_1			Interruption de l'alimentation électrique	Interruption de la circulation ferroviaire
		2	En_S_1	(ii) Permettre le bon fonctionnement des composants situés en aval d'un composant donné Apporter l'énergie électrique de traction au matériel roulant	La fonction	Endommagement de la LAC	Perturbation dans l'alimentation électrique
		2	En_S_1			Rupture de la LAC	Interruption de l'alimentation électrique
		2	En_S_1			Court-circuit	Perturbation dans l'alimentation électrique
		2	En_S_1	(iii) Résister aux flux hydrauliques Résister aux forces mécaniques exercées par le pylône	La fonction	Court-circuit	Interruption de l'alimentation électrique
		3	En_S_1			Inclinaison importante du pylône	Endommagement de la LAC
		3	En_S_1			Inclinaison importante du pylône	Rupture de la LAC
		3	En_S_1			Inclinaison importante du pylône	Court-circuit
		3	En_S_1			Chute du pylône	Endommagement de la LAC
	3	En_S_1	Chute du pylône			Rupture de la LAC	
	3	En_S_1	Chute du pylône	La fonction	Court-circuit	Court-circuit	
	3	En_S_1			Chute du pylône	Court-circuit	
	Rail conducteur latéral ("troisième rail")	10	En_S_2	(i) Assurer la continuité fonctionnelle	La fonction	Perturbation dans l'alimentation électrique	Perturbation de la circulation ferroviaire
		10	En_S_2			Interruption de l'alimentation électrique	Interruption de la circulation ferroviaire
		11	En_S_2	(ii) Permettre le bon fonctionnement des composants situés en aval d'un composant donné Apporter l'énergie électrique de traction au matériel roulant	La fonction	Endommagement du 3ème rail	Perturbation dans l'alimentation électrique
		11	En_S_2			Rupture du 3ème rail	Interruption de l'alimentation électrique
		11	En_S_2			Submersion du 3ème rail	Perturbation dans l'alimentation électrique
		11	En_S_2			Submersion du 3ème rail	Interruption de l'alimentation électrique
		12	En_S_2	(iii) Résister aux flux hydrauliques Résister aux pressions hydromécaniques exercées par la crue Résister aux chocs et endommagements dus aux embâcles Résister à la composition physico-chimique spécifique de l'eau	La fonction	Débit trop grand	Endommagement du 3ème rail
		12	En_S_2			Débit trop grand	Rupture du 3ème rail
		12	En_S_2			Débit trop grand	Submersion du 3ème rail
		12	En_S_2			Hauteur d'eau trop grande	Endommagement du 3ème rail
		12	En_S_2			Hauteur d'eau trop grande	Rupture du 3ème rail
		12	En_S_2			Hauteur d'eau trop grande	Submersion du 3ème rail
		12	En_S_2			Durée d'immersion trop grande	Endommagement du 3ème rail
		12	En_S_2			Durée d'immersion trop grande	Rupture du 3ème rail
		12	En_S_2			Durée d'immersion trop grande	Submersion du 3ème rail
		12	En_S_2			Charriage d'éléments massifs par la crue	Endommagement du 3ème rail
		12	En_S_2	Charriage d'éléments massifs par la crue	Rupture du 3ème rail		
		12	En_S_2	Composition physico-chimique agressive de l'eau	Endommagement du 3ème rail		
	Pylônes et fondations	4	En_S_3	(i) Assurer la continuité fonctionnelle Assurer le support physique de la LAC	La fonction	Inclinaison importante du pylône	Endommagement de la LAC
		4	En_S_3			Inclinaison importante du pylône	Rupture de la LAC
		4	En_S_3			Inclinaison importante du pylône	Court-circuit
4		En_S_3	Chute du pylône			Endommagement de la LAC	
4		En_S_3	Chute du pylône			Rupture de la LAC	
4		En_S_3	(iii) Résister aux flux hydrauliques Résister aux pressions hydromécaniques exercées par la crue (érosion, afouillement...) Résister aux chocs et endommagements dus aux embâcles	La fonction	Chute du pylône	Court-circuit	
5		En_S_3			Débit trop grand	Inclinaison importante du pylône	
5		En_S_3			Débit trop grand	Chute du pylône	
5		En_S_3			Hauteur d'eau trop grande	Inclinaison importante du pylône	
5		En_S_3			Hauteur d'eau trop grande	Chute du pylône	
5	En_S_3	Durée d'immersion trop grande	Inclinaison importante du pylône				
5	En_S_3	Durée d'immersion trop grande	Chute du pylône				
5	En_S_3	Charriage d'éléments massifs par la crue	Inclinaison importante du pylône				
5	En_S_3	Charriage d'éléments massifs par la crue	Chute du pylône				
		6	I_S_1	(i) Assurer la continuité fonctionnelle Permettre la circulation du matériel roulant	La fonction	Submersion partielle des rails	Perturbation de la circulation ferroviaire
		6	I_S_1			Submersion partielle des rails	Mise en danger des usagers
		6	I_S_1			Endommagement des rails	Perturbation de la circulation ferroviaire
		6	I_S_1			Endommagement des rails	Mise en danger des usagers
		6	I_S_1			Submersion totale des rails	Interruption de la circulation ferroviaire
		6	I_S_1			Submersion totale des rails	Mise en danger des usagers
		6	I_S_1			Présence d'obstacles	Interruption de la circulation ferroviaire
		6	I_S_1			Présence d'obstacles	Mise en danger des usagers

Sous-système	Composant	N° Fonction	N° composant	Fonction	Défaillance	Causes	Effets
	Rails	7	I_S_1	(ii) Permettre le bon fonctionnement des composants situés en aval d'un composant donné	La fonction	Submersion partielle des rails	Perturbation de la circulation ferroviaire
		7	I_S_1	Assurer le circuit de retour du courant de traction (via les rails de roulement)		Submersion totale des rails	Interruption de la circulation ferroviaire
		8	I_S_1	(iii) Résister aux flux hydrauliques Eviter la submersion complète Résister à la composition physico-chimique spécifique de l'eau	La fonction	Débit trop grand	Submersion partielle des rails
		8	I_S_1			Débit trop grand	Submersion totale des rails
		8	I_S_1			Hauteur d'eau trop grande	Submersion partielle des rails
		8	I_S_1			Hauteur d'eau trop grande	Submersion totale des rails
		8	I_S_1			Durée d'immersion trop grande	Submersion partielle des rails
		8	I_S_1			Durée d'immersion trop grande	Submersion totale des rails
	8	I_S_1	Composition physico-chimique agressive de l'eau	Endommagement des rails			
	8	I_S_1	Charriage d'éléments massifs par la crue	Présence d'obstacles			
	Traverses et supports de voie	9	I_S_2	(i) Assurer la continuité fonctionnelle Permettre la circulation du matériel roulant Assurer l'ancrage de la voie dans le ballast	La fonction	Dislocation de la voie ferrée	Interruption de la circulation ferroviaire
		9	I_S_2			Dislocation de la voie ferrée	Mise en danger des usagers
		9	I_S_2			Présence d'obstacles	Perturbation de la circulation ferroviaire
		9	I_S_2			Présence d'obstacles	Mise en danger des usagers
		10	I_S_2	(ii) Permettre le bon fonctionnement des composants situés en aval d'un composant donné Transmettre et répartir les efforts au ballast et à la plate-forme Maintenir un écartement constant entre les deux files de rail	La fonction	Submersion des traverses et supports de voie	Dislocation de la voie ferrée
		10	I_S_2			Endommagement des traverses et supports de voie	Dislocation de la voie ferrée
		10	I_S_2	(iii) Résister aux flux hydrauliques Résister aux pressions hydromécaniques exercées par la crue Résister à la composition physico-chimique spécifique de l'eau	La fonction	Emportement des traverses et supports de voie	Dislocation de la voie ferrée
		11	I_S_2			Débit trop grand	Submersion des traverses et supports de voie
		11	I_S_2			Débit trop grand	Endommagement des traverses et supports de voie
		11	I_S_2			Débit trop grand	Emportement des traverses et supports de voie
		11	I_S_2			Hauteur d'eau trop grande	Submersion des traverses et supports de voie
		11	I_S_2			Hauteur d'eau trop grande	Endommagement des traverses et supports de voie
		11	I_S_2			Hauteur d'eau trop grande	Emportement des traverses et supports de voie
		11	I_S_2			Durée d'immersion trop grande	Submersion des traverses et supports de voie
		11	I_S_2			Durée d'immersion trop grande	Endommagement des traverses et supports de voie
	11	I_S_2	Durée d'immersion trop grande	Emportement des traverses et supports de voie			
	11	I_S_2	Composition physico-chimique agressive de l'eau	Endommagement des traverses et supports de voie			
	11	I_S_2	Charriage d'éléments massifs par la crue	Présence d'obstacles			
	Appareils de voie	12	I_S_3	(i) Assurer la continuité fonctionnelle Permettre le changement de voie du matériel roulant (bifurcation)	La fonction	Fonctionnement de l'appareil de voie en voie principale ou en voie déviée	Perturbation de la circulation ferroviaire
		12	I_S_3			Dysfonctionnement total de l'appareil de voie	Interruption de la circulation ferroviaire
		12	I_S_3			Présence d'obstacles	Perturbation de la circulation ferroviaire
		12	I_S_3			Présence d'obstacles	Interruption de la circulation ferroviaire
		13	I_S_3	(ii) Permettre le bon fonctionnement des composants situés en aval d'un composant donné	La fonction	Submersion des appareils de voie	Fonctionnement de l'appareil de voie en voie principale ou en voie déviée
		13	I_S_3			Submersion des appareils de voie	Dysfonctionnement total de l'appareil de voie
		14	I_S_3	(iii) Résister aux flux hydrauliques Résister aux chocs et endommagements dus aux embâcles	La fonction	Débit trop grand	Submersion des appareils de voie
		14	I_S_3			Hauteur d'eau trop grande	Submersion des appareils de voie
		14	I_S_3			Durée d'immersion trop grande	Submersion des appareils de voie
14		I_S_3	Composition physico-chimique agressive de l'eau			Fonctionnement de l'appareil de voie en voie principale ou en voie déviée	
14	I_S_3	Composition physico-chimique agressive de l'eau	Dysfonctionnement total de l'appareil de voie				
14	I_S_3	Charriage d'éléments massifs par la crue	Fonctionnement de l'appareil de voie en voie principale ou en voie déviée				
14	I_S_3	Charriage d'éléments massifs par la crue	Dysfonctionnement total de l'appareil de voie				
Ballast	15	I_S_4	(i) Assurer la continuité fonctionnelle Assurer la stabilité de circulation du matériel roulant	La fonction	Dislocation de la voie ferrée	Mise en danger des usagers	
	15	I_S_4			Dislocation de la voie ferrée	Interruption de la circulation ferroviaire	
	16	I_S_4	(ii) Permettre le bon fonctionnement des composants situés en aval d'un composant donné Répartir les charges sur la plate-forme Immobiliser les traverses dans leur position	La fonction	Emportement du ballast	Dislocation de la voie ferrée	
	16	I_S_4			Submersion du ballast	Dislocation de la voie ferrée	
16	I_S_4						

Sous-système	Composant	N° Fonction	N° composant	Fonction	Défaillance	Causes	Effets	
Infrastructure (S)	ballast (cas de voie ballastée)	16	I_S_4	Assurer le drainage des eaux zénales				
		17	I_S_4	(iii) Résister aux flux hydrauliques Résister aux pressions hydromécaniques exercées par la crue Eviter l'emportement Eviter la submersion	La fonction	Débit trop grand	Emportement du ballast	
		17	I_S_4			Débit trop grand	Submersion du ballast	
		17	I_S_4			Hauteur d'eau trop grande	Emportement du ballast	
		17	I_S_4			Hauteur d'eau trop grande	Submersion du ballast	
		17	I_S_4			Durée d'immersion trop grande	Emportement du ballast	
		17	I_S_4			Durée d'immersion trop grande	Submersion du ballast	
	17	I_S_4	Charriage d'éléments massifs par la crue			Emportement du ballast		
	Quais	18	I_S_5	(i) Assurer la continuité fonctionnelle	Assurer la circulation des flux d'usagers	La fonction	Accès au matériel roulant perturbé pour les usagers	Mise en danger des usagers
		18	I_S_5				Accès au matériel roulant perturbé pour les usagers	Perturbation de la mobilité des usagers
		19	I_S_5	(ii) Permettre le bon fonctionnement des composants situés en aval d'un composant donné	Permettre aux usagers l'accès au matériel roulant et aux gares	La fonction	Submersion des quais	Accès au matériel roulant perturbé pour les usagers
		19	I_S_5				Endommagement des quais	Accès au matériel roulant perturbé pour les usagers
		20	I_S_5	(iii) Résister aux flux hydrauliques Eviter la submersion Résister aux pressions hydromécaniques exercées par la crue Résister aux chocs et endommagements dus aux embâcles	La fonction	Inondation de la gare	Submersion des quais	
		20	I_S_5			Inondation de la gare	Endommagement des quais	
		20	I_S_5			Charriage d'éléments massifs par la crue	Présence d'obstacles	
		20	I_S_5					
		21	I_S_5	(iv) Limiter la circulation des flux hydrauliques au sein du système	Limiter la circulation des flux hydrauliques vers les autres composants de l'infrastructure	La fonction	Submersion des quais	Endommagement des rails
		21	I_S_5				Submersion des quais	Endommagement des traverses et supports de voie
		21	I_S_5				Submersion des quais	Dysfonctionnement total de l'appareil de voie
		21	I_S_5				Submersion des quais	Emportement du ballast
		21	I_S_5				Submersion des quais	Endommagement du 3ème rail
		21	I_S_5				Submersion des quais	Endommagement des détecteurs de signalisation
		21	I_S_5				Submersion des quais	Endommagement des moteurs d'ADV
		21	I_S_5				Submersion des quais	Endommagement des câbles de signalisation
		21	I_S_5				Submersion des quais	Endommagement des câbles en gare
	21	I_S_5		Submersion des quais			Présence d'obstacles	
	Plateforme (remblais, déblais dont couches et sous-couches)	22	I_S_6	(i) Assurer la continuité fonctionnelle Assurer la stabilité de circulation du matériel roulant	La fonction	Endommagement de la plateforme	Mise en danger des usagers	
		22	I_S_6			Endommagement de la plateforme	Perturbation de la circulation ferroviaire	
		22	I_S_6			Destruction partielle à totale de la plateforme	Mise en danger des usagers	
		22	I_S_6			Destruction partielle à totale de la plateforme	Interruption de la circulation ferroviaire	
		23	I_S_6	(ii) Permettre le bon fonctionnement des composants situés en aval d'un composant donné Assurer le support de composants d'un système de transport guidé	La fonction	Débit trop grand	Endommagement de la plateforme	
		23	I_S_6			Débit trop grand	Destruction partielle à totale de la plateforme	
		23	I_S_6			Hauteur d'eau trop grande	Endommagement de la plateforme	
		23	I_S_6			Hauteur d'eau trop grande	Destruction partielle à totale de la plateforme	
		23	I_S_6			Durée d'immersion trop grande	Endommagement de la plateforme	
		23	I_S_6			Durée d'immersion trop grande	Destruction partielle à totale de la plateforme	
		23	I_S_6			Plateforme vieillissante et vétuste	Endommagement de la plateforme	
		23	I_S_6			Plateforme vieillissante et vétuste	Destruction partielle à totale de la plateforme	
		23	I_S_6			Charriage d'éléments massifs par la crue	Endommagement de la plateforme	
		23	I_S_6	Charriage d'éléments massifs par la crue	Destruction partielle à totale de la plateforme			
		23	I_S_6	Composition physico-chimique agressive de l'eau	Endommagement de la plateforme			
		23	I_S_6	Composition physico-chimique agressive de l'eau	Destruction partielle à totale de la plateforme			
		24	I_S_6	(iii) Résister aux flux hydrauliques Eviter la submersion Résister aux pressions hydromécaniques exercées par la crue Résister aux chocs et endommagements dus aux embâcles	La fonction	Endommagement de la plateforme	Emportement du ballast	
	24	I_S_6	Endommagement de la plateforme			Endommagement de la dalle ferroviaire		
	24	I_S_6	Endommagement de la plateforme			Casse de la dalle ferroviaire		
	24	I_S_6	Endommagement de la plateforme			Endommagement de l'ouvrage hydraulique		
	24	I_S_6	Endommagement de la plateforme			Inclinaison importante du pylône		
24	I_S_6	Endommagement de la plateforme	Chute du pylône					
24	I_S_6	Destruction partielle à totale de la plateforme	Emportement du ballast					
24	I_S_6	Destruction partielle à totale de la plateforme	Endommagement de la dalle ferroviaire					

Sous-système	Composant	N° Fonction	N° composant	Fonction	Défaillance	Causes	Effets
Ouvrage hydraulique		24	I_S_6			Destruction partielle à totale de la plateforme	Casse de la dalle ferroviaire
		24	I_S_6			Destruction partielle à totale de la plateforme	Endommagement de l'ouvrage hydraulique
		24	I_S_6			Destruction partielle à totale de la plateforme	Inclinaison importante du pylône
		24	I_S_6			Destruction partielle à totale de la plateforme	Chute du pylône
		25	I_S_7	(i) Assurer la continuité fonctionnelle	La fonction	Submersion de la voie ferrée	Perturbation de la circulation ferroviaire
		25	I_S_7	Assurer la stabilité et pérennité des équipements ferroviaires		Submersion de la voie ferrée	Interruption de la circulation ferroviaire
		25	I_S_7			Submersion de la voie ferrée	Mise en danger des usagers
		26	I_S_7	(iii) Résister aux flux hydrauliques	La fonction	Débit trop grand	Submersion de la voie ferrée
		26	I_S_7	Assurer la « transparence hydraulique » (ouvrage de traversée)		Débit trop grand	Bouchage de l'ouvrage par des éléments charriés
		26	I_S_7	Assurer l'évacuation des flux hydrauliques (drainage longitudinal)		Débit trop grand	Endommagement de l'ouvrage hydraulique
		26	I_S_7			Hauteur d'eau trop grande	Submersion de la voie ferrée
		26	I_S_7			Hauteur d'eau trop grande	Bouchage de l'ouvrage par des éléments charriés
		26	I_S_7			Hauteur d'eau trop grande	Endommagement de l'ouvrage hydraulique
		26	I_S_7			Durée d'immersion trop grande	Submersion de la voie ferrée
		26	I_S_7			Durée d'immersion trop grande	Bouchage de l'ouvrage par des éléments charriés
		26	I_S_7			Durée d'immersion trop grande	Endommagement de l'ouvrage hydraulique
		26	I_S_7			Charriage d'éléments massifs par la crue	Submersion de la voie ferrée
		26	I_S_7			Charriage d'éléments massifs par la crue	Bouchage de l'ouvrage par des éléments charriés
		26	I_S_7			Charriage d'éléments massifs par la crue	Endommagement de l'ouvrage hydraulique
		26	I_S_7			Composition physico-chimique agressive de l'eau	Submersion de la voie ferrée
		26	I_S_7			Composition physico-chimique agressive de l'eau	Bouchage de l'ouvrage par des éléments charriés
		26	I_S_7			Composition physico-chimique agressive de l'eau	Endommagement de l'ouvrage hydraulique
		26	I_S_7			Sous-dimensionnement de l'ouvrage hydraulique	Submersion de la voie ferrée
		26	I_S_7			Sous-dimensionnement de l'ouvrage hydraulique	Bouchage de l'ouvrage par des éléments charriés
		26	I_S_7		Sous-dimensionnement de l'ouvrage hydraulique	Endommagement de l'ouvrage hydraulique	
		27	I_S_7	(iv) Limiter la circulation des flux hydrauliques au sein du système	La fonction	Endommagement de l'ouvrage hydraulique	Endommagement des rails
		27	I_S_7	Préserver les composants ferroviaires des atteintes de la crue (infrastructure...)		Endommagement de l'ouvrage hydraulique	Endommagement des traverses et supports de voie
		27	I_S_7			Endommagement de l'ouvrage hydraulique	Dysfonctionnement total de l'appareil de voie
		27	I_S_7			Endommagement de l'ouvrage hydraulique	Emportement du ballast
		27	I_S_7			Endommagement de l'ouvrage hydraulique	Endommagement du 3ème rail
		27	I_S_7			Endommagement de l'ouvrage hydraulique	Inclinaison importante du pylône
		27	I_S_7			Endommagement de l'ouvrage hydraulique	Chute du pylône
		27	I_S_7			Endommagement de l'ouvrage hydraulique	Endommagement des détecteurs de signalisation
		27	I_S_7			Endommagement de l'ouvrage hydraulique	Endommagement des moteurs d'ADV
		27	I_S_7			Endommagement de l'ouvrage hydraulique	Endommagement des câbles de signalisation
		27	I_S_7			Endommagement de l'ouvrage hydraulique	Inondation de la gare
		27	I_S_7			Sous-dimensionnement de l'ouvrage hydraulique	Endommagement des rails
		27	I_S_7			Sous-dimensionnement de l'ouvrage hydraulique	Endommagement des traverses et supports de voie
		27	I_S_7			Sous-dimensionnement de l'ouvrage hydraulique	Dysfonctionnement total de l'appareil de voie
		27	I_S_7			Sous-dimensionnement de l'ouvrage hydraulique	Emportement du ballast
		27	I_S_7			Sous-dimensionnement de l'ouvrage hydraulique	Endommagement du 3ème rail
		27	I_S_7			Sous-dimensionnement de l'ouvrage hydraulique	Inclinaison importante du pylône
		27	I_S_7			Sous-dimensionnement de l'ouvrage hydraulique	Chute du pylône
		27	I_S_7			Sous-dimensionnement de l'ouvrage hydraulique	Endommagement des détecteurs de signalisation
		27	I_S_7			Sous-dimensionnement de l'ouvrage hydraulique	Endommagement des moteurs d'ADV
		27	I_S_7			Sous-dimensionnement de l'ouvrage hydraulique	Endommagement des câbles de signalisation
		27	I_S_7			Sous-dimensionnement de l'ouvrage hydraulique	Inondation de la gare
		27	I_S_7			Bouchage de l'ouvrage par des éléments charriés	Endommagement des rails
		27	I_S_7			Bouchage de l'ouvrage par des éléments charriés	Endommagement des traverses et supports de voie
		27	I_S_7			Bouchage de l'ouvrage par des éléments charriés	Dysfonctionnement total de l'appareil de voie
	27	I_S_7		Bouchage de l'ouvrage par des éléments charriés		Emportement du ballast	
	27	I_S_7		Bouchage de l'ouvrage par des éléments charriés		Endommagement du 3ème rail	
	27	I_S_7		Bouchage de l'ouvrage par des éléments charriés		Inclinaison importante du pylône	
	27	I_S_7		Bouchage de l'ouvrage par des éléments charriés	Chute du pylône		

Sous-système	Composant	N° Fonction	N° composant	Fonction	Défaillance	Causes	Effets		
Dalle ferroviaire (cas de voie bétonnée)		27	I_S_7			Bouchage de l'ouvrage par des éléments charriés	Endommagement des détecteurs de signalisation		
		27	I_S_7			Bouchage de l'ouvrage par des éléments charriés	Endommagement des moteurs d'ADV		
		27	I_S_7			Bouchage de l'ouvrage par des éléments charriés	Endommagement des câbles de signalisation		
		27	I_S_7			Bouchage de l'ouvrage par des éléments charriés	Inondation de la gare		
			28	I_S_8	(i) Assurer la continuité fonctionnelle Assurer la stabilité de circulation du matériel roulant	La fonction	Endommagement de la dalle ferroviaire	Mise en danger des usagers	
							Endommagement de la dalle ferroviaire	Perturbation de la circulation ferroviaire	
							Casse de la dalle ferroviaire	Mise en danger des usagers	
							Casse de la dalle ferroviaire	Interruption de la circulation ferroviaire	
				29	I_S_8	(ii) Permettre le bon fonctionnement des composants situés en aval d'un composant donné Assurer le support de composants d'un système de transport guidé	La fonction	Débit trop grand	Endommagement de la dalle ferroviaire
								Débit trop grand	Casse de la dalle ferroviaire
								Hauteur d'eau trop grande	Endommagement de la dalle ferroviaire
								Hauteur d'eau trop grande	Casse de la dalle ferroviaire
								Durée d'immersion trop grande	Endommagement de la dalle ferroviaire
								Durée d'immersion trop grande	Casse de la dalle ferroviaire
								Ouvrage d'art vieillissant et vetuste	Endommagement de la dalle ferroviaire
								Ouvrage d'art vieillissant et vetuste	Casse de la dalle ferroviaire
								Charriage d'éléments massifs par la crue	Endommagement de la dalle ferroviaire
								Charriage d'éléments massifs par la crue	Casse de la dalle ferroviaire
								Composition physico-chimique agressive de l'eau	Endommagement de la dalle ferroviaire
								Composition physico-chimique agressive de l'eau	Casse de la dalle ferroviaire
			30	I_S_8	(iii) Résister aux flux hydrauliques Résister aux pressions hydromécaniques exercées par la crue Eviter la submersion	La fonction	Endommagement de la dalle ferroviaire	Endommagement des rails	
							Endommagement de la dalle ferroviaire	Endommagement des traverses et supports de voie	
							Endommagement de la dalle ferroviaire	Dysfonctionnement total de l'appareil de voie	
							Endommagement de la dalle ferroviaire	Emportement du ballast	
							Endommagement de la dalle ferroviaire	Endommagement du 3ème rail	
							Endommagement de la dalle ferroviaire	Inclinaison importante du pylône	
							Endommagement de la dalle ferroviaire	Chute du pylône	
							Endommagement de la dalle ferroviaire	Endommagement de l'ouvrage hydraulique	
							Endommagement de la dalle ferroviaire	Endommagement des détecteurs de signalisation	
							Endommagement de la dalle ferroviaire	Endommagement des moteurs d'ADV	
							Endommagement de la dalle ferroviaire	Endommagement des câbles de signalisation	
							Casse de la dalle ferroviaire	Endommagement des rails	
							Casse de la dalle ferroviaire	Endommagement des traverses et supports de voie	
							Casse de la dalle ferroviaire	Dysfonctionnement total de l'appareil de voie	
							Casse de la dalle ferroviaire	Emportement du ballast	
							Casse de la dalle ferroviaire	Endommagement du 3ème rail	
							Casse de la dalle ferroviaire	Inclinaison importante du pylône	
							Casse de la dalle ferroviaire	Chute du pylône	
							Casse de la dalle ferroviaire	Endommagement de l'ouvrage hydraulique	
							Casse de la dalle ferroviaire	Endommagement des détecteurs de signalisation	
		Casse de la dalle ferroviaire	Endommagement des moteurs d'ADV						
		Casse de la dalle ferroviaire	Endommagement des câbles de signalisation						
		Casse de la dalle ferroviaire	Endommagement du matériel roulant						
		Matériel Roulant (S)	Matériel roulant	34	MR_S	(i) Assurer la continuité fonctionnelle	La fonction	Endommagement du matériel roulant	Mise en danger des usagers
34	MR_S			Endommagement du matériel roulant	Perturbation de la circulation ferroviaire				
34	MR_S			Endommagement du matériel roulant	Interruption de la circulation ferroviaire				
	35			MR_S	(iii) Résister aux flux hydrauliques Résister aux pressions hydromécaniques exercées par la crue Résister aux chocs et endommagements dus aux embâcles Résister à la composition physico-chimique spécifique de l'eau Eviter la submersion	La fonction	Débit trop grand	Inondation du matériel roulant	
							Hauteur d'eau trop grande	Inondation du matériel roulant	
							Durée d'immersion trop grande	Inondation du matériel roulant	
							Charriage d'éléments massifs par la crue	Endommagement du matériel roulant	
							Composition physico-chimique agressive de l'eau	Endommagement du matériel roulant	
35	MR_S	Submersion des quais	Inondation du matériel roulant						
35	MR_S	Inondation de la gare	Inondation du matériel roulant						

Sous-système	Composant	N° Fonction	N° composant	Fonction	Défaillance	Causes	Effets		
Z		36	MR_S	(iv) Limiter la circulation des flux hydrauliques au sein du système Limiter l'atteinte par les flux hydrauliques des composants situés à l'intérieur du matériel roulant (CC&S...)	La fonction	Inondation du matériel roulant	Endommagement des composants "bord" de contrôle-commande et signalisation		
		36	MR_S			Inondation du matériel roulant	Endommagement du matériel roulant		
C-C & Signalisation (S)	Composants de contrôle-commande et signalisation « bord » (ERTMS, ETCS...)	37	CCS_S_1	(i) Assurer la continuité fonctionnelle Assurer une gestion sûre et optimisée de l'exploitation du système de transport guidé	La fonction	Perturbation de la signalisation ferroviaire	Mise en danger des usagers		
		37	CCS_S_1			Perturbation de la signalisation ferroviaire	Perturbation de la circulation ferroviaire		
		37	CCS_S_1			Perturbation de la signalisation ferroviaire	Interruption de la circulation ferroviaire		
		38	CCS_S_1	(ii) Permettre le bon fonctionnement des composants situés en aval d'un composant donné Permettre une circulation sûre et optimisée du matériel roulant	La fonction	Endommagement des composants "bord" de contrôle-commande et signalisation	Perturbation de la signalisation ferroviaire		
		38	CCS_S_1						
		39	CCS_S_1	(iii) Résister aux flux hydrauliques Résister aux pressions hydromécaniques exercées par la crue	La fonction	Inondation du matériel roulant	Endommagement des composants "bord" de contrôle-commande et signalisation		
		39	CCS_S_1			Composition physico-chimique agressive de l'eau	Endommagement des composants "bord" de contrôle-commande et signalisation		
	Composants de contrôle-commande et signalisation « sol » : détecteurs (prises d'informations, balises,...)	40	CCS_S_2	(i) Assurer la continuité fonctionnelle Assurer une gestion sûre et optimisée des itinéraires	La fonction	Perturbation de la signalisation ferroviaire	Mise en danger des usagers		
		40	CCS_S_2			Perturbation de la signalisation ferroviaire	Perturbation de la circulation ferroviaire		
		40	CCS_S_2			Perturbation de la signalisation ferroviaire	Interruption de la circulation ferroviaire		
		41	CCS_S_2	(ii) Permettre le bon fonctionnement des composants situés en aval d'un composant donné Permettre une circulation sûre et optimisée du matériel roulant	La fonction	Endommagement des détecteurs de signalisation	Perturbation de la signalisation ferroviaire		
		41	CCS_S_2						
		42	CCS_S_2	(iii) Résister aux flux hydrauliques Résister aux pressions hydromécaniques exercées par la crue Résister aux chocs et endommagements dus aux embâcles Résister à la composition physico-chimique spécifique de l'eau	La fonction	Débit trop grand	Endommagement des détecteurs de signalisation		
		42	CCS_S_2			Hauteur d'eau trop grande	Endommagement des détecteurs de signalisation		
		42	CCS_S_2			Durée d'immersion trop grande	Endommagement des détecteurs de signalisation		
		42	CCS_S_2			Charriage d'éléments massifs par la crue	Endommagement des détecteurs de signalisation		
		42	CCS_S_2	(iv) Limiter la circulation des flux hydrauliques au sein du système Préserver les composants ferroviaires des atteintes de la crue (énergie...)	La fonction	Composition physico-chimique agressive de l'eau	Endommagement des détecteurs de signalisation		
	43	CCS_S_2	Endommagement des détecteurs de signalisation			Remontée partielle d'informations au PCC			
	Composants de contrôle-commande et signalisation « sol » : mécanismes d'ADV (moteur, informations de position,...)	44	CCS_S_3	(i) Assurer la continuité fonctionnelle Assurer une gestion sûre des itinéraires	La fonction	Interruption de la circulation ferroviaire	Perturbation de la mobilité des usagers		
		44	CCS_S_3			Interruption de la circulation ferroviaire	Mise en danger des usagers		
		44	CCS_S_3			Perturbation de la circulation ferroviaire	Perturbation de la mobilité des usagers		
		44	CCS_S_3			Perturbation de la circulation ferroviaire	Mise en danger des usagers		
		45	CCS_S_3	(ii) Permettre le bon fonctionnement des composants situés en aval d'un composant donné Permettre le changement de voie sûr et optimisé du matériel roulant (bifurcation)	La fonction	Endommagement des moteurs d'ADV	Interruption de la circulation ferroviaire		
		45	CCS_S_3			Endommagement des moteurs d'ADV	Perturbation de la circulation ferroviaire		
		46	CCS_S_3	(iii) Résister aux flux hydrauliques Résister aux pressions hydromécaniques exercées par la crue Résister aux chocs et endommagements dus aux embâcles Résister à la composition physico-chimique spécifique de l'eau Eviter la submersion	La fonction	Débit trop grand	Endommagement des moteurs d'ADV		
		46	CCS_S_3			Hauteur d'eau trop grande	Endommagement des moteurs d'ADV		
		46	CCS_S_3			Durée d'immersion trop grande	Endommagement des moteurs d'ADV		
		46	CCS_S_3			Composition physico-chimique agressive de l'eau	Endommagement des moteurs d'ADV		
	46	CCS_S_3	(iv) Limiter la circulation des flux hydrauliques au sein du système Préserver les composants ferroviaires des atteintes de la crue (énergie...)	La fonction	Composition physico-chimique agressive de l'eau	Endommagement des moteurs d'ADV			
	46	CCS_S_3			Charriage d'éléments massifs par la crue	Endommagement des moteurs d'ADV			
	Composants de contrôle	47	CCS_S_3	(iv) Limiter la circulation des flux hydrauliques au sein du système Préserver les composants ferroviaires des atteintes de la crue (énergie...)	La fonction	Endommagement des moteurs d'ADV	Fonctionnement de l'appareil de voie en voie principale ou en voie déviée		
		47	CCS_S_3			Endommagement des moteurs d'ADV	Dysfonctionnement total de l'appareil de voie		
		47	CCS_S_3			Endommagement des moteurs d'ADV	Remontée partielle d'informations au PCC		
		47	CCS_S_3			Endommagement des moteurs d'ADV	Remontée nulle d'informations au PCC		
		48	CCS_S_4			(i) Assurer la continuité fonctionnelle Assurer une gestion sûre et optimisée de l'exploitation du système de transport guidé	La fonction	Perturbation de la circulation ferroviaire	Mise en danger des usagers
		48	CCS_S_4					Perturbation de la circulation ferroviaire	Perturbation de la mobilité des usagers
	48	CCS_S_4	Perturbation de la signalisation ferroviaire	Mise en danger des usagers					
	48	CCS_S_4	Perturbation de la signalisation ferroviaire	Perturbation de la mobilité des usagers					
	48	CCS_S_4	Interruption de la circulation ferroviaire	Mise en danger des usagers					
	48	CCS_S_4	Interruption de la circulation ferroviaire	Perturbation de la mobilité des usagers					

Sous-système	Composant	N° Fonction	N° composant	Fonction	Défaillance	Causes	Effets		
Contrôle-commande et signalisation « sol » : câbles (transmission, remontées d'informations, ...)		49	CCS_S_4	(ii) Permettre le bon fonctionnement des composants situés en aval d'un composant donné	La fonction	Endommagement des câbles de signalisation	Perturbation de la circulation ferroviaire		
		49	CCS_S_4			Permettre une circulation sûre et optimisée du matériel roulant	Endommagement des câbles de signalisation	Interruption de la circulation ferroviaire	
		49	CCS_S_4	(iii) Résister aux flux hydrauliques	La fonction	Résister aux pressions hydromécaniques exercées par la crue Résister aux chocs et endommagements dus aux embâcles Résister à la composition physico-chimique spécifique de l'eau Eviter la submersion	Endommagement des câbles de signalisation	Perturbation de la signalisation ferroviaire	
		50	CCS_S_4				Débit trop grand	Endommagement des câbles de signalisation	
		50	CCS_S_4				Hauteur d'eau trop grande	Endommagement des câbles de signalisation	
		50	CCS_S_4				Durée d'immersion trop grande	Endommagement des câbles de signalisation	
		50	CCS_S_4				Composition physico-chimique agressive de l'eau	Endommagement des câbles de signalisation	
		50	CCS_S_4				Composition physico-chimique agressive de l'eau	Endommagement des câbles de signalisation	
		50	CCS_S_4	Charriage d'éléments massifs par la crue	Endommagement des câbles de signalisation				
		51	CCS_S_4	(iv) Limiter la circulation des flux hydrauliques au sein du système	La fonction	Préserver les composants ferroviaires des atteintes de la crue (énergie...)	Endommagement des câbles de signalisation	Remontée partielle d'informations au PCC	
51	CCS_S_4	Endommagement des câbles de signalisation	Remontée nulle d'informations au PCC						
Gares (S)	Espaces d'accès	52	G_S_1	(i) Assurer la continuité fonctionnelle	La fonction	Perturbation de la circulation ferroviaire	Perturbation de la mobilité des usagers		
		52	G_S_1			Assurer l'interface entre le système de transport guidé et les autres composants urbains	Interruption de la circulation ferroviaire	Perturbation de la mobilité des usagers	
		53	G_S_1	(ii) Permettre le bon fonctionnement des composants situés en aval d'un composant donné	La fonction	Assurer l'accès des flux d'usagers aux quais	Inondation de la gare	Accès au matériel roulant perturbé pour les usagers	
		53	G_S_1				Endommagement de la gare	Perturbation de la circulation ferroviaire	
		53	G_S_1	Endommagement de la gare	Interruption de la circulation ferroviaire				
		54	G_S_1	(iii) Résister aux flux hydrauliques	La fonction	Résister aux pressions hydromécaniques exercées par la crue Résister aux chocs et endommagements dus aux embâcles Résister à la composition physico-chimique spécifique de l'eau Eviter la submersion Résister aux flux d'infiltrations d'eau de pluie	Débit trop grand	Inondation de la gare	
		54	G_S_1				Hauteur d'eau trop grande	Inondation de la gare	
		54	G_S_1				Durée d'immersion trop grande	Inondation de la gare	
		54	G_S_1				Charriage d'éléments massifs par la crue	Endommagement de la gare	
		54	G_S_1				Composition physico-chimique agressive de l'eau	Endommagement de la gare	
		54	G_S_1				Gare implantée en zone inondable	Inondation de la gare	
		55	G_S_1	(iv) Limiter la circulation des flux hydrauliques au sein du système	La fonction	Préserver les composants ferroviaires des atteintes de la crue (énergie...)	Inondation de la gare	Submersion des quais	
		55	G_S_1				Inondation de la gare	Inondation du matériel roulant	
		Electromécanismes (ascenseurs, escaliers mécaniques)	56	G_S_2	(i) Assurer la continuité fonctionnelle	La fonction	Assurer la circulation des flux d'usagers	Accès au matériel roulant perturbé pour les usagers	Mise en danger des usagers
								Accès au matériel roulant perturbé pour les usagers	Perturbation de la mobilité des usagers
			57	G_S_2	(ii) Permettre le bon fonctionnement des composants situés en aval d'un composant donné	La fonction	Permettre aux usagers l'accès aux quais	Endommagement des électromécanismes	Accès au matériel roulant perturbé pour les usagers
	Inondation de la gare							Accès au matériel roulant perturbé pour les usagers	
	(iii) Résister aux flux hydrauliques				La fonction	Résister aux pressions hydromécaniques exercées par la crue Résister aux chocs et endommagements dus aux embâcles Résister à la composition physico-chimique spécifique de l'eau Eviter la submersion Résister aux flux d'infiltrations d'eau de pluie	Débit trop grand	Endommagement des électromécanismes	
							Hauteur d'eau trop grande	Endommagement des électromécanismes	
							Durée d'immersion trop grande	Endommagement des électromécanismes	
							Charriage d'éléments massifs par la crue	Endommagement des électromécanismes	
							Composition physico-chimique agressive de l'eau	Endommagement des électromécanismes	
							Gare implantée en zone inondable	Endommagement des électromécanismes	
	(iv) Limiter la circulation des flux hydrauliques au sein du système				La fonction	Préserver les composants ferroviaires des atteintes de la crue (énergie...)	Débit trop grand	Inondation de la gare	
							Hauteur d'eau trop grande	Inondation de la gare	
							Durée d'immersion trop grande	Inondation de la gare	
							Inondation de la gare	Submersion des quais	
							Inondation de la gare	Endommagement des quais	
							Inondation de la gare	Submersion des câbles en gare	
		Inondation de la gare	Endommagement des câbles en gare						
		Inondation de la gare	Endommagement des câbles en gare						
	60	G_S_3	(i) Assurer la continuité fonctionnelle	La fonction	Assurer une gestion sûre et optimisée de l'exploitation du système de transport guidé	Perturbation de la circulation ferroviaire	Mise en danger des usagers		
Perturbation de la circulation ferroviaire						Perturbation de la mobilité des usagers			
Perturbation de la signalisation ferroviaire						Mise en danger des usagers			
Perturbation de la signalisation ferroviaire						Perturbation de la mobilité des usagers			
Interruption de la circulation ferroviaire						Mise en danger des usagers			
Interruption de la circulation ferroviaire						Perturbation de la mobilité des usagers			

Sous-système	Composant	N° Fonction	N° composant	Fonction	Défaillance	Causes	Effets		
	Câbles en gare	61	G_S_3	(ii) Permettre le bon fonctionnement des composants situés en aval d'un composant donné Permettre une circulation sûre et optimisée du matériel roulant	La fonction	Endommagement des câbles en gare	Perturbation de la circulation ferroviaire		
		61	G_S_3			Endommagement des câbles en gare	Interruption de la circulation ferroviaire		
		61	G_S_3			Endommagement des câbles en gare	Perturbation de la signalisation ferroviaire		
		62	G_S_3	(iii) Résister aux flux hydrauliques Résister aux pressions hydromécaniques exercées par la crue Résister aux chocs et endommagements dus aux embâcles Résister à la composition physico-chimique spécifique de l'eau Eviter la submersion	La fonction	Débit trop grand	Endommagement des câbles en gare		
		62	G_S_3			Hauteur d'eau trop grande	Endommagement des câbles en gare		
		62	G_S_3			Durée d'immersion trop grande	Endommagement des câbles en gare		
		62	G_S_3			Charriage d'éléments massifs par la crue	Endommagement des câbles en gare		
		62	G_S_3			Composition physico-chimique agressive de l'eau	Endommagement des câbles en gare		
		62	G_S_3			Gare implantée en zone inondable	Endommagement des câbles en gare		
		63	G_S_3	(iv) Limiter la circulation des flux hydrauliques au sein du système Préserver les composants ferroviaires des atteintes de la crue (énergie...)	La fonction	Endommagement des câbles en gare	Remontée partielle d'informations au PCC		
		63	G_S_3			Endommagement des câbles en gare	Remontée nulle d'informations au PCC		
		SMR (S)	Ensemble "remisage" (de trains voyageurs)	64	SMR_1	(i) Assurer la continuité fonctionnelle Assurer la disponibilité du système de transport guidé	La fonction		
				64	SMR_1				
65	SMR_1			(ii) Permettre le bon fonctionnement des composants situés en aval d'un composant donné Assurer le remisage du matériel roulant	La fonction	Inondation du bâtiment de maintenance	Indisponibilité du matériel roulant		
65	SMR_1					Inondation du matériel roulant	Indisponibilité du matériel roulant		
66	SMR_1			(iii) Résister aux flux hydrauliques Résister aux pressions hydromécaniques exercées par la crue Résister aux chocs et endommagements dus aux embâcles Résister à la composition physico-chimique spécifique de l'eau Eviter la submersion	La fonction	Débit trop grand	Inondation du bâtiment de maintenance		
66	SMR_1					Débit trop grand	Endommagement du bâtiment de maintenance		
66	SMR_1					Hauteur d'eau trop grande	Inondation du bâtiment de maintenance		
66	SMR_1					Hauteur d'eau trop grande	Endommagement du bâtiment de maintenance		
66	SMR_1					Durée d'immersion trop grande	Inondation du bâtiment de maintenance		
66	SMR_1					Durée d'immersion trop grande	Endommagement du bâtiment de maintenance		
66	SMR_1			(iv) Limiter la circulation des flux hydrauliques au sein du système Préserver le parc de matériel roulant remisé des atteintes de la crue	La fonction	Charriage d'éléments massifs par la crue	Endommagement du matériel roulant		
66	SMR_1					Composition physico-chimique agressive de l'eau	Endommagement du bâtiment de maintenance		
66	SMR_1		Site de maintenance implanté en zone inondable			Inondation du bâtiment de maintenance			
67	SMR_1		(i) Assurer la continuité fonctionnelle Assurer l'exploitation du système de transport guidé	La fonction	Inondation du bâtiment de maintenance	Inondation du matériel roulant			
67	SMR_1				Inondation du bâtiment de maintenance	Infiltration des eaux de la crue			
68	SMR_2		(ii) Permettre le bon fonctionnement des composants situés en aval d'un composant donné Assurer la maintenance du matériel roulant	La fonction	Indisponibilité du matériel roulant	Perturbation de la mobilité des usagers			
68	SMR_2				Perturbation de l'activité de maintenance	Perturbation de la circulation ferroviaire			
69	SMR_2				Inondation du bâtiment de maintenance	Indisponibilité du matériel roulant			
69	SMR_2				Inondation du bâtiment de maintenance	Perturbation de l'activité de maintenance			
70	SMR_2				(iii) Résister aux flux hydrauliques Résister aux pressions hydromécaniques exercées par la crue Résister aux chocs et endommagements dus aux embâcles Résister à la composition physico-chimique spécifique de l'eau Eviter la submersion	La fonction	Débit trop grand	Inondation du bâtiment de maintenance	
70	SMR_2						Débit trop grand	Endommagement du bâtiment de maintenance	
70	SMR_2						Hauteur d'eau trop grande	Inondation du bâtiment de maintenance	
70	SMR_2						Hauteur d'eau trop grande	Endommagement du bâtiment de maintenance	
70	SMR_2						Durée d'immersion trop grande	Inondation du bâtiment de maintenance	
70	SMR_2						Durée d'immersion trop grande	Endommagement du bâtiment de maintenance	
70	SMR_2	(iv) Limiter la circulation des flux hydrauliques au sein du système Préserver les composants de l'atelier de maintenance (machines-outils et stocks) des atteintes de la crue			La fonction	Charriage d'éléments massifs par la crue	Endommagement du matériel roulant		
70	SMR_2					Composition physico-chimique agressive de l'eau	Endommagement du bâtiment de maintenance		
70	SMR_2		Site de maintenance implanté en zone inondable	Inondation du bâtiment de maintenance					
71	SMR_2	(i) Assurer la continuité fonctionnelle Assurer la disponibilité du système de transport guidé	La fonction	Inondation du bâtiment de maintenance	Endommagement des composants de l'atelier de maintenance (machines-outils et stocks)				
71	SMR_2			Inondation du bâtiment de maintenance	Infiltration des eaux de la crue				
Ensemble "remisage" (de trains de		72	SMI_1	(i) Assurer la continuité fonctionnelle Assurer la disponibilité du système de transport guidé	La fonction	Indisponibilité des trains de travaux	Perturbation de la circulation ferroviaire		
		72	SMI_1			Perturbation de l'activité de maintenance	Interruption de la circulation ferroviaire		
		73	SMI_1	(ii) Permettre le bon fonctionnement des composants situés en aval d'un composant donné Assurer le remisage des trains de travaux	La fonction	Inondation du bâtiment de maintenance	Indisponibilité des trains de travaux		
		73	SMI_1			Inondation des trains de travaux	Indisponibilité des trains de travaux		
		74	SMI_1	(iii) Résister aux flux hydrauliques Résister aux pressions hydromécaniques exercées par la crue Résister aux chocs et endommagements dus aux embâcles		Débit trop grand	Inondation du bâtiment de maintenance		
		74	SMI_1			Débit trop grand	Endommagement du bâtiment de maintenance		
		74	SMI_1			Hauteur d'eau trop grande	Inondation du bâtiment de maintenance		
		74	SMI_1			Hauteur d'eau trop grande	Endommagement du bâtiment de maintenance		

Sous-système	Composant	N° Fonction	N° composant	Fonction	Défaillance	Causes	Effets
SMI (S)	travaux)	74	SMI_1	Résister à la composition physico-chimique spécifique de l'eau Eviter la submersion	La fonction	Durée d'immersion trop grande	Inondation du bâtiment de maintenance
		74	SMI_1			Durée d'immersion trop grande	Endommagement du bâtiment de maintenance
		74	SMI_1			Charriage d'éléments massifs par la crue	Endommagement des trains de travaux
		74	SMI_1			Composition physico-chimique agressive de l'eau	Endommagement du bâtiment de maintenance
		74	SMI_1			Site de maintenance implanté en zone inondable	Inondation du bâtiment de maintenance
		75	SMI_1			(iv) Limiter la circulation des flux hydrauliques au sein du système Préserver le parc de trains de travaux remisés des atteintes de la crue	La fonction
	75	SMI_1	Inondation du bâtiment de maintenance	Infiltration des eaux de la crue			
	Ensemble "maintenance" (des équipements fixes)	76	SMI_2	(i) Assurer la continuité fonctionnelle Assurer l'exploitation du système de transport guidé	La fonction	Indisponibilité des trains de travaux	Perturbation de la circulation ferroviaire
		76	SMI_2			Perturbation de l'activité de maintenance	Interruption de la circulation ferroviaire
		77	SMI_2	(ii) Permettre le bon fonctionnement des composants situés en aval d'un composant donné Assurer la maintenance des équipements fixes du système de transport guidé	La fonction	Inondation du bâtiment de maintenance	Indisponibilité des trains de travaux
		77	SMI_2			Inondation du bâtiment de maintenance	Perturbation de l'activité de maintenance
		78	SMI_2	(iii) Résister aux flux hydrauliques Résister aux pressions hydromécaniques exercées par la crue Résister aux chocs et endommagements dus aux embâcles Résister à la composition physico-chimique spécifique de l'eau Eviter la submersion	La fonction	Débit trop grand	Inondation du bâtiment de maintenance
		78	SMI_2			Débit trop grand	Endommagement du bâtiment de maintenance
		78	SMI_2			Hauteur d'eau trop grande	Inondation du bâtiment de maintenance
		78	SMI_2			Hauteur d'eau trop grande	Endommagement du bâtiment de maintenance
		78	SMI_2			Durée d'immersion trop grande	Inondation du bâtiment de maintenance
		78	SMI_2			Durée d'immersion trop grande	Endommagement du bâtiment de maintenance
		78	SMI_2			Charriage d'éléments massifs par la crue	Endommagement du bâtiment de maintenance
		78	SMI_2			Composition physico-chimique agressive de l'eau	Endommagement du bâtiment de maintenance
		78	SMI_2	Site de maintenance implanté en zone inondable	Inondation du bâtiment de maintenance		
79		SMI_2	(iv) Limiter la circulation des flux hydrauliques au sein du système Préserver les composants de l'atelier de maintenance (machines-outils et stocks) des atteintes de la crue	La fonction	Inondation du bâtiment de maintenance	Endommagement des composants de l'atelier de maintenance (machines-outils et stocks)	
79	SMI_2	Inondation du bâtiment de maintenance			Infiltration des eaux de la crue		
PCC (S)	Salle d'exploitation	80	PCC_S_1	(i) Assurer la continuité fonctionnelle Assurer l'exploitation du système de transport guidé	La fonction	Inondation de la salle d'exploitation	Perturbation de la circulation ferroviaire
		80	PCC_S_1			Inondation de la salle d'exploitation	Interruption de la circulation ferroviaire
		80	PCC_S_1			Remontée partielle d'informations au PCC	Perturbation de la circulation ferroviaire
		80	PCC_S_1			Remontée partielle d'informations au PCC	Interruption de la circulation ferroviaire
		80	PCC_S_1			Remontée nulle d'informations au PCC	Perturbation de la circulation ferroviaire
		80	PCC_S_1			Remontée nulle d'informations au PCC	Interruption de la circulation ferroviaire
		81	PCC_S_1	(ii) Permettre le bon fonctionnement des composants situés en aval d'un composant donné Assurer le commandement des différents sous-systèmes	La fonction	Inondation de la salle d'exploitation	Accès au matériel roulant perturbé pour les usagers
		81	PCC_S_1			Inondation de la salle d'exploitation	Perturbation dans l'alimentation électrique
		81	PCC_S_1			Inondation de la salle d'exploitation	Perturbation de la signalisation ferroviaire
		82	PCC_S_1	(iii) Résister aux flux hydrauliques Résister aux flux d'infiltrations d'eau de pluie Résister aux pressions hydromécaniques exercées par la crue Résister aux chocs et endommagements dus aux embâcles Résister à la composition physico-chimique spécifique de l'eau Eviter la submersion	La fonction	Débit trop grand	Inondation de la salle d'exploitation
		82	PCC_S_1			Débit trop grand	Endommagement de la salle d'exploitation
		82	PCC_S_1			Hauteur d'eau trop grande	Inondation de la salle d'exploitation
		82	PCC_S_1			Hauteur d'eau trop grande	Endommagement de la salle d'exploitation
		82	PCC_S_1			Durée d'immersion trop grande	Inondation de la salle d'exploitation
		82	PCC_S_1			Durée d'immersion trop grande	Endommagement de la salle d'exploitation
		82	PCC_S_1			Charriage d'éléments massifs par la crue	Endommagement de la salle d'exploitation
		82	PCC_S_1			Composition physico-chimique agressive de l'eau	Endommagement de la salle d'exploitation
		82	PCC_S_1			Batiment de commandement implanté en zone inondable	Inondation de la salle d'exploitation
	82	PCC_S_1	Batiment de commandement implanté en zone inondable			Inondation de la salle d'exploitation	
		83	PCC_S_2	(i) Assurer la continuité fonctionnelle Assurer l'exploitation du système de transport guidé	La fonction	Perturbation de la circulation ferroviaire	Mise en danger des usagers
		83	PCC_S_2			Interruption de la circulation ferroviaire	Mise en danger des usagers
		83	PCC_S_2			Perturbation de la circulation ferroviaire	Perturbation de la mobilité des usagers
		83	PCC_S_2			Interruption de la circulation ferroviaire	Perturbation de la mobilité des usagers
		84	PCC_S_2	(ii) Permettre le bon fonctionnement des composants situés en aval d'un composant donné	La fonction	Endommagement des câbles du PCC	Perturbation de la circulation ferroviaire

<i>Sous-système</i>	<i>Composant</i>	<i>N° Fonction</i>	<i>N° composant</i>	<i>Fonction</i>	<i>Défaillance</i>	<i>Causes</i>	<i>Effets</i>
	Câbles du PCC	84	PCC_S_2	Assurer le commandement des différents sous-systèmes		Endommagement des câbles du PCC	Interruption de la circulation ferroviaire
		85	PCC_S_2	(iii) Résister aux flux hydrauliques Résister aux flux d'infiltrations d'eau de pluie Résister aux pressions hydromécaniques exercées par la crue Résister aux chocs et endommagements dus aux embâcles Résister à la composition physico-chimique spécifique de l'eau Eviter la submersion	La fonction	Débit trop grand	Endommagement des câbles du PCC
		85	PCC_S_2			Hauteur d'eau trop grande	Endommagement des câbles du PCC
		85	PCC_S_2			Durée d'immersion trop grande	Endommagement des câbles du PCC
		85	PCC_S_2			Charriage d'éléments massifs par la crue	Endommagement des câbles du PCC
		85	PCC_S_2			Composition physico-chimique agressive de l'eau	Endommagement des câbles du PCC
		85	PCC_S_2			Batiment de commandement implanté en zone inondable	Endommagement des câbles du PCC
		86	PCC_S_2	(iv) Limiter la circulation des flux hydrauliques au sein du système Préserver les composants ferroviaires des atteintes de la crue (énergie...)	La fonction	Endommagement des câbles du PCC	Perturbation dans l'alimentation électrique
		86	PCC_S_2			Endommagement des câbles du PCC	Perturbation de la signalisation ferroviaire
		86	PCC_S_2			Endommagement des câbles du PCC	Accès au matériel roulant perturbé pour les usagers
		86	PCC_S_2			Endommagement des câbles du PCC	Perturbation de l'activité de maintenance

B.2.3 AMDE d'un système de transport guidé souterrain

Sous-système	Composant	N° Fonction	N° composant	Fonction	Défaillance	Causes	Effets
Energie (SS)	Ligne aérienne de contact	1	En_SS_1	(i) Assurer la continuité fonctionnelle	La fonction	Perturbation dans l'alimentation électrique	Perturbation de la circulation ferroviaire
		1	En_SS_1			Interruption de l'alimentation électrique	Interruption de la circulation ferroviaire
		2	En_SS_1	(ii) Permettre le bon fonctionnement des composants situés en aval d'un composant donné Apporter l'énergie électrique de traction au matériel roulant	La fonction	Endommagement de la LAC	Perturbation dans l'alimentation électrique
		2	En_SS_1			Rupture de la LAC	Interruption de l'alimentation électrique
		2	En_SS_1			Court-circuit	Perturbation dans l'alimentation électrique
		2	En_SS_1			Court-circuit	Interruption de l'alimentation électrique
		3	En_SS_1	(iii) Résister aux flux hydrauliques Résister aux pressions hydromécaniques exercées par la crue	La fonction	Débit trop grand	Endommagement de la LAC
		3	En_SS_1			Débit trop grand	Rupture de la LAC
		3	En_SS_1			Débit trop grand	Court-circuit
		3	En_SS_1			Hauteur d'eau trop grande	Endommagement de la LAC
		3	En_SS_1			Hauteur d'eau trop grande	Rupture de la LAC
		3	En_SS_1			Hauteur d'eau trop grande	Court-circuit
		3	En_SS_1			Durée d'immersion trop grande	Endommagement de la LAC
		3	En_SS_1			Durée d'immersion trop grande	Rupture de la LAC
		3	En_SS_1			Durée d'immersion trop grande	Court-circuit
		3	En_SS_1			Charriage d'éléments massifs par la crue	Endommagement de la LAC
		3	En_SS_1			Charriage d'éléments massifs par la crue	Rupture de la LAC
	3	En_SS_1	Composition physico-chimique agressive de l'eau			Endommagement de la LAC	
	3	En_SS_1	Composition physico-chimique agressive de l'eau	Court-circuit			
	Rail conducteur latéral ("troisième rail")	4	En_SS_2	(i) Assurer la continuité fonctionnelle Assurer la distribution de l'énergie électrique de traction	La fonction	Perturbation dans l'alimentation électrique	Perturbation de la circulation ferroviaire
		4	En_SS_2			Perturbation dans l'alimentation électrique	Interruption de la circulation ferroviaire
		4	En_SS_2			Interruption de l'alimentation électrique	Perturbation de la circulation ferroviaire
		4	En_SS_2			Interruption de l'alimentation électrique	Interruption de la circulation ferroviaire
		5	En_SS_2	(ii) Permettre le bon fonctionnement des composants situés en aval d'un composant donné Apporter l'énergie électrique de traction au matériel roulant	La fonction	Endommagement du 3ème rail	Perturbation dans l'alimentation électrique
		5	En_SS_2			Rupture du 3ème rail	Interruption de l'alimentation électrique
		5	En_SS_2			Submersion du 3ème rail	Perturbation dans l'alimentation électrique
		6	En_SS_2	(iii) Résister aux flux hydrauliques Résister aux pressions hydromécaniques exercées par la crue Résister aux chocs et endommagements dus aux embâcles Résister à la composition physico-chimique spécifique de l'eau	La fonction	Submersion du 3ème rail	Interruption de l'alimentation électrique
		6	En_SS_2			Débit trop grand	Endommagement du 3ème rail
		6	En_SS_2			Débit trop grand	Rupture du 3ème rail
6		En_SS_2	Débit trop grand			Submersion du 3ème rail	
6		En_SS_2	Hauteur d'eau trop grande			Endommagement du 3ème rail	
6		En_SS_2	Hauteur d'eau trop grande			Rupture du 3ème rail	
6		En_SS_2	Hauteur d'eau trop grande			Submersion du 3ème rail	
6		En_SS_2	Durée d'immersion trop grande			Endommagement du 3ème rail	
6	En_SS_2	Durée d'immersion trop grande	Rupture du 3ème rail				
6	En_SS_2	Durée d'immersion trop grande	Submersion du 3ème rail				
6	En_SS_2	Charriage d'éléments massifs par la crue	Endommagement du 3ème rail				
6	En_SS_2	Charriage d'éléments massifs par la crue	Rupture du 3ème rail				
6	En_SS_2	Composition physico-chimique agressive de l'eau	Endommagement du 3ème rail				
	7	I_SS_1	(i) Assurer la continuité fonctionnelle Permettre la circulation du matériel roulant	La fonction	Submersion partielle des rails	Perturbation de la circulation ferroviaire	
		I_SS_1			Submersion partielle des rails	Mise en danger des usagers	
		I_SS_1			Endommagement des rails	Perturbation de la circulation ferroviaire	
		I_SS_1			Endommagement des rails	Mise en danger des usagers	
		I_SS_1			Submersion totale des rails	Interruption de la circulation ferroviaire	
		I_SS_1			Submersion totale des rails	Mise en danger des usagers	
		I_SS_1			Présence d'obstacles	Interruption de la circulation ferroviaire	
	I_SS_1	Présence d'obstacles	Mise en danger des usagers				
	8	I_SS_1	(ii) Permettre le bon fonctionnement des composants situés en aval d'un composant donné	La fonction	Submersion partielle des rails	Perturbation de la circulation ferroviaire	

Rails	8	I_SS_1	Assurer le circuit de retour du courant de traction (via les rails de roulement)	La fonction	Submersion totale des rails	Interruption de la circulation ferroviaire
	9	I_SS_1	(iii) Résister aux flux hydrauliques Éviter la submersion complète Résister à la composition physico-chimique spécifique de l'eau	La fonction	Débit trop grand	Submersion partielle des rails
	9	I_SS_1			Débit trop grand	Submersion totale des rails
	9	I_SS_1			Hauteur d'eau trop grande	Submersion partielle des rails
	9	I_SS_1			Hauteur d'eau trop grande	Submersion totale des rails
	9	I_SS_1			Durée d'immersion trop grande	Submersion partielle des rails
	9	I_SS_1			Durée d'immersion trop grande	Submersion totale des rails
	9	I_SS_1			Composition physico-chimique agressive de l'eau	Endommagement des rails
	Traverses et supports de voie	10	I_SS_2	(i) Assurer la continuité fonctionnelle Permettre la circulation du matériel roulant Assurer l'ancrage de la voie dans le ballast	La fonction	Charriage d'éléments massifs par la crue
10		I_SS_2	Dislocation de la voie ferrée			Interruption de la circulation ferroviaire
10		I_SS_2	Dislocation de la voie ferrée			Mise en danger des usagers
10		I_SS_2	Présence d'obstacles			Perturbation de la circulation ferroviaire
11		I_SS_2	(ii) Permettre le bon fonctionnement des composants situés en aval d'un composant donné Transmettre et répartir les efforts au ballast et à la plate-forme Maintenir un écartement constant entre les deux files de rail	La fonction	Présence d'obstacles	Mise en danger des usagers
11		I_SS_2			Submersion des traverses et supports de voie	Dislocation de la voie ferrée
11		I_SS_2			Endommagement des traverses et supports de voie	Dislocation de la voie ferrée
12		I_SS_2	(iii) Résister aux flux hydrauliques Résister aux pressions hydromécaniques exercées par la crue Résister à la composition physico-chimique spécifique de l'eau	La fonction	Empolement des traverses et supports de voie	Dislocation de la voie ferrée
12		I_SS_2			Débit trop grand	Submersion des traverses et supports de voie
12		I_SS_2			Débit trop grand	Endommagement des traverses et supports de voie
12		I_SS_2			Débit trop grand	Empolement des traverses et supports de voie
12		I_SS_2			Hauteur d'eau trop grande	Submersion des traverses et supports de voie
12		I_SS_2			Hauteur d'eau trop grande	Endommagement des traverses et supports de voie
12		I_SS_2			Hauteur d'eau trop grande	Empolement des traverses et supports de voie
12		I_SS_2			Durée d'immersion trop grande	Submersion des traverses et supports de voie
12		I_SS_2			Durée d'immersion trop grande	Endommagement des traverses et supports de voie
12	I_SS_2	Durée d'immersion trop grande			Empolement des traverses et supports de voie	
12	I_SS_2	Composition physico-chimique agressive de l'eau	Endommagement des traverses et supports de voie			
Appareils de voie	13	I_SS_3	(i) Assurer la continuité fonctionnelle Permettre le changement de voie du matériel roulant (bifurcation)	La fonction	Charriage d'éléments massifs par la crue	Présence d'obstacles
	13	I_SS_3			Fonctionnement de l'appareil de voie en voie principale ou en voie déviée	Perturbation de la circulation ferroviaire
	13	I_SS_3			Dysfonctionnement total de l'appareil de voie	Interruption de la circulation ferroviaire
	13	I_SS_3			Présence d'obstacles	Perturbation de la circulation ferroviaire
	14	I_SS_3	(ii) Permettre le bon fonctionnement des composants situés en aval d'un composant donné	La fonction	Présence d'obstacles	Interruption de la circulation ferroviaire
	14	I_SS_3			Submersion des appareils de voie	Fonctionnement de l'appareil de voie en voie principale ou en voie déviée
	14	I_SS_3			Submersion des appareils de voie	Dysfonctionnement total de l'appareil de voie
	15	I_SS_3	(iii) Résister aux flux hydrauliques Résister aux chocs et endommagements dus aux embâcles	La fonction	Débit trop grand	Submersion des appareils de voie
	15	I_SS_3			Hauteur d'eau trop grande	Submersion des appareils de voie
	15	I_SS_3			Durée d'immersion trop grande	Submersion des appareils de voie
15	I_SS_3	Composition physico-chimique agressive de l'eau			Fonctionnement de l'appareil de voie en voie principale ou en voie déviée	
15	I_SS_3	Composition physico-chimique agressive de l'eau			Dysfonctionnement total de l'appareil de voie	
15	I_SS_3	Charriage d'éléments massifs par la crue			Fonctionnement de l'appareil de voie en voie principale ou en voie déviée	
Ballast	16	I_SS_4	(i) Assurer la continuité fonctionnelle Permettre la stabilité de circulation du matériel roulant	La fonction	Charriage d'éléments massifs par la crue	Dysfonctionnement total de l'appareil de voie
	16	I_SS_4			Dislocation de la voie ferrée	Mise en danger des usagers
	17	I_SS_4	(ii) Permettre le bon fonctionnement des composants situés en aval d'un composant donné Répartir les charges sur la plate-forme Immobiliser les traverses dans leur position Assurer le drainage des eaux zénithales	La fonction	Dislocation de la voie ferrée	Interruption de la circulation ferroviaire
	17	I_SS_4			Empolement du ballast	Dislocation de la voie ferrée
	17	I_SS_4			Submersion du ballast	Dislocation de la voie ferrée
	17	I_SS_4				
18	I_SS_4	(iii) Résister aux flux hydrauliques		Débit trop grand	Empolement du ballast	

Infrastructure (SS)	18	I_SS_4	Résister aux pressions hydromécaniques exercées par la crue	La fonction	Débit trop grand	Submersion du ballast	
	18	I_SS_4	Eviter le déplacement		Hauteur d'eau trop grande	Emportement du ballast	
	18	I_SS_4			Hauteur d'eau trop grande	Submersion du ballast	
	18	I_SS_4			Durée d'immersion trop grande	Emportement du ballast	
	18	I_SS_4			Durée d'immersion trop grande	Submersion du ballast	
	18	I_SS_4			Charriage d'éléments massifs par la crue	Emportement du ballast	
	Quais	19	I_SS_5	(i) Assurer la continuité fonctionnelle	La fonction	Accès au matériel roulant perturbé pour les usagers	Mise en danger des usagers
		19	I_SS_5	Assurer la circulation des flux d'usagers		Accès au matériel roulant perturbé pour les usagers	Perturbation de la mobilité des usagers
		20	I_SS_5	(ii) Permettre le bon fonctionnement des composants situés en aval d'un composant donné	La fonction	Submersion des quais	Accès au matériel roulant perturbé pour les usagers
		20	I_SS_5	Permettre aux usagers l'accès au matériel roulant et aux gares		Endommagement des quais	Accès au matériel roulant perturbé pour les usagers
		21	I_SS_5	(iii) Résister aux flux hydrauliques	La fonction	Inondation de la gare	Submersion des quais
		21	I_SS_5	Eviter la submersion		Inondation de la gare	Endommagement des quais
		21	I_SS_5	Résister aux pressions hydromécaniques exercées par la crue		Charriage d'éléments massifs par la crue	Présence d'obstacles
		21	I_SS_5	Résister aux chocs et endommagements dus aux embâcles			
		21	I_SS_5				
		22	I_SS_5	(iv) Limiter la circulation des flux hydrauliques au sein du système	La fonction	Submersion des quais	Endommagement des rails
		22	I_SS_5			Submersion des quais	Endommagement des traverses et supports de voie
		22	I_SS_5			Submersion des quais	Dysfonctionnement total de l'appareil de voie
		22	I_SS_5			Submersion des quais	Emportement du ballast
		22	I_SS_5			Submersion des quais	Endommagement du 3ème rail
		22	I_SS_5			Submersion des quais	Endommagement des détecteurs de signalisation
		22	I_SS_5			Submersion des quais	Endommagement des moteurs d'ADV
		22	I_SS_5			Submersion des quais	Endommagement des câbles de signalisation
		22	I_SS_5			Submersion des quais	Endommagement des câbles en gare
	22	I_SS_5		Submersion des quais		Présence d'obstacles	
	Ouvrage d'art (tunnel)	23	I_SS_6	(i) Assurer la continuité fonctionnelle	La fonction	Perturbation de la circulation ferroviaire	Perturbation de la mobilité des usagers
		23	I_SS_6	Assurer la circulation des flux d'usagers		Interruption de la circulation ferroviaire	Perturbation de la mobilité des usagers
		24	I_SS_6	(ii) Permettre le bon fonctionnement des composants situés en aval d'un composant donné	La fonction	Infiltration des eaux de la crue	Perturbation de la circulation ferroviaire
		24	I_SS_6	Assurer le support de composants d'un système de transport guidé		Infiltration des eaux de la crue	Interruption de la circulation ferroviaire
		25	I_SS_6	(iii) Résister aux flux hydrauliques	La fonction	Débit trop grand	Infiltration des eaux de la crue
		25	I_SS_6	Limitier les flux d'infiltrations d'eau		Hauteur d'eau trop grande	Infiltration des eaux de la crue
		25	I_SS_6	Résister aux pressions hydromécaniques exercées par la crue		Durée d'immersion trop grande	Infiltration des eaux de la crue
		25	I_SS_6			Ouvrage d'art vieillissant et vétuste	Infiltration des eaux de la crue
		25	I_SS_6				
		26	I_SS_6	(iv) Limiter la circulation des flux hydrauliques au sein du système	La fonction	Infiltration des eaux de la crue	Submersion partielle des rails
		26	I_SS_6			Infiltration des eaux de la crue	Submersion totale des rails
		26	I_SS_6	Contenir la circulation des flux hydrauliques sur le linéaire de voies le plus court possible		Infiltration des eaux de la crue	Endommagement des traverses et supports de voie
		26	I_SS_6	Préserver les composants ferroviaires des atteintes de la crue (énergie...)		Infiltration des eaux de la crue	Submersion des appareils de voie
		26	I_SS_6			Infiltration des eaux de la crue	Emportement du ballast
		26	I_SS_6			Infiltration des eaux de la crue	Endommagement du 3ème rail
		26	I_SS_6			Infiltration des eaux de la crue	Endommagement de la LAC
		26	I_SS_6			Infiltration des eaux de la crue	Endommagement des détecteurs de signalisation
		26	I_SS_6			Infiltration des eaux de la crue	Endommagement des moteurs d'ADV
	26	I_SS_6		Infiltration des eaux de la crue		Endommagement des câbles de signalisation	
	26	I_SS_6		Infiltration des eaux de la crue		Inondation de la gare	
26	I_SS_6		Infiltration des eaux de la crue	Inondation du bâtiment de commandement			
26	I_SS_6		Infiltration des eaux de la crue	Inondation du matériel roulant			
	27	I_SS_7	(i) Assurer la continuité fonctionnelle	La fonction	Infiltration des eaux de la crue	Perturbation de la circulation ferroviaire	
	27	I_SS_7	Permettre la circulation des flux d'usagers en souterrain		Infiltration des eaux de la crue	Interruption de la circulation ferroviaire	
	27	I_SS_7			Infiltration des eaux de la crue	Mise en danger des usagers	
	28	I_SS_7	(iii) Résister aux flux hydrauliques		Débit trop grand	Infiltration des eaux de la crue	
	28	I_SS_7	Assurer l'épuisement des flux hydrauliques de la crue		Hauteur d'eau trop grande	Infiltration des eaux de la crue	
	28	I_SS_7			Durée d'immersion trop grande	Infiltration des eaux de la crue	
	28	I_SS_7			Sous-dimensionnement de la pompe	Infiltration des eaux de la crue	

Station de pompage / pompe d'épuisement	28	I_SS_7	La fonction	Charriage d'éléments massifs par la crue	Infiltration des eaux de la crue
	28	I_SS_7		Composition physico-chimique agressive de l'eau	Infiltration des eaux de la crue
	28	I_SS_7		Débit trop grand	Endommagement de la pompe
	28	I_SS_7		Hauteur d'eau trop grande	Endommagement de la pompe
	28	I_SS_7		Durée d'immersion trop grande	Endommagement de la pompe
	28	I_SS_7		Charriage d'éléments massifs par la crue	Endommagement de la pompe
	28	I_SS_7		Composition physico-chimique agressive de l'eau	Endommagement de la pompe
	29	I_SS_7	(iv) Limiter la circulation des flux hydrauliques au sein du système Protéger les composants ferroviaires de la crue	Endommagement de la pompe	Endommagement des rails
	29	I_SS_7		Endommagement de la pompe	Endommagement des traverses et supports de voie
	29	I_SS_7		Endommagement de la pompe	Dysfonctionnement total de l'appareil de voie
	29	I_SS_7		Endommagement de la pompe	Emportement du ballast
	29	I_SS_7		Endommagement de la pompe	Endommagement du 3ème rail
	29	I_SS_7		Endommagement de la pompe	Inclinaison importante du pylône
	29	I_SS_7		Endommagement de la pompe	Chute du pylône
	29	I_SS_7		Endommagement de la pompe	Endommagement des détecteurs de signalisation
	29	I_SS_7		Endommagement de la pompe	Endommagement des moteurs d'ADV
	29	I_SS_7		Endommagement de la pompe	Endommagement des câbles de signalisation
	29	I_SS_7		Endommagement de la pompe	Inondation du bâtiment de commandement
	29	I_SS_7		Endommagement de la pompe	Inondation de la gare
	29	I_SS_7		Sous-dimensionnement de la pompe	Endommagement des rails
	29	I_SS_7		Sous-dimensionnement de la pompe	Endommagement des traverses et supports de voie
	29	I_SS_7		Sous-dimensionnement de la pompe	Dysfonctionnement total de l'appareil de voie
	29	I_SS_7		Sous-dimensionnement de la pompe	Emportement du ballast
	29	I_SS_7		Sous-dimensionnement de la pompe	Endommagement du 3ème rail
	29	I_SS_7		Sous-dimensionnement de la pompe	Inclinaison importante du pylône
	29	I_SS_7		Sous-dimensionnement de la pompe	Chute du pylône
	29	I_SS_7		Sous-dimensionnement de la pompe	Endommagement des détecteurs de signalisation
	29	I_SS_7		Sous-dimensionnement de la pompe	Endommagement des moteurs d'ADV
	29	I_SS_7		Sous-dimensionnement de la pompe	Endommagement des câbles de signalisation
	29	I_SS_7		Sous-dimensionnement de la pompe	Inondation du bâtiment de commandement
29	I_SS_7	Sous-dimensionnement de la pompe		Inondation de la gare	
29	I_SS_7	La fonction		Bouchage de la pompe par des éléments charriés	Endommagement des rails
29	I_SS_7			Bouchage de la pompe par des éléments charriés	Endommagement des traverses et supports de voie
29	I_SS_7			Bouchage de la pompe par des éléments charriés	Dysfonctionnement total de l'appareil de voie
29	I_SS_7		Bouchage de la pompe par des éléments charriés	Emportement du ballast	
29	I_SS_7		Bouchage de la pompe par des éléments charriés	Endommagement du 3ème rail	
29	I_SS_7		Bouchage de la pompe par des éléments charriés	Inclinaison importante du pylône	
29	I_SS_7		Bouchage de la pompe par des éléments charriés	Chute du pylône	
29	I_SS_7		Bouchage de la pompe par des éléments charriés	Endommagement des détecteurs de signalisation	
29	I_SS_7		Bouchage de la pompe par des éléments charriés	Endommagement des moteurs d'ADV	
29	I_SS_7		Bouchage de la pompe par des éléments charriés	Endommagement des câbles de signalisation	
29	I_SS_7	La fonction	Bouchage de la pompe par des éléments charriés	Inondation du bâtiment de commandement	
29	I_SS_7		Bouchage de la pompe par des éléments charriés	Inondation de la gare	
30	I_SS_8	(i) Assurer la continuité fonctionnelle	Endommagement du radier ferroviaire	Mise en danger des usagers	

Matériel ferroviaire	30	I_SS_8	Permettre la circulation du matériel roulant	La fonction	Endommagement du radier ferroviaire	Perturbation de la circulation ferroviaire	
	30	I_SS_8			Casse du radier ferroviaire	Mise en danger des usagers	
	30	I_SS_8			Casse du radier ferroviaire	Interruption de la circulation ferroviaire	
	31	I_SS_8	(ii) Permettre le bon fonctionnement des composants situés en aval d'un composant donné Assurer le support de composants d'un système de transport guidé	La fonction	Débit trop grand	Endommagement du radier ferroviaire	
	31	I_SS_8			Débit trop grand	Casse du radier ferroviaire	
	31	I_SS_8			Hauteur d'eau trop grande	Endommagement du radier ferroviaire	
	31	I_SS_8			Hauteur d'eau trop grande	Casse du radier ferroviaire	
	31	I_SS_8			Durée d'immersion trop grande	Endommagement du radier ferroviaire	
	31	I_SS_8			Durée d'immersion trop grande	Casse du radier ferroviaire	
	31	I_SS_8			Ouvrage d'art vieillissant et vétuste	Endommagement du radier ferroviaire	
	31	I_SS_8			Ouvrage d'art vieillissant et vétuste	Casse du radier ferroviaire	
	31	I_SS_8			Charriage d'éléments massifs par la crue	Endommagement du radier ferroviaire	
	31	I_SS_8			Charriage d'éléments massifs par la crue	Casse du radier ferroviaire	
	31	I_SS_8			Composition physico-chimique agressive de l'eau	Endommagement du radier ferroviaire	
	31	I_SS_8			Composition physico-chimique agressive de l'eau	Casse du radier ferroviaire	
	32	I_SS_8	(iii) Résister aux flux hydrauliques Limiter les flux d'infiltrations d'eau Limiter les flux de circulation d'eaux souterraines Résister aux pressions hydromécaniques verticales de soulèvement exercées par la crue	La fonction	Endommagement du radier ferroviaire	Endommagement des rails	
	32	I_SS_8			Endommagement du radier ferroviaire	Endommagement des traverses et supports de voie	
	32	I_SS_8			Endommagement du radier ferroviaire	Dysfonctionnement total de l'appareil de voie	
	32	I_SS_8			Endommagement du radier ferroviaire	Emportement du ballast	
	32	I_SS_8			Endommagement du radier ferroviaire	Endommagement du 3ème rail	
	32	I_SS_8			Endommagement du radier ferroviaire	Inclinaison importante du pylône	
	32	I_SS_8			Endommagement du radier ferroviaire	Chute du pylône	
	32	I_SS_8			Endommagement du radier ferroviaire	Endommagement des détecteurs de signalisation	
	32	I_SS_8			Endommagement du radier ferroviaire	Endommagement des moteurs d'ADV	
	32	I_SS_8			Endommagement du radier ferroviaire	Endommagement des câbles de signalisation	
	32	I_SS_8			Casse du radier ferroviaire	Endommagement des rails	
	32	I_SS_8			Casse du radier ferroviaire	Endommagement des traverses et supports de voie	
	32	I_SS_8			Casse du radier ferroviaire	Dysfonctionnement total de l'appareil de voie	
	32	I_SS_8			Casse du radier ferroviaire	Emportement du ballast	
	32	I_SS_8			Casse du radier ferroviaire	Endommagement du 3ème rail	
	32	I_SS_8			Casse du radier ferroviaire	Inclinaison importante du pylône	
	32	I_SS_8			Casse du radier ferroviaire	Chute du pylône	
32	I_SS_8	Casse du radier ferroviaire			Endommagement des détecteurs de signalisation		
32	I_SS_8	Casse du radier ferroviaire			Endommagement des moteurs d'ADV		
32	I_SS_8	Casse du radier ferroviaire	Endommagement des câbles de signalisation				
Matériel Roulant (SS)	Matériel roulant	33	(i) Assurer la continuité fonctionnelle Permettre le transport des flux d'usagers	La fonction	Endommagement du matériel roulant	Mise en danger des usagers	
		33			MR_SS	Endommagement du matériel roulant	Perturbation de la circulation ferroviaire
		33			MR_SS	Endommagement du matériel roulant	Interruption de la circulation ferroviaire
		34	(iii) Résister aux flux hydrauliques Résister aux chocs et endommagements dus aux embâcles Résister à la composition physico-chimique spécifique de l'eau Eviter la submersion	La fonction	Débit trop grand	Inondation du matériel roulant	
		34			MR_SS	Hauteur d'eau trop grande	Inondation du matériel roulant
		34			MR_SS	Durée d'immersion trop grande	Inondation du matériel roulant
		34			MR_SS	Charriage d'éléments massifs par la crue	Endommagement du matériel roulant
		34	MR_SS	Composition physico-chimique agressive de l'eau	Endommagement du matériel roulant		
34	MR_SS	Submersion des quais	Inondation du matériel roulant				
34	MR_SS	Inondation de la gare	Inondation du matériel roulant				
35	(iv) Limiter la circulation des flux hydrauliques au sein du système Limiter l'atteinte par les flux hydrauliques des composants situés à l'intérieur du matériel roulant (CC&S...)	La fonction	Inondation du matériel roulant	Endommagement des composants "bord" de contrôle-commande et signalisation			
35			MR_SS	Inondation du matériel roulant	Endommagement du matériel roulant		
Composants de	36	(i) Assurer la continuité fonctionnelle Assurer une gestion sûre et optimisée de l'exploitation du système de transport guidé	La fonction	Perturbation de la signalisation ferroviaire	Mise en danger des usagers		
	36			CCS_SS_1	Perturbation de la signalisation ferroviaire	Perturbation de la circulation ferroviaire	

Composants de commande et signalisation « bord » (ERTMS, ETCS...)	36	CCS_SS_1				Perturbation de la signalisation ferroviaire	Interruption de la circulation ferroviaire
	37	CCS_SS_1	(ii) Permettre le bon fonctionnement des composants situés en aval d'un composant donné	La fonction	Permettre une circulation sûre et optimisée du matériel roulant	Endommagement des composants "bord" de contrôle-commande et signalisation	Perturbation de la signalisation ferroviaire
	37	CCS_SS_1					
	38	CCS_SS_1	(iii) Résister aux flux hydrauliques	La fonction	Résister aux pressions hydromécaniques exercées par la crue	Inondation du matériel roulant	Endommagement des composants "bord" de contrôle-commande et signalisation
	38	CCS_SS_1				Composition physico-chimique agressive de l'eau	Endommagement des composants "bord" de contrôle-commande et signalisation
	39	CCS_SS_2	(i) Assurer la continuité fonctionnelle	La fonction	Assurer une gestion sûre et optimisée des itinéraires	Perturbation de la signalisation ferroviaire	Mise en danger des usagers
	39	CCS_SS_2				Perturbation de la signalisation ferroviaire	Perturbation de la circulation ferroviaire
	39	CCS_SS_2				Perturbation de la signalisation ferroviaire	Interruption de la circulation ferroviaire
	40	CCS_SS_2	(ii) Permettre le bon fonctionnement des composants situés en aval d'un composant donné	La fonction	Permettre une circulation sûre et optimisée du matériel roulant		Endommagement des détecteurs de signalisation
40	CCS_SS_2						
41	CCS_SS_2	(iii) Résister aux flux hydrauliques	La fonction	Résister aux pressions hydromécaniques exercées par la crue	Débit trop grand	Endommagement des détecteurs de signalisation	
41	CCS_SS_2			Résister aux chocs et endommagements dus aux embâcles	Hauteur d'eau trop grande	Endommagement des détecteurs de signalisation	
41	CCS_SS_2			Résister à la composition physico-chimique spécifique de l'eau	Durée d'immersion trop grande	Endommagement des détecteurs de signalisation	
41	CCS_SS_2				Charriage d'éléments massifs par la crue	Endommagement des détecteurs de signalisation	
41	CCS_SS_2				Composition physico-chimique agressive de l'eau	Endommagement des détecteurs de signalisation	
42	CCS_SS_2	(iv) Limiter la circulation des flux hydrauliques au sein du système	La fonction	Préserver les composants ferroviaires des atteintes de la crue (énergie...)	Endommagement des détecteurs de signalisation	Remontée partielle d'informations au PCC	
42	CCS_SS_2				Endommagement des détecteurs de signalisation	Remontée nulle d'informations au PCC	
Composants de commande et signalisation « sol » : détecteurs (prises d'informations, balises,...)	43	CCS_SS_3	(i) Assurer la continuité fonctionnelle	La fonction	Assurer une gestion sûre des itinéraires	Interruption de la circulation ferroviaire	Perturbation de la mobilité des usagers
	43	CCS_SS_3				Interruption de la circulation ferroviaire	Mise en danger des usagers
	43	CCS_SS_3				Perturbation de la circulation ferroviaire	Perturbation de la mobilité des usagers
	43	CCS_SS_3				Perturbation de la circulation ferroviaire	Mise en danger des usagers
	44	CCS_SS_3	(ii) Permettre le bon fonctionnement des composants situés en aval d'un composant donné	La fonction	Permettre le changement de voie sûr et optimisé du matériel roulant (bifurcation)	Endommagement des moteurs d'ADV	Interruption de la circulation ferroviaire
	44	CCS_SS_3				Endommagement des moteurs d'ADV	Perturbation de la circulation ferroviaire
	45	CCS_SS_3	(iii) Résister aux flux hydrauliques	La fonction	Résister aux pressions hydromécaniques exercées par la crue	Débit trop grand	Endommagement des moteurs d'ADV
	45	CCS_SS_3			Résister aux chocs et endommagements dus aux embâcles	Hauteur d'eau trop grande	Endommagement des moteurs d'ADV
	45	CCS_SS_3			Résister à la composition physico-chimique spécifique de l'eau	Durée d'immersion trop grande	Endommagement des moteurs d'ADV
	45	CCS_SS_3			Eviter la submersion	Composition physico-chimique agressive de l'eau	Endommagement des moteurs d'ADV
	45	CCS_SS_3				Composition physico-chimique agressive de l'eau	Endommagement des moteurs d'ADV
	45	CCS_SS_3				Charriage d'éléments massifs par la crue	Endommagement des moteurs d'ADV
	46	CCS_SS_3	(iv) Limiter la circulation des flux hydrauliques au sein du système	La fonction	Préserver les composants ferroviaires des atteintes de la crue (énergie...)	Endommagement des moteurs d'ADV	Fonctionnement de l'appareil de voie en voie principale ou en voie déviée
	46	CCS_SS_3				Endommagement des moteurs d'ADV	Dysfonctionnement total de l'appareil de voie
46	CCS_SS_3				Endommagement des moteurs d'ADV	Remontée partielle d'informations au PCC	
46	CCS_SS_3				Endommagement des moteurs d'ADV	Remontée nulle d'informations au PCC	
Composants de commande et signalisation « sol » : câbles (transmission	47	CCS_SS_4	(i) Assurer la continuité fonctionnelle	La fonction	Assurer une gestion sûre et optimisée de l'exploitation du système de transport guidé	Perturbation de la circulation ferroviaire	Mise en danger des usagers
	47	CCS_SS_4				Perturbation de la circulation ferroviaire	Perturbation de la mobilité des usagers
	47	CCS_SS_4				Perturbation de la signalisation ferroviaire	Mise en danger des usagers
	47	CCS_SS_4				Perturbation de la signalisation ferroviaire	Perturbation de la mobilité des usagers
	47	CCS_SS_4				Interruption de la circulation ferroviaire	Mise en danger des usagers
	47	CCS_SS_4				Interruption de la circulation ferroviaire	Perturbation de la mobilité des usagers
	48	CCS_SS_4	(ii) Permettre le bon fonctionnement des composants situés en aval d'un composant donné	La fonction	Permettre une circulation sûre et optimisée du matériel roulant	Endommagement des câbles de signalisation	Perturbation de la circulation ferroviaire
	48	CCS_SS_4				Endommagement des câbles de signalisation	Interruption de la circulation ferroviaire
	48	CCS_SS_4				Endommagement des câbles de signalisation	Perturbation de la signalisation ferroviaire
49	CCS_SS_4	(iii) Résister aux flux hydrauliques			Débit trop grand	Endommagement des câbles de signalisation	

	(transmission, remontées d'informations,...)	49	CCS_SS_4	Résister aux pressions hydromécaniques exercées par la crue	La fonction	Hauteur d'eau trop grande	Endommagement des câbles de signalisation
		49	CCS_SS_4	Résister aux chocs et endommagements dus aux embâcles		Durée d'immersion trop grande	Endommagement des câbles de signalisation
		49	CCS_SS_4	Résister à la composition physico-chimique spécifique de l'eau		Composition physico-chimique agressive de l'eau	Endommagement des câbles de signalisation
		49	CCS_SS_4	Eviter la submersion		Composition physico-chimique agressive de l'eau	Endommagement des câbles de signalisation
		49	CCS_SS_4		Charriage d'éléments massifs par la crue	Endommagement des câbles de signalisation	
		50	CCS_SS_4	(iv) Limiter la circulation des flux hydrauliques au sein du système	Endommagement des câbles de signalisation	Remontée partielle d'informations au PCC	
		50	CCS_SS_4	Préserver les composants ferroviaires des atteintes de la crue (énergie...)	Endommagement des câbles de signalisation	Remontée nulle d'informations au PCC	
Gares (SS)	Espaces d'accès	51	G_SS_1	(i) Assurer la continuité fonctionnelle	La fonction	Perturbation de la circulation ferroviaire	Perturbation de la mobilité des usagers
		51	G_SS_1	Assurer l'interface entre le système de transport guidé et les autres composants urbains		Interruption de la circulation ferroviaire	Perturbation de la mobilité des usagers
		52	G_SS_1	(ii) Permettre le bon fonctionnement des composants situés en aval d'un composant donné	La fonction	Inondation de la gare	Accès au matériel roulant perturbé pour les usagers
		52	G_SS_1	Assurer l'accès des flux d'usagers aux quais		Endommagement de la gare	Perturbation de la circulation ferroviaire
		52	G_SS_1			Endommagement de la gare	Interruption de la circulation ferroviaire
		53	G_SS_1	(iii) Résister aux flux hydrauliques		Débit trop grand	Inondation de la gare
		53	G_SS_1	Résister aux pressions hydromécaniques exercées par la crue	Hauteur d'eau trop grande	Inondation de la gare	
		53	G_SS_1	Résister aux chocs et endommagements dus aux embâcles	Durée d'immersion trop grande	Inondation de la gare	
		53	G_SS_1	Résister à la composition physico-chimique spécifique de l'eau	Charriage d'éléments massifs par la crue	Endommagement de la gare	
		53	G_SS_1	Eviter la submersion	Composition physico-chimique agressive de l'eau	Endommagement de la gare	
	53	G_SS_1	Résister aux flux d'infiltrations d'eau de pluie	Gare implantée en zone inondable	Inondation de la gare		
	54	G_SS_1	(iv) Limiter la circulation des flux hydrauliques au sein du système	Inondation de la gare	Submersion des quais		
	54	G_SS_1	Préserver les composants ferroviaires des atteintes de la crue (énergie...)	Inondation de la gare	Inondation du matériel roulant		
	Electromécanismes (ascenseurs, escaliers mécaniques)	55	G_SS_2	(i) Assurer la continuité fonctionnelle	La fonction	Accès au matériel roulant perturbé pour les usagers	Mise en danger des usagers
		55	G_SS_2	Assurer la circulation des flux d'usagers		Accès au matériel roulant perturbé pour les usagers	Perturbation de la mobilité des usagers
		56	G_SS_2	(ii) Permettre le bon fonctionnement des composants situés en aval d'un composant donné	La fonction	Endommagement des électromécanismes	Accès au matériel roulant perturbé pour les usagers
		56	G_SS_2	Permettre aux usagers l'accès aux quais		Inondation de la gare	Accès au matériel roulant perturbé pour les usagers
		57	G_SS_2	(iii) Résister aux flux hydrauliques	La fonction	Débit trop grand	Endommagement des électromécanismes
		57	G_SS_2	Résister aux pressions hydromécaniques exercées par la crue		Hauteur d'eau trop grande	Endommagement des électromécanismes
57		G_SS_2	Résister aux chocs et endommagements dus aux embâcles	Durée d'immersion trop grande		Endommagement des électromécanismes	
57		G_SS_2	Résister à la composition physico-chimique spécifique de l'eau	Charriage d'éléments massifs par la crue		Endommagement des électromécanismes	
57		G_SS_2	Eviter la submersion	Composition physico-chimique agressive de l'eau		Endommagement des électromécanismes	
57		G_SS_2	Résister aux flux d'infiltrations d'eau de pluie	Gare implantée en zone inondable		Endommagement des électromécanismes	
57		G_SS_2		Débit trop grand		Inondation de la gare	
57		G_SS_2		Hauteur d'eau trop grande		Inondation de la gare	
57		G_SS_2		Durée d'immersion trop grande	Inondation de la gare		
58		G_SS_2	(iv) Limiter la circulation des flux hydrauliques au sein du système	La fonction	Inondation de la gare	Submersion des quais	
58	G_SS_2	Préserver les composants ferroviaires des atteintes de la crue (énergie...)	Inondation de la gare		Endommagement des quais		
58	G_SS_2		Inondation de la gare		Submersion des câbles en gare		
58	G_SS_2		Inondation de la gare		Endommagement des câbles en gare		
	Gares (SS)	59	G_SS_3	(i) Assurer la continuité fonctionnelle	La fonction	Perturbation de la circulation ferroviaire	Mise en danger des usagers
		59	G_SS_3	Assurer une gestion sûre et optimisée de l'exploitation du système de transport guidé		Perturbation de la circulation ferroviaire	Perturbation de la mobilité des usagers
		59	G_SS_3			Perturbation de la signalisation ferroviaire	Mise en danger des usagers
		59	G_SS_3			Perturbation de la signalisation ferroviaire	Perturbation de la mobilité des usagers
		59	G_SS_3			Interruption de la circulation ferroviaire	Mise en danger des usagers
		59	G_SS_3			Interruption de la circulation ferroviaire	Perturbation de la mobilité des usagers
	60	G_SS_3	(ii) Permettre le bon fonctionnement des composants situés en aval d'un composant donné	La fonction	Endommagement des câbles en gare	Perturbation de la circulation ferroviaire	

	Câbles en gare	60	G_SS_3	Permettre une circulation sûre et optimisée du matériel roulant	La fonction	Endommagement des câbles en gare	Interruption de la circulation ferroviaire						
		60	G_SS_3			Endommagement des câbles en gare	Perturbation de la signalisation ferroviaire						
		61	G_SS_3			(iii) Résister aux flux hydrauliques Résister aux pressions hydromécaniques exercées par la crue Résister aux chocs et endommagements dus aux embâcles Résister à la composition physico-chimique spécifique de l'eau	La fonction	Débit trop grand	Endommagement des câbles en gare				
		61	G_SS_3					Hauteur d'eau trop grande	Endommagement des câbles en gare				
		61	G_SS_3					Durée d'immersion trop grande	Endommagement des câbles en gare				
		61	G_SS_3					Charriage d'éléments massifs par la crue	Endommagement des câbles en gare				
		61	G_SS_3			Eviter la submersion	La fonction	Composition physico-chimique agressive de l'eau	Endommagement des câbles en gare				
		61	G_SS_3					Gare implantée en zone inondable	Endommagement des câbles en gare				
		62	G_SS_3			(iv) Limiter la circulation des flux hydrauliques au sein du système	La fonction	Endommagement des câbles en gare	Remontée partielle d'informations au PCC				
		62	G_SS_3					Préserver les composants ferroviaires des atteintes de la crue (énergie...)	Endommagement des câbles en gare	Remontée nulle d'informations au PCC			
		SMR (S)	Ensemble "remisage" (de trains voyageurs)			63	SMR_1	(i) Assurer la continuité fonctionnelle Assurer la disponibilité du système de transport guidé	La fonction	Indisponibilité du matériel roulant	Perturbation de la mobilité des usagers		
						63	SMR_1						
						64	SMR_1			(ii) Permettre le bon fonctionnement des composants situés en aval d'un composant donné Assurer le remisage du matériel roulant	La fonction	Inondation du bâtiment de maintenance	Indisponibilité du matériel roulant
						64	SMR_1					Inondation du matériel roulant	Indisponibilité du matériel roulant
65	SMR_1			(iii) Résister aux flux hydrauliques Résister aux pressions hydromécaniques exercées par la crue Résister aux chocs et endommagements dus aux embâcles Résister à la composition physico-chimique spécifique de l'eau Eviter la submersion	La fonction	Débit trop grand	Inondation du bâtiment de maintenance						
65	SMR_1					Débit trop grand	Endommagement du bâtiment de maintenance						
65	SMR_1					Hauteur d'eau trop grande	Inondation du bâtiment de maintenance						
65	SMR_1					Hauteur d'eau trop grande	Endommagement du bâtiment de maintenance						
65	SMR_1					Durée d'immersion trop grande	Inondation du bâtiment de maintenance						
65	SMR_1					Durée d'immersion trop grande	Endommagement du bâtiment de maintenance						
65	SMR_1			Eviter la submersion	La fonction	Charriage d'éléments massifs par la crue	Endommagement du matériel roulant						
65	SMR_1					Composition physico-chimique agressive de l'eau	Endommagement du bâtiment de maintenance						
65	SMR_1			(iv) Limiter la circulation des flux hydrauliques au sein du système Préserver le parc de matériel roulant remisé des atteintes de la crue	La fonction	Site de maintenance implanté en zone inondable	Inondation du bâtiment de maintenance						
66	SMR_1					Inondation du bâtiment de maintenance	Inondation du matériel roulant						
66	SMR_1				Inondation du bâtiment de maintenance	Infiltration des eaux de la crue							
Ensemble "maintenance" (de trains voyageurs)	67		SMR_2	(i) Assurer la continuité fonctionnelle Assurer l'exploitation du système de transport guidé	La fonction	Indisponibilité du matériel roulant	Perturbation de la mobilité des usagers						
	67		SMR_2			Perturbation de l'activité de maintenance	Perturbation de la circulation ferroviaire						
	68		SMR_2			(ii) Permettre le bon fonctionnement des composants situés en aval d'un composant donné Assurer la maintenance du matériel roulant	La fonction	Inondation du bâtiment de maintenance	Indisponibilité du matériel roulant				
	68		SMR_2					Inondation du bâtiment de maintenance	Perturbation de l'activité de maintenance				
	69		SMR_2			(iii) Résister aux flux hydrauliques Résister aux pressions hydromécaniques exercées par la crue Résister aux chocs et endommagements dus aux embâcles Résister à la composition physico-chimique spécifique de l'eau Eviter la submersion	La fonction	Débit trop grand	Inondation du bâtiment de maintenance				
	69		SMR_2					Débit trop grand	Endommagement du bâtiment de maintenance				
	69		SMR_2					Hauteur d'eau trop grande	Inondation du bâtiment de maintenance				
	69		SMR_2					Hauteur d'eau trop grande	Endommagement du bâtiment de maintenance				
	69		SMR_2					Durée d'immersion trop grande	Inondation du bâtiment de maintenance				
	69		SMR_2					Durée d'immersion trop grande	Endommagement du bâtiment de maintenance				
	69		SMR_2			Eviter la submersion	La fonction	Charriage d'éléments massifs par la crue	Endommagement du matériel roulant				
	69		SMR_2					Composition physico-chimique agressive de l'eau	Endommagement du bâtiment de maintenance				
	69		SMR_2			(iv) Limiter la circulation des flux hydrauliques au sein du système Préserver les composants de l'atelier de maintenance (machines-outils et stocks) des atteintes de la crue	La fonction	Site de maintenance implanté en zone inondable	Inondation du bâtiment de maintenance				
	70	SMR_2	Inondation du bâtiment de maintenance					Endommagement des composants de l'atelier de maintenance (machines-outils et stocks)					
70	SMR_2			Inondation du bâtiment de maintenance	Infiltration des eaux de la crue								
Ensemble "remisage" (de trains de voyageurs)	71	SMI_1	(i) Assurer la continuité fonctionnelle Assurer la disponibilité du système de transport guidé	La fonction	Indisponibilité des trains de travaux	Perturbation de la circulation ferroviaire							
	71	SMI_1			Perturbation de l'activité de maintenance	Interruption de la circulation ferroviaire							
	72	SMI_1			(ii) Permettre le bon fonctionnement des composants situés en aval d'un composant donné Assurer le remisage des trains de travaux	La fonction	Inondation du bâtiment de maintenance	Indisponibilité des trains de travaux					
	72	SMI_1					Inondation des trains de travaux	Indisponibilité des trains de travaux					
	73	SMI_1			(iii) Résister aux flux hydrauliques Résister aux pressions hydromécaniques exercées par la crue Résister aux chocs et endommagements dus aux embâcles Résister à la composition physico-chimique spécifique de l'eau	La fonction	Débit trop grand	Inondation du bâtiment de maintenance					
	73	SMI_1					Débit trop grand	Endommagement du bâtiment de maintenance					
	73	SMI_1					Hauteur d'eau trop grande	Inondation du bâtiment de maintenance					
	73	SMI_1					Hauteur d'eau trop grande	Endommagement du bâtiment de maintenance					

SMI (S)	Trains de travaux)	73	SMI_1	Eviter la submersion	La fonction	Durée d'immersion trop grande	Inondation du bâtiment de maintenance
		73	SMI_1			Durée d'immersion trop grande	Endommagement du bâtiment de maintenance
		73	SMI_1			Charriage d'éléments massifs par la crue	Endommagement des trains de travaux
		73	SMI_1			Composition physico-chimique agressive de l'eau	Endommagement du bâtiment de maintenance
		73	SMI_1			Site de maintenance implanté en zone inondable	Inondation du bâtiment de maintenance
		74	SMI_1			(iv) Limiter la circulation des flux hydrauliques au sein du système Préserver le parc de trains de travaux remisés des atteintes de la crue	La fonction
	74	SMI_1	Inondation du bâtiment de maintenance	Infiltration des eaux de la crue			
	Ensemble "maintenance" (des équipements fixes)	75	SMI_2	(i) Assurer la continuité fonctionnelle Assurer l'exploitation du système de transport guidé	La fonction	Indisponibilité des trains de travaux	Perturbation de la circulation ferroviaire
			SMI_2			Perturbation de l'activité de maintenance	Interruption de la circulation ferroviaire
		76	SMI_2	(ii) Permettre le bon fonctionnement des composants situés en aval d'un composant donné Assurer la maintenance des équipements fixes du système de transport guidé	La fonction	Inondation du bâtiment de maintenance	Indisponibilité des trains de travaux
			SMI_2			Inondation du bâtiment de maintenance	Perturbation de l'activité de maintenance
		77	SMI_2	(iii) Résister aux flux hydrauliques Résister aux pressions hydromécaniques exercées par la crue Résister aux chocs et endommagements dus aux embâcles Résister à la composition physico-chimique spécifique de l'eau Eviter la submersion	La fonction	Débit trop grand	Inondation du bâtiment de maintenance
			SMI_2			Débit trop grand	Endommagement du bâtiment de maintenance
			SMI_2			Hauteur d'eau trop grande	Inondation du bâtiment de maintenance
			SMI_2			Hauteur d'eau trop grande	Endommagement du bâtiment de maintenance
			SMI_2			Durée d'immersion trop grande	Inondation du bâtiment de maintenance
			SMI_2			Durée d'immersion trop grande	Endommagement du bâtiment de maintenance
			SMI_2			Charriage d'éléments massifs par la crue	Endommagement du bâtiment de maintenance
			SMI_2			Composition physico-chimique agressive de l'eau	Endommagement du bâtiment de maintenance
		78	SMI_2	(iv) Limiter la circulation des flux hydrauliques au sein du système Préserver les composants de l'atelier de maintenance (machines-outils et stocks) des atteintes de la crue	La fonction	Inondation du bâtiment de maintenance	Endommagement des composants de l'atelier de maintenance (machines-outils et stocks)
SMI_2			Inondation du bâtiment de maintenance			Infiltration des eaux de la crue	
PCC (SS)	Salle d'exploitation	79	PCC_SS_1	(i) Assurer la continuité fonctionnelle Assurer l'exploitation du système de transport guidé	La fonction	Inondation de la salle d'exploitation	Perturbation de la circulation ferroviaire
						Inondation de la salle d'exploitation	Interruption de la circulation ferroviaire
						Remontée partielle d'informations au PCC	Perturbation de la circulation ferroviaire
						Remontée partielle d'informations au PCC	Interruption de la circulation ferroviaire
						Remontée nulle d'informations au PCC	Perturbation de la circulation ferroviaire
						Remontée nulle d'informations au PCC	Interruption de la circulation ferroviaire
		80	PCC_SS_1	(ii) Permettre le bon fonctionnement des composants situés en aval d'un composant donné Assurer le commandement des différents sous-systèmes	La fonction	Inondation de la salle d'exploitation	Accès au matériel roulant perturbé pour les usagers
						Inondation de la salle d'exploitation	Perturbation dans l'alimentation électrique
						Inondation de la salle d'exploitation	Perturbation de la signalisation ferroviaire
						Inondation de la salle d'exploitation	Perturbation de l'activité de maintenance
		81	PCC_SS_1	(iii) Résister aux flux hydrauliques Résister aux flux d'infiltrations d'eau de pluie Résister aux pressions hydromécaniques exercées par la crue Résister aux chocs et endommagements dus aux embâcles Résister à la composition physico-chimique spécifique de l'eau Eviter la submersion	La fonction	Débit trop grand	Inondation de la salle d'exploitation
						Débit trop grand	Endommagement de la salle d'exploitation
						Hauteur d'eau trop grande	Inondation de la salle d'exploitation
						Hauteur d'eau trop grande	Endommagement de la salle d'exploitation
	Durée d'immersion trop grande					Inondation de la salle d'exploitation	
	Durée d'immersion trop grande					Endommagement de la salle d'exploitation	
	Charriage d'éléments massifs par la crue					Endommagement de la salle d'exploitation	
	Composition physico-chimique agressive de l'eau					Endommagement de la salle d'exploitation	
	81	PCC_SS_1			Batiment de commandement implanté en zone inondable	Inondation de la salle d'exploitation	
					Batiment de commandement implanté en zone inondable	Inondation de la salle d'exploitation	
82	PCC_SS_2	(i) Assurer la continuité fonctionnelle Assurer l'exploitation du système de transport guidé	La fonction	Perturbation de la circulation ferroviaire	Mise en danger des usagers		
				Interruption de la circulation ferroviaire	Mise en danger des usagers		
				Perturbation de la circulation ferroviaire	Perturbation de la mobilité des usagers		
				Interruption de la circulation ferroviaire	Perturbation de la mobilité des usagers		
		83	PCC_SS_2	(ii) Permettre le bon fonctionnement des composants situés en aval d'un composant donné	La fonction	Endommagement des câbles du PCC	Perturbation de la circulation ferroviaire

Câbles du PCC	83	PCC_SS_2	Assurer le commandement des différents sous-systèmes		Endommagement des câbles du PCC	Interruption de la circulation ferroviaire
	84	PCC_SS_2	(iii) Résister aux flux hydrauliques Résister aux flux d'infiltrations d'eau de pluie Résister aux pressions hydromécaniques exercées par la crue Résister aux chocs et endommagements dus aux embâcles Résister à la composition physico-chimique spécifique de l'eau	La fonction	Débit trop grand	Endommagement des câbles du PCC
	84	PCC_SS_2			Hauteur d'eau trop grande	Endommagement des câbles du PCC
	84	PCC_SS_2			Durée d'immersion trop grande	Endommagement des câbles du PCC
	84	PCC_SS_2			Charriage d'éléments massifs par la crue	Endommagement des câbles du PCC
	84	PCC_SS_2			Composition physico-chimique agressive de l'eau	Endommagement des câbles du PCC
	84	PCC_SS_2	Eviter la submersion		Batiment de commandement implanté en zone inondable	Endommagement des câbles du PCC
	85	PCC_SS_2	(iv) Limiter la circulation des flux hydrauliques au sein du système	La fonction	Endommagement des câbles du PCC	Perturbation dans l'alimentation électrique
	85	PCC_SS_2	Préserver les composants ferroviaires des atteintes de la crue (énergie...)		Endommagement des câbles du PCC	Perturbation de la signalisation ferroviaire
	85	PCC_SS_2			Endommagement des câbles du PCC	Accès au matériel roulant perturbé pour les usagers
	85	PCC_SS_2			Endommagement des câbles du PCC	Perturbation de l'activité de maintenance



Annexe C

Analyses statistiques réalisées sur les scénarios de défaillances

Le [chapitre 3](#) permet la modélisation des interdépendances entre les éléments d'un système de transport guidé. Ces interdépendances sont formalisées grâce aux potentielles *scénarios de défaillances* successives c'est-à-dire engendrées par des effets domino au sein du système lorsqu'une inondation survient.

Le [chapitre 4](#) décrit plusieurs analyses statistiques réalisées sur l'ensemble des scénarios de défaillances produits dans le cas d'un système de transport positionné en aérien, dans le cas d'un système de transport positionné en surface et dans le cas d'un système de transport positionné en souterrain.

Cette annexe présente tous les résultats, sous forme de graphique, des analyses statistiques réalisées.

C.1 Analyses statistiques portant sur la longueur moyenne des scénarios de défaillances

La **longueur** d'un scénario donné correspond au nombre de composants contenus dans ce scénario.

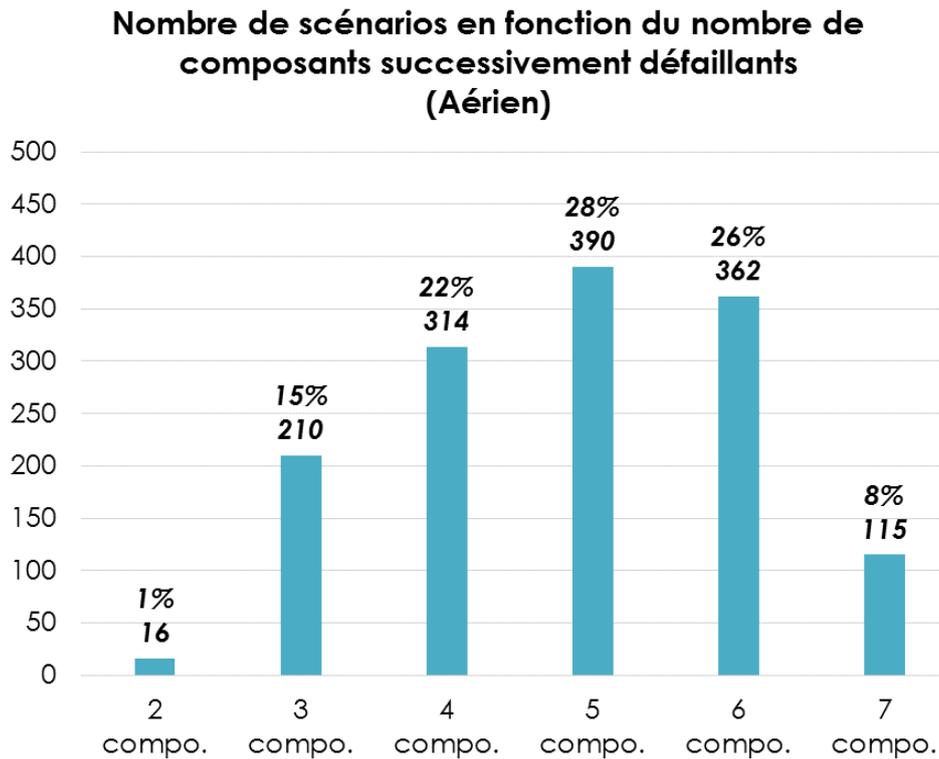


FIGURE C.1 – Histogramme descriptif des longueurs de scénarios de défaillances relatifs à la configuration d'implantation en **aérien**

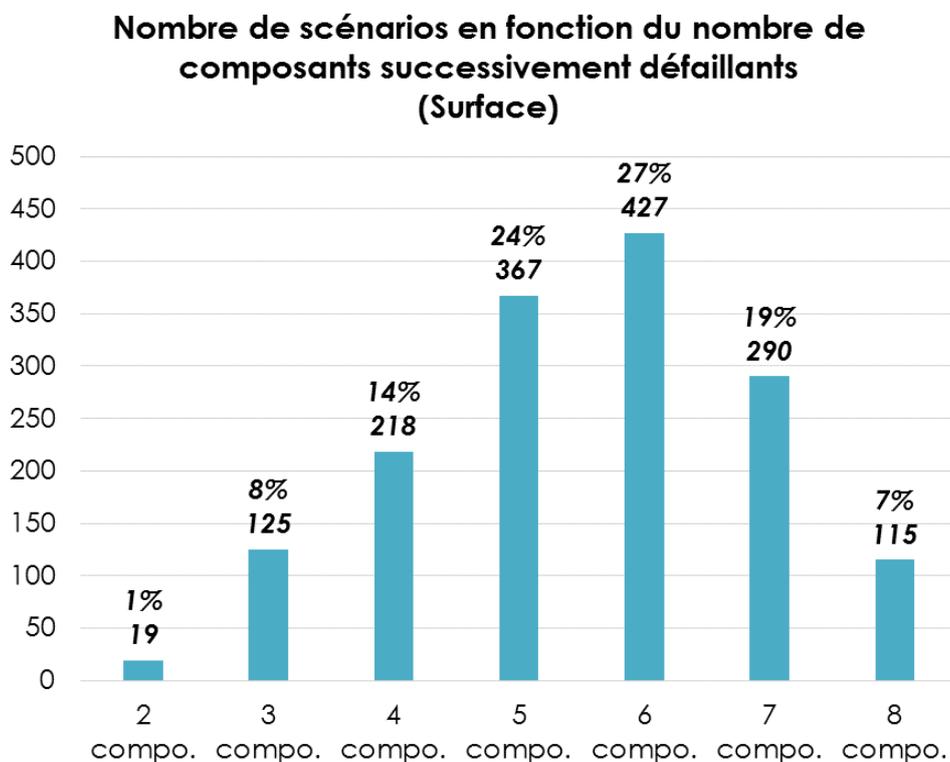


FIGURE C.2 – Histogramme descriptif des longueurs de scénarios de défaillances relatifs à la configuration d'implantation en **surface**

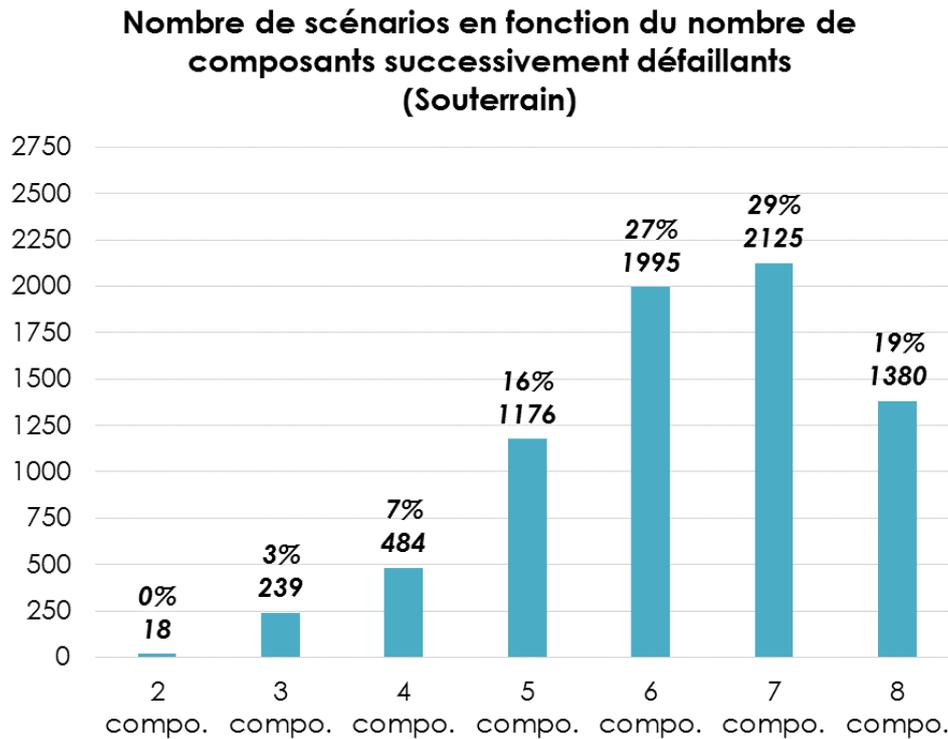


FIGURE C.3 – Histogramme descriptif des longueurs de scénarios de défaillances relatifs à la configuration d'implantation en **souterrain**

C.2 Analyses statistiques portant sur l'ordre d'apparition des composants au sein des scénarios de défaillances

Pour déterminer le **positionnement** d'un composant donné c'est-à-dire sa tendance à être plus ou moins présent dans les scénarios de défaillances, sont représentés sous forme d'histogrammes les nombres de scénarios de défaillances dans lesquels chaque composant apparaît selon plusieurs positionnements : en **premier**, en **position intermédiaire** et en **dernier**.

Les valeurs de ces **proportions** ou **scores d'apparition** sont également détaillées dans les tableaux de synthèse ci-dessous. Ces scores sont obtenus de la façon suivante : Proportion de scénarios dans lesquels le composant X est à l'**origine**

$$= \frac{\text{Nombre de fois où le composant X est en } \mathbf{position\ 1}}{\text{Nombre de scénarios contenant le composant X}} \quad (\text{C.1})$$

Proportion de scénarios dans lesquels le composant X est **intermédiaire**

$$= \frac{\text{Nombre de fois où le composant X est en } \mathbf{position\ 2\ et\ 3\ et\ \dots\ n-1}}{\text{Nombre de scénarios contenant le composant X}} \quad (\text{C.2})$$

Proportion de scénarios dans lesquels le composant X est à la **conclusion**

$$= \frac{\text{Nombre de fois où le composant X est en } \mathbf{position\ n}}{\text{Nombre de scénarios contenant le composant X}} \quad (\text{C.3})$$

où n représente le nombre de composants des scénarios considérés un à un.

Nombre de scénarios de défaillances dans lesquels chaque composant apparaît selon plusieurs positionnements (Aérien)

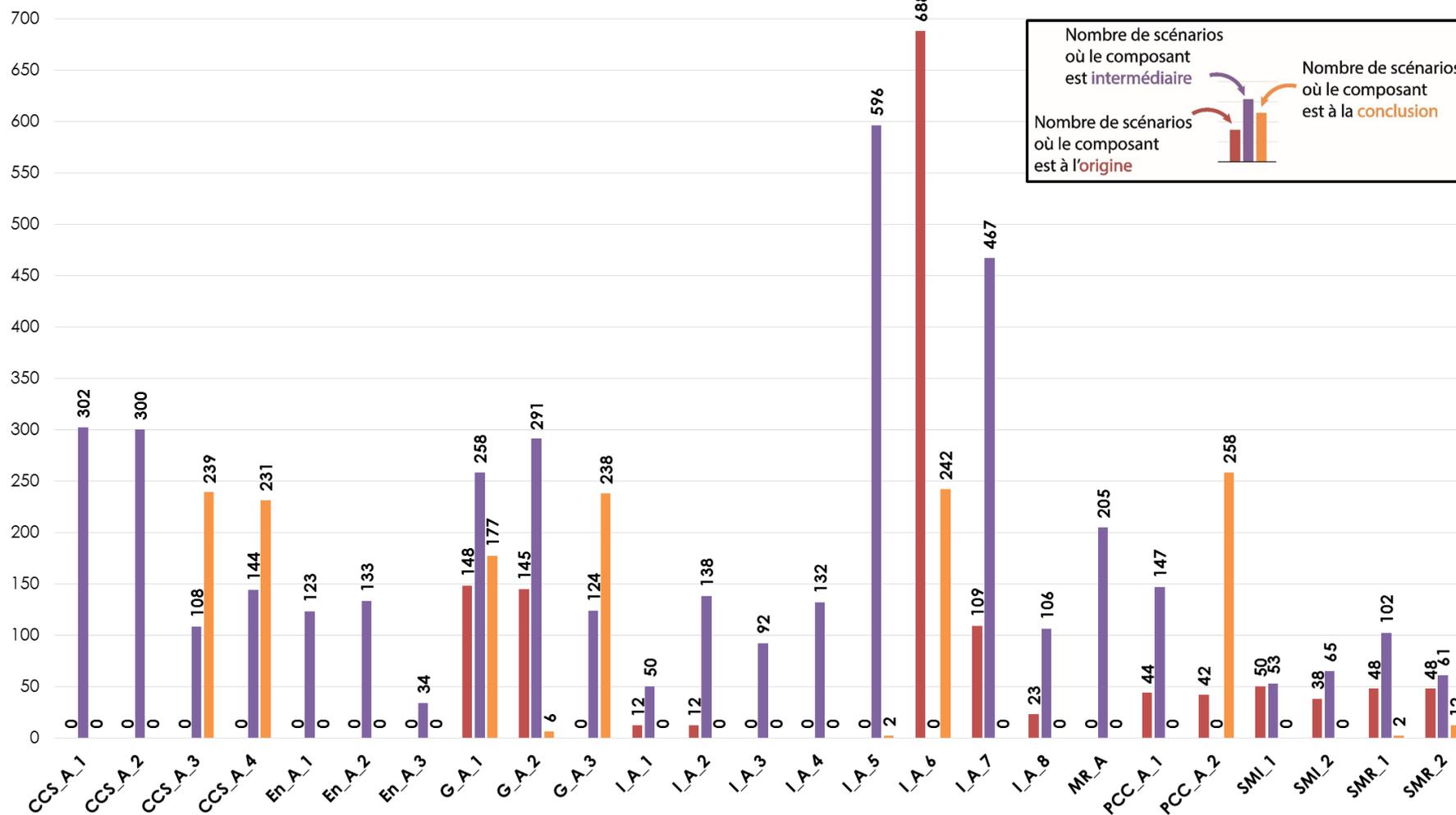


FIGURE C.4 – Histogramme présentant le positionnement des composants au sein des scénarios de défaillances relatifs à la configuration d’implantation en **aérien**

Nombre de scénarios de défaillances dans lesquels chaque composant apparaît selon plusieurs positionnements (Surface)

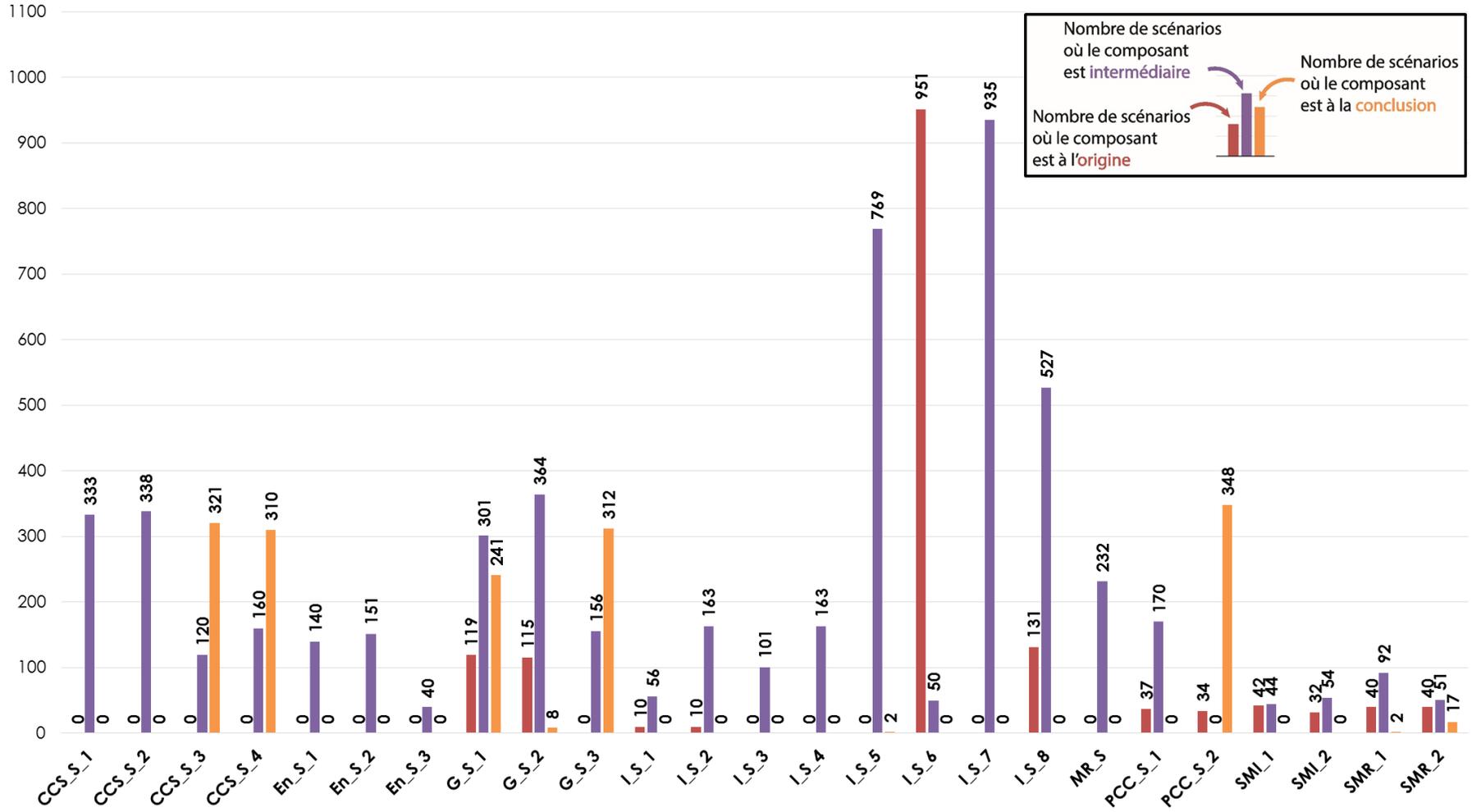


FIGURE C.5 – Histogramme présentant le positionnement des composants au sein des scénarios de défaillances relatifs à la configuration d'implantation en **surface**

Nombre de scénarios de défaillances dans lesquels chaque composant apparaît selon plusieurs positionnements (Souterrain)

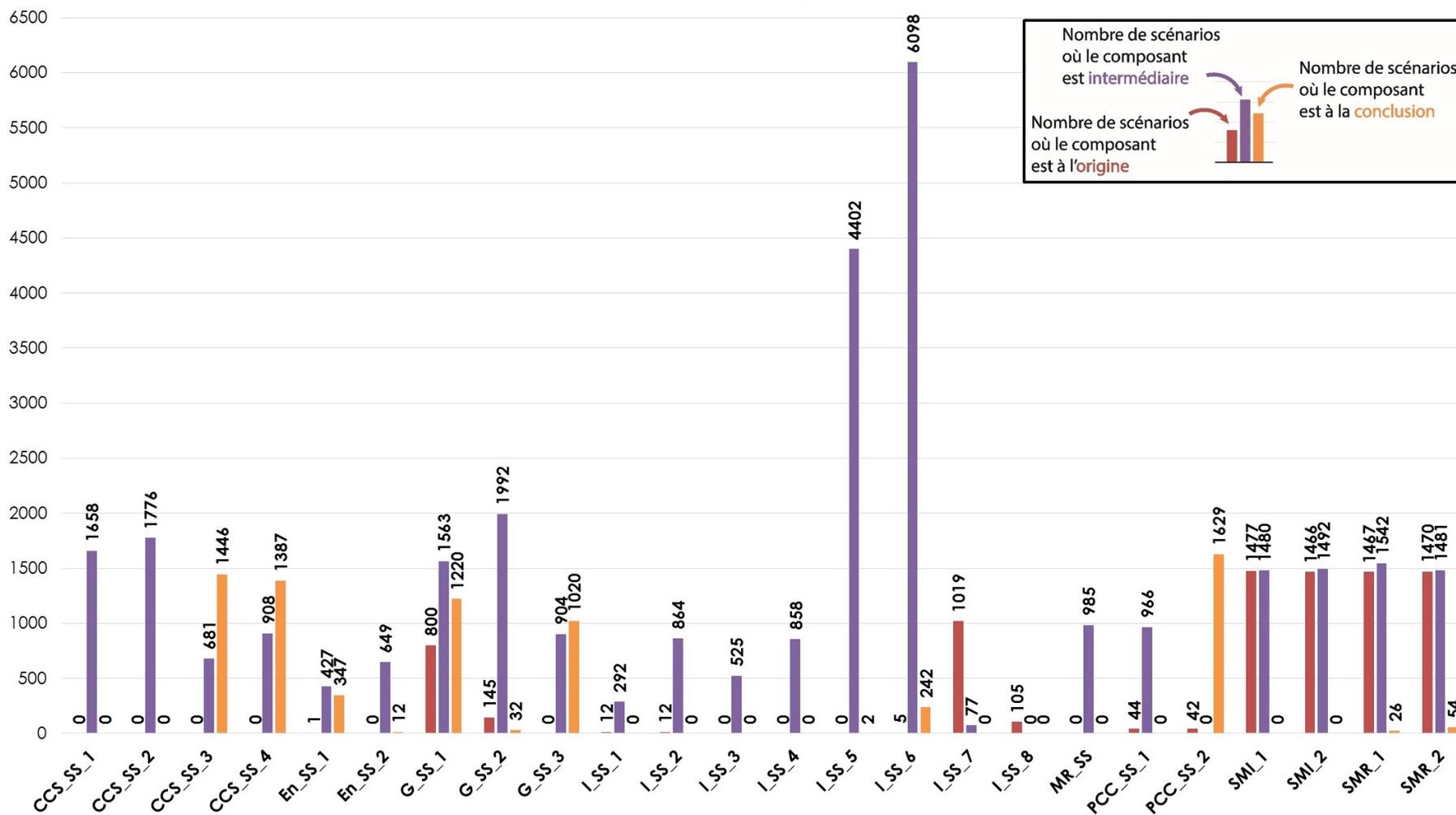


FIGURE C.6 – Histogramme présentant le positionnement des composants au sein des scénarios de défaillances relatifs à la configuration d’implantation en **souterrain**

TABLEAU C.1 – Analyse statistique concernant le positionnement moyen des composants au sein des scénarios de défaillances successives de la configuration d’implantation en **aérien**

Identifiant du composant	Désignation complète du composant	Proportion de scénarios dans lesquels le composant...		
		... est à l'origine	... joue un rôle « intermédiaire »	... est à la conclusion
CCS_A_1	Composants « à bord » au sein du matériel roulant	0,00 %	100,00 %	0,00 %
CCS_A_2	Composants au « sol » : détecteurs, balises	0,00 %	100,00 %	0,00 %
CCS_A_3	Composants « au sol » : mécanismes d'appareils de voie	0,00 %	90,97 %	9,03 %
CCS_A_4	Composants « au sol » : câbles de signalisation	0,00 %	92,33 %	7,67 %
En_A_1	Ligne aérienne de contact	0,00 %	100,00 %	0,00 %
En_A_2	Troisième rail	0,00 %	100,00 %	0,00 %
En_A_3	Pylône de caténaire	0,00 %	100,00 %	0,00 %
G_A_1	Espaces d'accès	26,43 %	70,61 %	2,96 %
G_A_2	Electromécanismes	31,07 %	68,93 %	0,00 %
G_A_3	Câbles en gare	0,00 %	92,43 %	7,57 %
I_A_1	Rails	23,53 %	76,47 %	0,00 %
I_A_2	Traverses et supports de voie	9,60 %	90,40 %	0,00 %
I_A_3	Appareils de voie	0,00 %	100,00 %	0,00 %
I_A_4	Ballast (cas de voie ballastée)	0,00 %	100,00 %	0,00 %
I_A_5	Quais	0,00 %	100,00 %	0,00 %
I_A_6	Ouvrage d'art (superstructure : pont, viaduc...)	74,90 %	25,10 %	0,00 %
I_A_7	Tuyaux de drainage	16,43 %	83,57 %	0,00 %
I_A_8	Radier ferroviaire (cas de voie bétonnée)	14,86 %	85,14 %	0,00 %
MR_A	Matériel Roulant	0,00 %	100,00 %	0,00 %
PCC_A_1	Salle d'exploitation	25,58 %	74,42 %	0,00 %
PCC_A_2	Câbles (remontées / transmission d'informations)	17,00 %	71,26 %	11,74 %
SMI_1	Ensemble « remisage » des trains de travaux	60,47 %	39,53 %	0,00 %
SMI_2	Ensemble « maintenance » des trains de travaux	54,05 %	45,95 %	0,00 %
SMR_1	Ensemble « remisage » du matériel roulant voyageurs	21,18 %	78,82 %	0,00 %
SMR_2	Ensemble « maintenance » du matériel roulant voyageurs	40,0 %	60,00 %	0,00 %

TABLEAU C.2 – Analyse statistique concernant le positionnement moyen des composants au sein des scénarios de défaillances successives de la configuration d’implantation en **surface**

Identifiant du composant	Désignation complète du composant	Proportion de scénarios dans lesquels le composant...		
		... est à l'origine	... joue un rôle « intermédiaire »	... est à la conclusion
CCS_S_1	Composants « à bord » au sein du matériel roulant	0,00 %	100,00 %	0,00 %
CCS_S_2	Composants au « sol » : détecteurs, balises	0,00 %	100,00 %	0,00 %
CCS_S_3	Composants « au sol » : mécanismes d'appareils de voie	0,00 %	94,33 %	5,67 %
CCS_S_4	Composants « au sol » : câbles de signalisation	0,00 %	95,11 %	4,89 %
En_S_1	Ligne aérienne de contact	0,00 %	100,00 %	0,00 %
En_S_2	Troisième rail	0,00 %	100,00 %	0,00 %
En_S_3	Pylône de caténaire	0,00 %	100,00 %	0,00 %
G_S_1	Espaces d'accès	18,00 %	79,73 %	2,27 %
G_S_2	Electromécanismes	23,61 %	76,39 %	0,00 %
G_S_3	Câbles en gare	0,00 %	95,09 %	4,91 %
I_S_1	Rails	15,15 %	84,85 %	0,00 %
I_S_2	Traverses et supports de voie	5,78 %	94,22 %	0,00 %
I_S_3	Appareils de voie	0,00 %	100,00 %	0,00 %
I_S_4	Ballast (cas de voie ballastée)	0,00 %	100,00 %	0,00 %
I_S_5	Quais	0,00 %	100,00 %	0,00 %
I_S_6	Structure : plateforme	95,00 %	5,00 %	0,00 %
I_S_7	Ouvrages de collecte des eaux	0,00 %	100,00 %	0,00 %
I_S_8	Radier ferroviaire (cas de voie bétonnée)	19,91 %	80,09 %	0,00 %
MR_S	Matériel Roulant	0,00 %	100,00 %	0,00 %
PCC_S_1	Salle d'exploitation	17,87 %	82,13 %	0,00 %
PCC_S_2	Câbles (remontées / transmission d'informations)	8,90 %	83,51 %	7,59 %
SMI_1	Ensemble « remisage » des trains de travaux	48,84 %	51,16 %	0,00 %
SMI_2	Ensemble « maintenance » des trains de travaux	37,21 %	62,79 %	0,00 %
SMR_1	Ensemble « remisage » du matériel roulant voyageurs	29,85 %	70,15 %	0,00 %
SMR_2	Ensemble « maintenance » du matériel roulant voyageurs	37,04 %	62,96 %	0,00 %

TABLEAU C.3 – Analyse statistique concernant le positionnement moyen des composants au sein des scénarios de défaillances successives de la configuration d'implantation en **souterrain**

Identifiant du composant	Désignation complète du composant	Proportion de scénarios dans lesquels le composant...		
		... est à l'origine	... joue un rôle « intermédiaire »	... est à la conclusion
CCS_SS_1	Composants « à bord » au sein du matériel roulant	0,00 %	100,00 %	0,00 %
CCS_SS_2	Composants au « sol » : détecteurs, balises	0,00 %	100,00 %	0,00 %
CCS_SS_3	Composants « au sol » : mécanismes d'appareils de voie	0,00 %	85,90 %	14,10 %
CCS_SS_4	Composants « au sol » : câbles de signalisation	0,00 %	87,97 %	12,03 %
En_SS_1	Ligne aérienne de contact	0,13 %	99,87 %	0,00 %
En_SS_2	Troisième rail	0,00 %	100,00 %	0,00 %
G_SS_1	Espaces d'accès	5,18 %	88,69 %	6,13 %
G_SS_2	Electromécanismes	6,69 %	93,31 %	0,00 %
G_SS_3	Câbles en gare	0,00 %	85,65 %	14,35 %
I_SS_1	Rails	3,95 %	96,05 %	0,00 %
I_SS_2	Traverses et supports de voie	1,37 %	98,63 %	0,00 %
I_SS_3	Appareils de voie	0,00 %	100,00 %	0,00 %
I_SS_4	Ballast (cas de voie ballastée)	0,00 %	100,00 %	0,00 %
I_SS_5	Quais	0,00 %	100,00 %	0,00 %
I_SS_6	Ouvrage d'art (infrastructure : tunnel)	0,08 %	99,92 %	0,00 %
I_SS_7	Pompes d'épuisement	92,97 %	7,03 %	0,00 %
I_SS_8	Radier ferroviaire (cas de voie bétonnée)	100,00 %	0,00 %	0,00 %
MR_SS	Matériel Roulant	0,00 %	100,00 %	0,00 %
PCC_SS_1	Salle d'exploitation	4,36 %	95,64 %	0,00 %
PCC_SS_2	Câbles (remontées / transmission d'informations)	2,51 %	76,66 %	20,83 %
SMI_1	Ensemble « remisage » des trains de travaux	49,95 %	50,05 %	0,00 %
SMI_2	Ensemble « maintenance » des trains de travaux	49,56 %	50,44 %	0,00 %
SMR_1	Ensemble « remisage » du matériel roulant voyageurs	48,34 %	51,66 %	0,00 %
SMR_2	Ensemble « maintenance » du matériel roulant voyageurs	48,92 %	51,08 %	0,00 %

C.3 Analyses statistiques portant sur le positionnement « intermédiaire » des composants au sein des scénarios de défaillances

Une analyse statistique est réalisée sur la **catégorie « intermédiaire »** uniquement. Cette analyse s'intéresse aux composants situés au sein d'un scénario de défaillances (ni en première position, ni en dernière position). Pour **affiner** les résultats concernant le positionnement des composants dans la catégorie « intermédiaire », celle-ci est divisée en **sous-catégories** : intermédiaire d'ordre 1 ; intermédiaire d'ordre 2 ; ... ; intermédiaire d'ordre 6 (lorsqu'elle existe).

Les résultats de ces analyses statistiques sont présentés ci-dessous sous forme d'histogrammes relativement à la configuration **souterraine**, en **surface** et **aérienne**.

Pourcentage de scénarios de défaillances dans lesquels chaque composant joue un rôle intermédiaire par rapport à tous les scénarios dans lesquels chaque composant apparaît (Aérien)

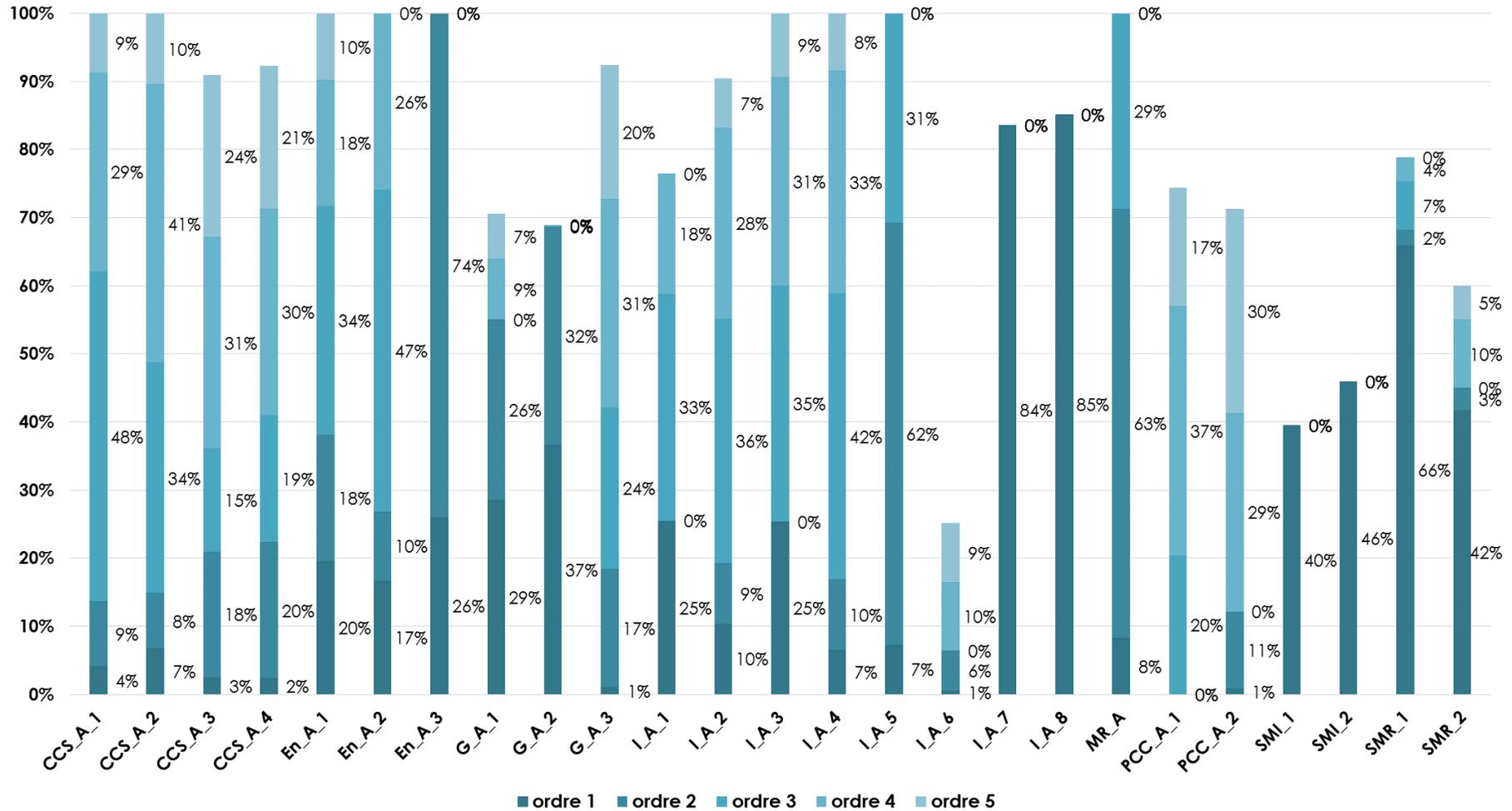


FIGURE C.7 – Histogramme présentant le positionnement « intermédiaire » des composants au sein des scénarios de défaillances relatifs à la configuration d’implantation en aérien

Pourcentage de scénarios de défaillances dans lesquels chaque composant joue un rôle intermédiaire par rapport à tous les scénarios dans lesquels chaque composant apparaît
(Surface)

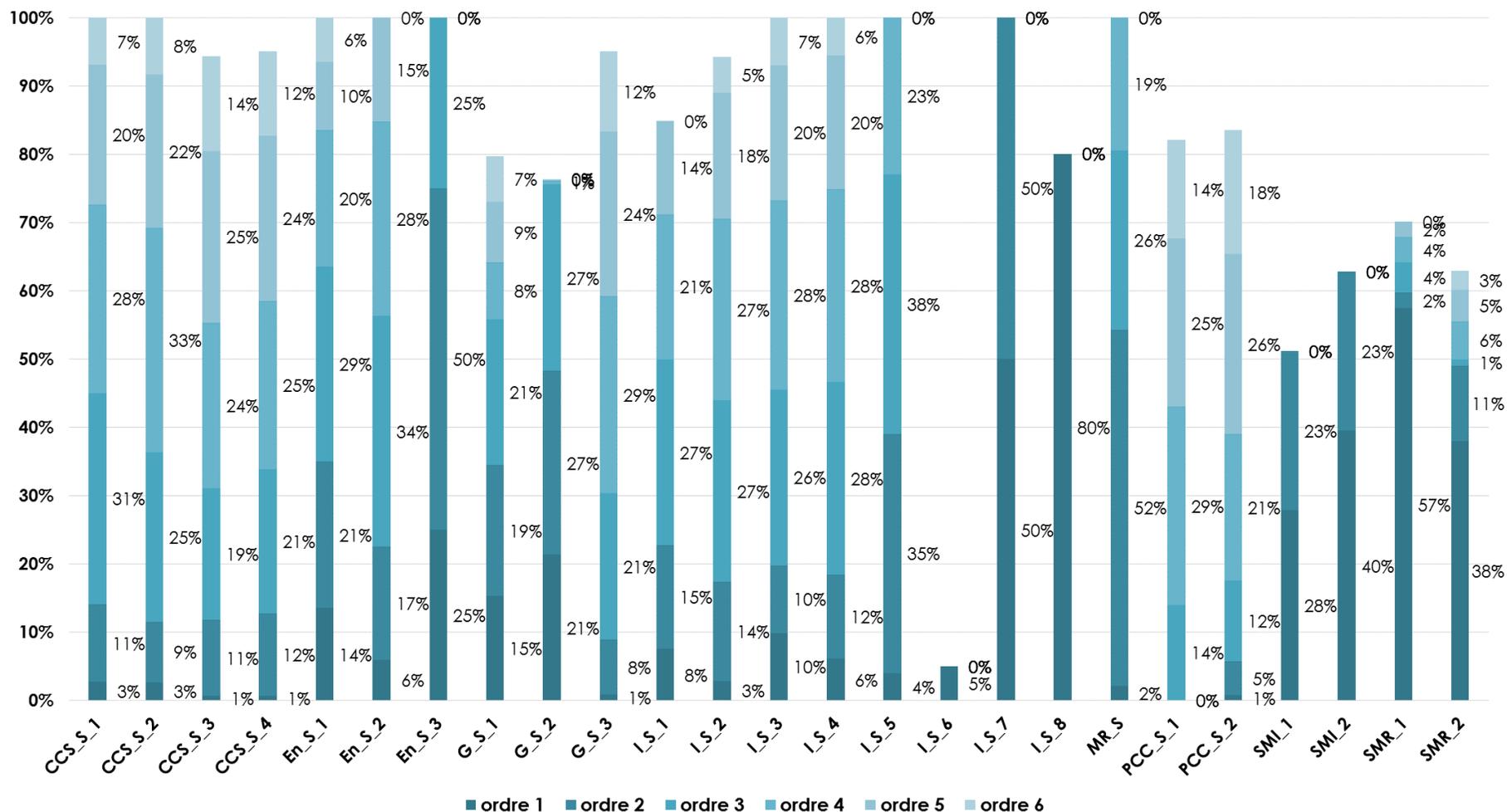


FIGURE C.8 – Histogramme présentant le positionnement « intermédiaire » des composants au sein des scénarios de défaillances relatifs à la configuration d’implantation en surface

Pourcentage de scénarios de défaillances dans lesquels chaque composant joue un rôle intermédiaire par rapport à tous les scénarios dans lesquels chaque composant apparaît (Souterrain)

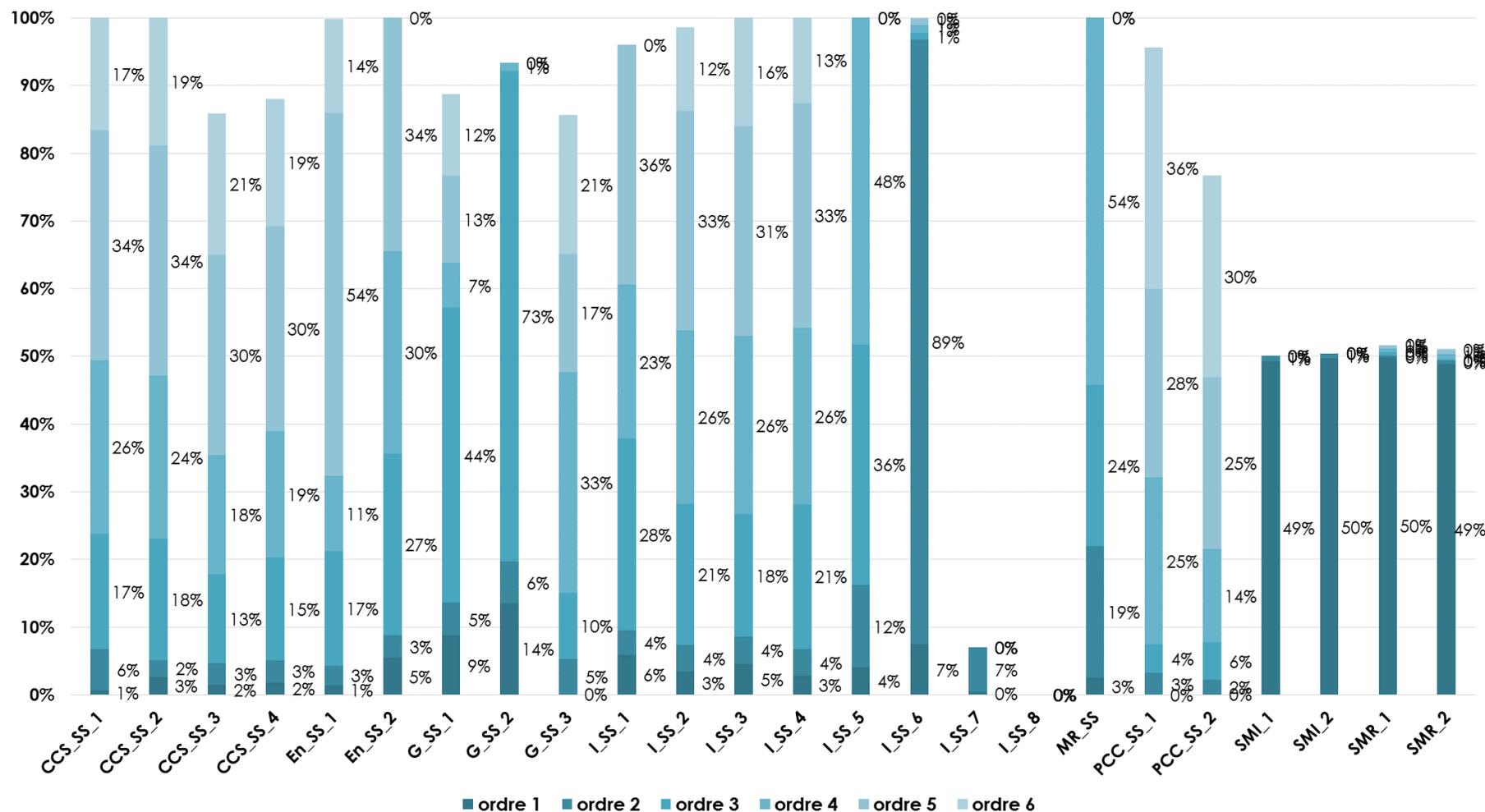


FIGURE C.9 – Histogramme présentant le positionnement « intermédiaire » des composants au sein des scénarios de défaillances relatifs à la configuration d'implantation en souterrain



Annexe D

Coûts et délais de remise en état d'un système de transport guidé touché par une inondation

Le [chapitre 5](#) propose un modèle d'estimation du **coût global** et du **délai total** de **remise en état** d'un système de transport guidé touché par une **inondation**.

Ce coût total et ce délai total sont calculés pour l'ensemble des scénarios de défaillances à partir des coûts individuels et délais individuels de remise en état de chacun des composants. Ces coûts et délais individuels sont présentés dans les tableaux de synthèse ci-dessous pour la configuration en **aérien**, en **surface** et en **souterrain**.

De plus, des analyses statistiques sont réalisées pour connaître les liens entre **longueur de scénario de défaillances** (c'est-à-dire le nombre de composants défaillants contenus dans ces scénarios) et **coût total** de remise en état ainsi que pour connaître les liens entre **longueur de scénario de défaillances** et **délai total** de remise en état. Ces distributions statistiques sont présentées ci-dessous sous forme d'histogrammes.

D.1 Coûts individuels de remise en état

TABLEAU D.1 – **Coûts** de remise en état associés aux composants d'un système de transport guidé en **aérien** pour les scénarios d'**aléa graduel N°2 et N°3**

Identifiant du composant	Désignation complète du composant	Coûts		
		Intervalles (en euros) *	Valeur BdD	Unité
CCS_A_1	Composants « à bord » au sein du matériel roulant	pls. milliers à pls. diz. de milliers	10 ⁴	€/pièce
CCS_A_2	Composants au « sol » : détecteurs, balises	pls. centaines à pls. milliers	10 ³	€/m
CCS_A_3	Composants « au sol » : mécanismes d'appareils de voie	pls. centaines à pls. milliers	10 ³	€/pièce
CCS_A_4	Composants « au sol » : câbles de signalisation	0 à pls. centaines	10 ²	€/m
En_A_1	Ligne aérienne de contact	0 à pls. centaines	10 ²	€/m
En_A_2	Troisième rail	pls. centaines à pls. milliers	10 ³	€/m
En_A_3	Pylônes et fondations	pls. centaines à pls. milliers	10 ³	€/pièce
G_A_1	Espaces d'accès	1 à pls. millions	10 ⁶	€/pièce
G_A_2	Electromécanismes	pls. diz de milliers à pls. centaines de milliers	10 ⁵	€/pièce
G_A_3	Câbles en gare	0 à pls. centaines	10 ²	€/m
I_A_1	Rails	0 à pls. centaines	10 ²	€/m
I_A_2	Traverses et supports de voie	0 à pls. centaines	10 ²	€/m
I_A_3	Appareils de voie	pls. milliers à pls. diz. de milliers	10 ⁴	€/pièce
I_A_4	Ballast (cas de voie ballastée)	0 à pls. centaines	10 ²	€/m
I_A_5	Quais	pls. milliers à pls. diz. de milliers	10 ⁴	€/pièce
I_A_6	Ouvrage d'art (superstructure : pont, viaduc...)	pls. centaines à pls. milliers	10 ³	€/m
I_A_7	Tuyaux de drainage	pls. centaines à pls. milliers	10 ³	€/pièce
I_A_8	Radier ferroviaire (cas de voie bétonnée)	pls. centaines à pls. milliers	10 ³	€/m
MR_A	Matériel Roulant	1 à pls. millions	10 ⁶	€/pièce
PCC_A_1	Salle d'exploitation	1 à pls. millions	10 ⁶	€/pièce
PCC_A_2	Câbles (remontées / transmission d'informations)	0 à pls. centaines	10 ²	€/m
SMI_1	Ensemble « remisage » des trains de travaux	1 à pls. millions	10 ⁶	€/pièce
SMI_2	Ensemble « maintenance » des trains de travaux	1 à pls. millions	10 ⁶	€/pièce
SMR_1	Ensemble « remisage » du matériel roulant voyageurs	1 à pls. millions	10 ⁶	€/pièce
SMR_2	Ensemble « maintenance » du matériel roulant voyageurs	1 à pls. millions	10 ⁶	€/pièce

* Note :

0 à pls. centaines : 0 à plusieurs centaines d'euros

pls. centaines à pls. milliers : de plusieurs centaines à plusieurs milliers d'euros ;

pls. milliers à pls. diz. de milliers : de plusieurs milliers à plusieurs dizaines de milliers d'euros ;

pls. diz de milliers à pls. centaines de milliers : de plusieurs dizaines de milliers à plusieurs centaines de milliers d'euros ;

1 à pls. millions : 1 à plusieurs millions d'euros.

TABLEAU D.2 – **Coûts** de remise en état associés aux composants d'un système de transport guidé en **surface** pour les scénarios d'**aléa graduel N°2 et N°3**

Identifiant du composant	Désignation complète du composant	Coûts		
		Intervalles (en euros) *	Valeur BdD	Unité
CCS_S_1	Composants « à bord » au sein du matériel roulant	pls. milliers à pls. diz. de milliers	10 ⁴	€/pièce
CCS_S_2	Composants au « sol » : détecteurs, balises	pls. centaines à pls. milliers	10 ³	€/m
CCS_S_3	Composants « au sol » : mécanismes d'appareils de voie	pls. centaines à pls. milliers	10 ³	€/pièce
CCS_S_4	Composants « au sol » : câbles de signalisation	0 à pls. centaines	10 ²	€/m
En_S_1	Ligne aérienne de contact	0 à pls. centaines	10 ²	€/m
En_S_2	Troisième rail	pls. centaines à pls. milliers	10 ³	€/m
En_S_3	Pylônes et fondations	pls. centaines à pls. milliers	10 ³	€/pièce
G_S_1	Espaces d'accès	1 à pls. millions	10 ⁶	€/pièce
G_S_2	Electromécanismes	pls. diz de milliers à pls. centaines de milliers	10 ⁵	€/pièce
G_S_3	Câbles en gare	0 à pls. centaines	10 ²	€/m
I_S_1	Rails	0 à pls. centaines	10 ²	€/m
I_S_2	Traverses et supports de voie	0 à pls. centaines	10 ²	€/m
I_S_3	Appareils de voie	pls. milliers à pls. diz. de milliers	10 ⁴	€/pièce
I_S_4	Ballast (cas de voie ballastée)	0 à pls. centaines	10 ²	€/m
I_S_5	Quais	pls. milliers à pls. diz. de milliers	10 ⁴	€/pièce
I_S_6	Structure : plateforme	pls. centaines à pls. milliers	10 ³	€/m
I_S_7	Ouvrage de collecte des eaux	pls. centaines à pls. milliers	10 ³	€/pièce
I_S_8	Radier ferroviaire (cas de voie bétonnée)	pls. centaines à pls. milliers	10 ³	€/m
MR_S	Matériel Roulant	1 à pls. millions	10 ⁶	€/pièce
PCC_S_1	Salle d'exploitation	1 à pls. millions	10 ⁶	€/pièce
PCC_S_2	Câbles (remontées / transmission d'informations)	0 à pls. centaines	10 ²	€/m
SMI_1	Ensemble « remisage » des trains de travaux	1 à pls. millions	10 ⁶	€/pièce
SMI_2	Ensemble « maintenance » des trains de travaux	1 à pls. millions	10 ⁶	€/pièce
SMR_1	Ensemble « remisage » du matériel roulant voyageurs	1 à pls. millions	10 ⁶	€/pièce
SMR_2	Ensemble « maintenance » du matériel roulant voyageurs	1 à pls. millions	10 ⁶	€/pièce

* Note :

0 à pls. centaines : 0 à plusieurs centaines d'euros

pls. centaines à pls. milliers : de plusieurs centaines à plusieurs milliers d'euros ;

pls. milliers à pls. diz. de milliers : de plusieurs milliers à plusieurs dizaines de milliers d'euros ;

pls. diz de milliers à pls. centaines de milliers : de plusieurs dizaines de milliers à plusieurs centaines de milliers d'euros ;

1 à pls. millions : 1 à plusieurs millions d'euros.

TABLEAU D.3 – **Coûts** de remise en état associés aux composants d'un système de transport guidé en **souterrain** pour les scénarios d'**aléa graduel N°2 et N°3**

Identifiant du composant	Désignation complète du composant	Coûts		
		Intervalles (en euros) *	Valeur BdD	Unité
CCS_SS_1	Composants « à bord » au sein du matériel roulant	pls. milliers à pls. diz. de milliers	10 ⁴	€/pièce
CCS_SS_2	Composants au « sol » : détecteurs, balises	pls. centaines à pls. milliers	10 ³	€/m
CCS_SS_3	Composants « au sol » : mécanismes d'appareils de voie	pls. centaines à pls. milliers	10 ³	€/pièce
CCS_SS_4	Composants « au sol » : câbles de signalisation	0 à pls. centaines	10 ²	€/m
En_SS_1	Ligne aérienne de contact	0 à pls. centaines	10 ²	€/m
En_SS_2	Troisième rail	pls. centaines à pls. milliers	10 ³	€/m
G_SS_1	Espaces d'accès	1 à pls. millions	10 ⁶	€/pièce
G_SS_2	Electromécanismes	pls. diz de milliers à pls. centaines de milliers	10 ⁵	€/pièce
G_SS_3	Câbles en gare	0 à pls. centaines	10 ²	€/m
I_SS_1	Rails	0 à pls. centaines	10 ²	€/m
I_SS_2	Traverses et supports de voie	0 à pls. centaines	10 ²	€/m
I_SS_3	Appareils de voie	pls. milliers à pls. diz. de milliers	10 ⁴	€/pièce
I_SS_4	Ballast (cas de voie ballastée)	0 à pls. centaines	10 ²	€/m
I_SS_5	Quais	pls. milliers à pls. diz. de milliers	10 ⁴	€/pièce
I_SS_6	Ouvrage d'art (infrastructure : tunnel)	1 à pls. millions	10 ⁶	€/pièce
I_SS_7	Pompes d'épuisement	pls. diz de milliers à pls. centaines de milliers	10 ⁵	€/pièce
I_SS_8	Radier ferroviaire (cas de voie bétonnée)	pls. centaines à pls. milliers	10 ³	€/m
MR_SS	Matériel Roulant	1 à pls. millions	10 ⁶	€/pièce
PCC_SS_1	Salle d'exploitation	1 à pls. millions	10 ⁶	€/pièce
PCC_SS_2	Câbles (remontées / transmission d'informations)	0 à pls. centaines	10 ²	€/m
SMI_1	Ensemble « remisage » des trains de travaux	1 à pls. millions	10 ⁶	€/pièce
SMI_2	Ensemble « maintenance » des trains de travaux	1 à pls. millions	10 ⁶	€/pièce
SMR_1	Ensemble « remisage » du matériel roulant voyageurs	1 à pls. millions	10 ⁶	€/pièce
SMR_2	Ensemble « maintenance » du matériel roulant voyageurs	1 à pls. millions	10 ⁶	€/pièce

* Note :

0 à pls. centaines : 0 à plusieurs centaines d'euros

pls. centaines à pls. milliers : de plusieurs centaines à plusieurs milliers d'euros ;

pls. milliers à pls. diz. de milliers : de plusieurs milliers à plusieurs dizaines de milliers d'euros ;

pls. diz de milliers à pls. centaines de milliers : de plusieurs dizaines de milliers à plusieurs centaines de milliers d'euros ;

1 à pls. millions : 1 à plusieurs millions d'euros.

D.2 Délais individuels de remise en état

TABLEAU D.4 – **Délais** de remise en état associés aux composants d'un système de transport guidé en **aérien** pour les scénarios d'**aléa graduel N°2 et N°3**

Identifiant du composant	Désignation complète du composant	Délais *	
		Scénario d'aléa graduel N°2	Scénario d'aléa graduel N°3
CCS_A_1	Composants « à bord » au sein du matériel roulant	1 à pls. années	1 à pls. années
CCS_A_2	Composants au « sol » : détecteurs, balises	pls. jours à pls. semaines	pls. jours à pls. semaines
CCS_A_3	Composants « au sol » : mécanismes d'appareils de voie	pls. heures à pls. jours	pls. heures à pls. jours
CCS_A_4	Composants « au sol » : câbles de signalisation	pls. jours à pls. semaines	pls. jours à pls. semaines
En_A_1	Ligne aérienne de contact	pls. heures à pls. jours	pls. semaines à pls. mois
En_A_2	Troisième rail	0 à pls. heures	0 à pls. heures
En_A_3	Pylônes et fondations	pls. heures à pls. jours	pls. semaines à pls. mois
G_A_1	Espaces d'accès	pls. heures à pls. jours	pls. heures à pls. jours
G_A_2	Electromécanismes	pls. jours à pls. semaines	pls. jours à pls. semaines
G_A_3	Câbles en gare	pls. heures à pls. jours	pls. heures à pls. jours
I_A_1	Rails	0 à pls. heures	0 à pls. heures
I_A_2	Traverses et supports de voie	0 à pls. heures	0 à pls. heures
I_A_3	Appareils de voie	0 à pls. heures	0 à pls. heures
I_A_4	Ballast (cas de voie ballastée)	pls. heures à pls. jours	pls. semaines à pls. mois
I_A_5	Quais	pls. jours à pls. semaines	pls. jours à pls. semaines
I_A_6	Ouvrage d'art (superstructure : pont, viaduc...)	0 à pls. heures	pls. semaines à pls. mois
I_A_7	Tuyaux de drainage	0 à pls. heures	0 à pls. heures
I_A_8	Radier ferroviaire (cas de voie bétonnée)	0 à pls. heures	0 à pls. heures
MR_A	Matériel Roulant	1 à pls. années	1 à pls. années
PCC_A_1	Salle d'exploitation	1 à pls. années	1 à pls. années
PCC_A_2	pls. heures à pls. jours	pls. heures à pls. jours	
SMI_1	Ensemble « remisage » des trains de travaux	0 à pls. heures	pls. semaines à pls. mois
SMI_2	Ensemble « maintenance » des trains de travaux	0 à pls. heures	1 à pls. années
SMR_1	Ensemble « remisage » du matériel roulant voyageurs	0 à pls. heures	pls. semaines à pls. mois
SMR_2	Ensemble « maintenance » du matériel roulant voyageurs	0 à pls. heures	1 à pls. années

* Note :

0 à pls. heures : 0 à plusieurs heures ;

pls. heures à pls. jours : de plusieurs heures à plusieurs jours ;

pls. jours à pls. semaines : de plusieurs jours à plusieurs semaines ;

pls. semaines à pls. mois : de plusieurs semaines à plusieurs mois ;

1 à pls. années : de 1 à plusieurs années.

TABLEAU D.5 – **Délais** de remise en état associés aux composants d'un système de transport guidé en **surface** pour les scénarios d'**aléa graduel N°2 et N°3**

Identifiant du composant	Désignation complète du composant	Délais *	
		Scénario d'aléa graduel N°2	Scénario d'aléa graduel N°3
CCS_S_1	Composants « à bord » au sein du matériel roulant	1 à pls. années	1 à pls. années
CCS_S_2	Composants au « sol » : détecteurs, balises	pls. jours à pls. semaines	pls. jours à pls. semaines
CCS_S_3	Composants « au sol » : mécanismes d'appareils de voie	pls. heures à pls. jours	pls. heures à pls. jours
CCS_S_4	Composants « au sol » : câbles de signalisation	pls. jours à pls. semaines	pls. jours à pls. semaines
En_S_1	Ligne aérienne de contact	pls. heures à pls. jours	pls. semaines à pls. mois
En_S_2	Troisième rail	0 à pls. heures	0 à pls. heures
En_S_3	Pylônes et fondations	pls. heures à pls. jours	pls. semaines à pls. mois
G_S_1	Espaces d'accès	pls. heures à pls. jours	pls. heures à pls. jours
G_S_2	Electromécanismes	pls. jours à pls. semaines	pls. jours à pls. semaines
G_S_3	Câbles en gare	pls. heures à pls. jours	pls. heures à pls. jours
I_S_1	Rails	0 à pls. heures	0 à pls. heures
I_S_2	Traverses et supports de voie	0 à pls. heures	0 à pls. heures
I_S_3	Appareils de voie	0 à pls. heures	0 à pls. heures
I_S_4	Ballast (cas de voie ballastée)	pls. heures à pls. jours	pls. semaines à pls. mois
I_S_5	Quais	pls. jours à pls. semaines	pls. jours à pls. semaines
I_S_6	Structure : plateforme	pls. heures à pls. jours	pls. semaines à pls. mois
I_S_7	Ouvrage de collecte des eaux	0 à pls. heures	0 à pls. heures
I_S_8	Radier ferroviaire (cas de voie bétonnée)	0 à pls. heures	0 à pls. heures
MR_S	Matériel Roulant	1 à pls. années	1 à pls. années
PCC_S_1	Salle d'exploitation	1 à pls. années	1 à pls. années
PCC_S_2	pls. heures à pls. jours	pls. heures à pls. jours	
SMI_1	Ensemble « remisage » des trains de travaux	0 à pls. heures	pls. semaines à pls. mois
SMI_2	Ensemble « maintenance » des trains de travaux	0 à pls. heures	1 à pls. années
SMR_1	Ensemble « remisage » du matériel roulant voyageurs	0 à pls. heures	pls. semaines à pls. mois
SMR_2	Ensemble « maintenance » du matériel roulant voyageurs	0 à pls. heures	1 à pls. années

* Note :

0 à pls. heures : 0 à plusieurs heures ;

pls. heures à pls. jours : de plusieurs heures à plusieurs jours ;

pls. jours à pls. semaines : de plusieurs jours à plusieurs semaines ;

pls. semaines à pls. mois : de plusieurs semaines à plusieurs mois ;

1 à pls. années : de 1 à plusieurs années.

TABLEAU D.6 – **Délais** de remise en état associés aux composants d'un système de transport guidé en **souterrain** pour les scénarios d'**aléa graduel N°2 et N°3**

Identifiant du composant	Désignation complète du composant	Délais *	
		Scénario d'aléa graduel N°2	Scénario d'aléa graduel N°3
CCS_SS_1	Composants « à bord » au sein du matériel roulant	1 à pls. années	1 à pls. années
CCS_SS_2	Composants au « sol » : détecteurs, balises	pls. jours à pls. semaines	pls. jours à pls. semaines
CCS_SS_3	Composants « au sol » : mécanismes d'appareils de voie	pls. heures à pls. jours	pls. heures à pls. jours
CCS_SS_4	Composants « au sol » : câbles de signalisation	pls. jours à pls. semaines	pls. jours à pls. semaines
En_SS_1	Ligne aérienne de contact	pls. heures à pls. jours	pls. semaines à pls. mois
En_SS_2	Troisième rail	0 à pls. heures	0 à pls. heures
G_SS_1	Espaces d'accès	pls. heures à pls. jours	pls. heures à pls. jours
G_SS_2	Electromécanismes	pls. jours à pls. semaines	pls. jours à pls. semaines
G_SS_3	Câbles en gare	pls. heures à pls. jours	pls. heures à pls. jours
I_SS_1	Rails	0 à pls. heures	0 à pls. heures
I_SS_2	Traverses et supports de voie	0 à pls. heures	0 à pls. heures
I_SS_3	Appareils de voie	0 à pls. heures	0 à pls. heures
I_SS_4	Ballast (cas de voie ballastée)	pls. heures à pls. jours	pls. semaines à pls. mois
I_SS_5	Quais	pls. jours à pls. semaines	pls. jours à pls. semaines
I_SS_6	Ouvrage d'art (infrastructure : tunnel)	1 à pls. années	1 à pls. années
I_SS_7	Pompes d'épuisement	0 à pls. heures	0 à pls. heures
I_SS_8	Radier ferroviaire (cas de voie bétonnée)	0 à pls. heures	0 à pls. heures
MR_SS	Matériel Roulant	1 à pls. années	1 à pls. années
PCC_SS_1	Salle d'exploitation	1 à pls. années	1 à pls. années
PCC_SS_2	pls. heures à pls. jours	pls. heures à pls. jours	
SMI_1	Ensemble « remisage » des trains de travaux	0 à pls. heures	pls. semaines à pls. mois
SMI_2	Ensemble « maintenance » des trains de travaux	0 à pls. heures	1 à pls. années
SMR_1	Ensemble « remisage » du matériel roulant voyageurs	0 à pls. heures	pls. semaines à pls. mois
SMR_2	Ensemble « maintenance » du matériel roulant voyageurs	0 à pls. heures	1 à pls. années

* Note :

0 à pls. heures : 0 à plusieurs heures ;

pls. heures à pls. jours : de plusieurs heures à plusieurs jours ;

pls. jours à pls. semaines : de plusieurs jours à plusieurs semaines ;

pls. semaines à pls. mois : de plusieurs semaines à plusieurs mois ;

1 à pls. années : de 1 à plusieurs années.

D.3 Distribution du coût total en fonction de la longueur des scénarios de défaillances

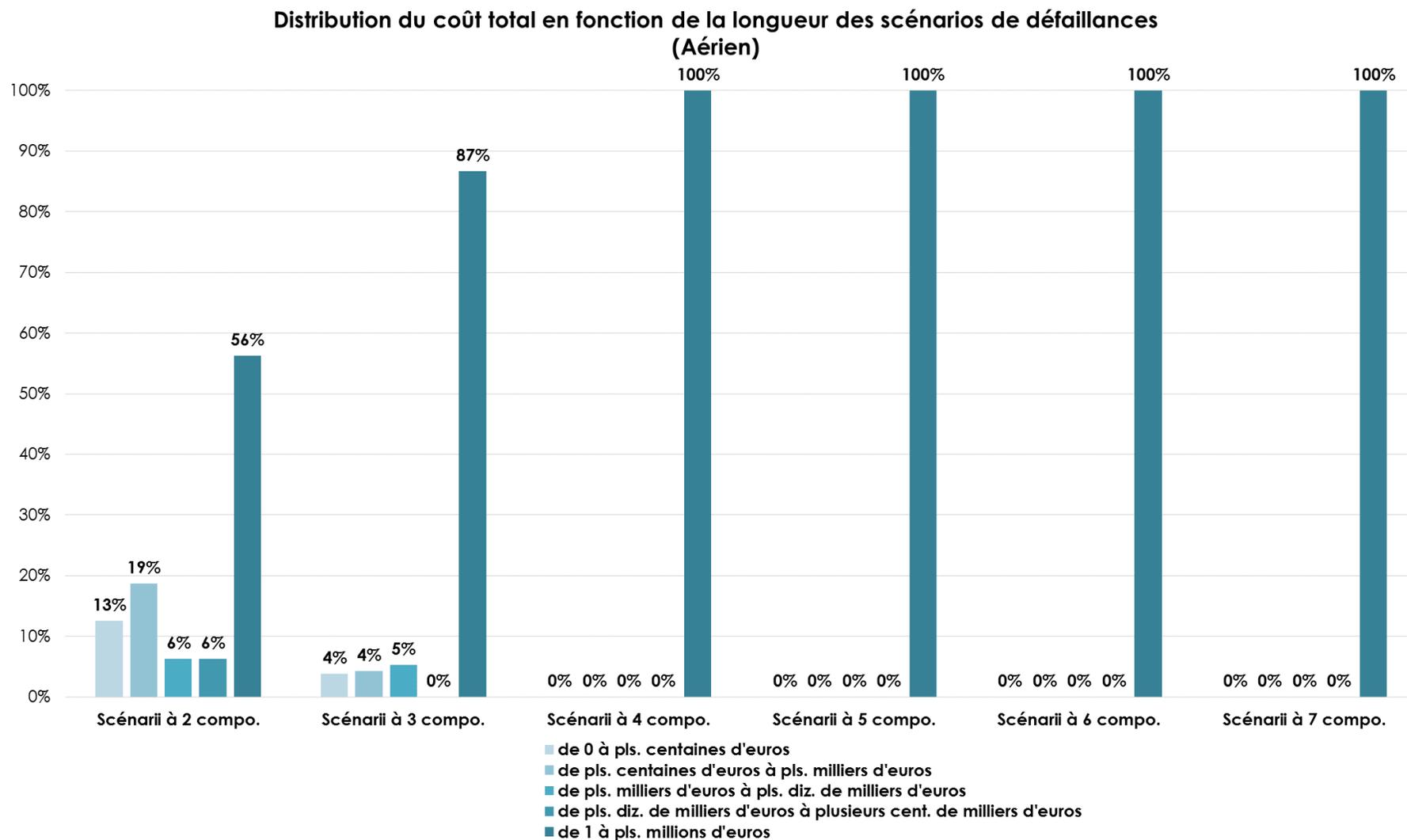


FIGURE D.1 – Histogramme présentant la distribution du **coût total** en fonction de la **longueur** des scénarios de défaillances pour la configuration d'implantation en **aérien**

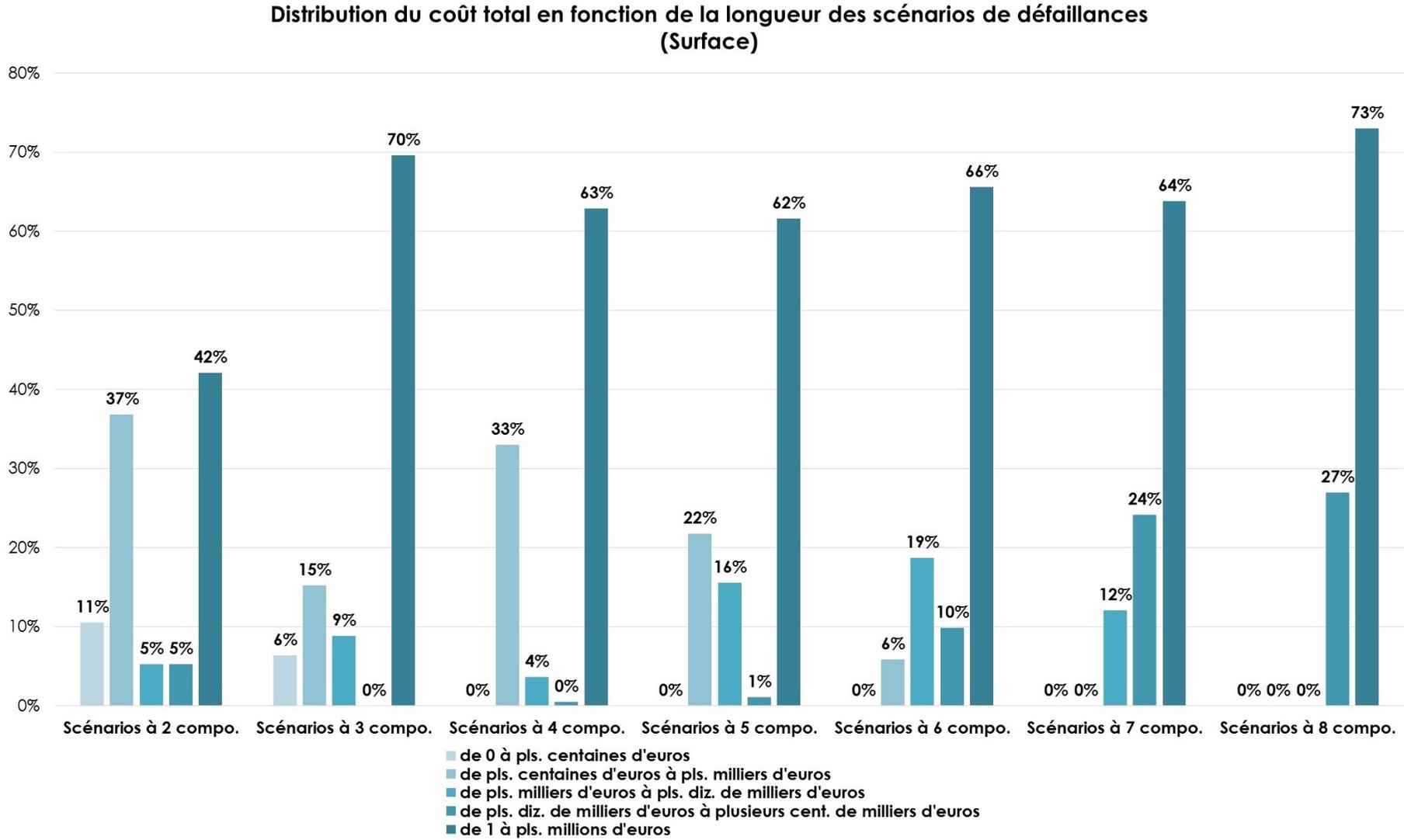


FIGURE D.2 – Histogramme présentant la distribution du **coût total** en fonction de la **longueur** des scénarios de défaillances pour la configuration d'implantation en **surface**

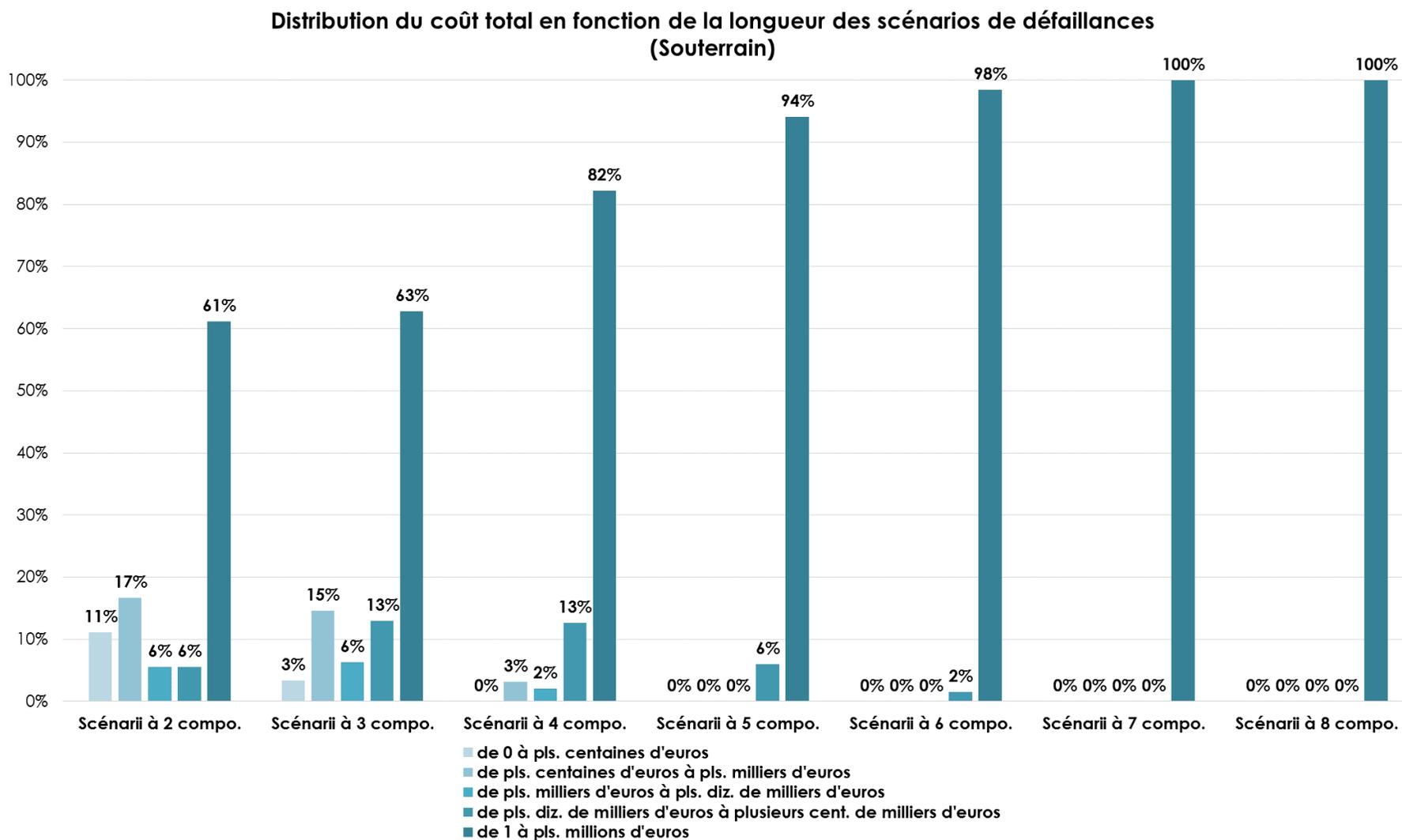


FIGURE D.3 – Histogramme présentant la distribution du **coût total** en fonction de la **longueur** des scénarios de défaillances pour la configuration d'implantation en **souterrain**

D.4 Distribution du délai total en fonction de la longueur des scénarios de défaillances

Distribution du délai total en fonction de la longueur des scénarios de défaillances (Aérien- Aléa graduel N°2)

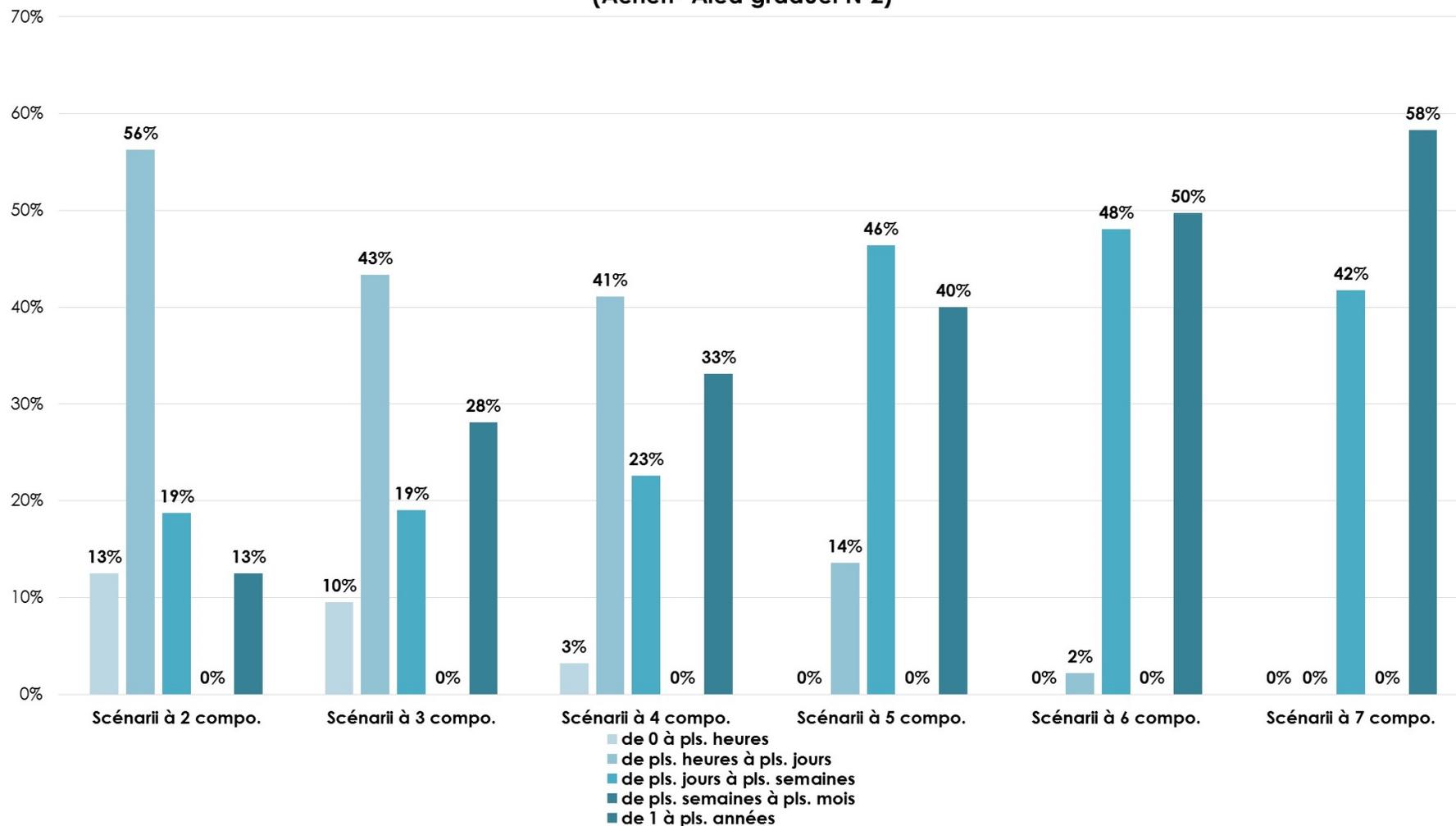


FIGURE D.4 – Histogramme présentant la distribution du **déla** total relatif à un scénario graduel d'**aléa intermédiaire** (N°2) en fonction de la **longueur** des scénarios de défaillances pour la configuration d'implantation en **aérien**

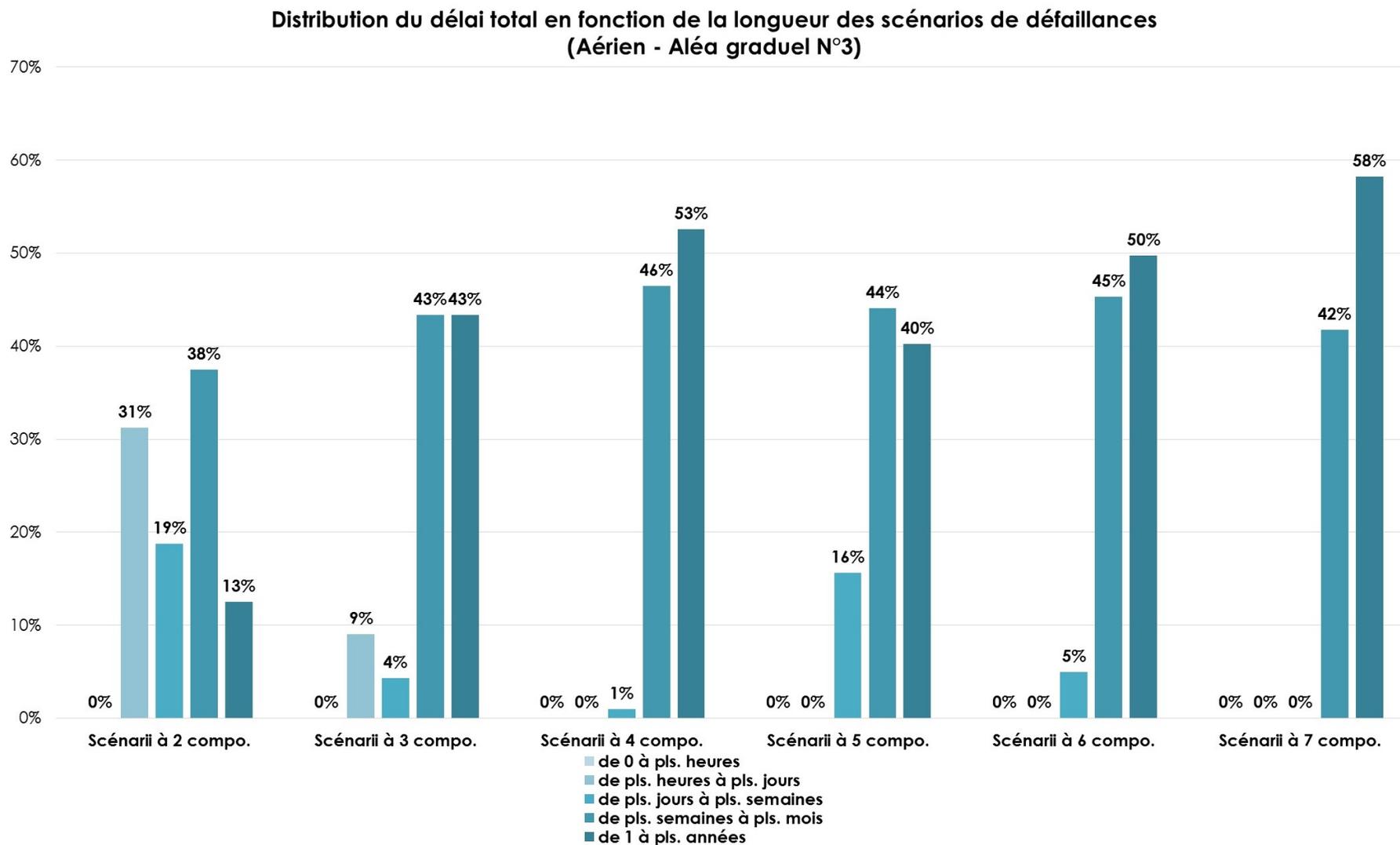


FIGURE D.5 – Histogramme présentant la distribution du **délai total** relatif à un scénario graduel d'**aléa rapide** (N°3) en fonction de la **longueur** des scénarios de défaillances pour la configuration d'implantation en **aérien**

Distribution du délai total en fonction de la longueur des scénarios de défaillances
(Surface - Aléa graduel N°2)

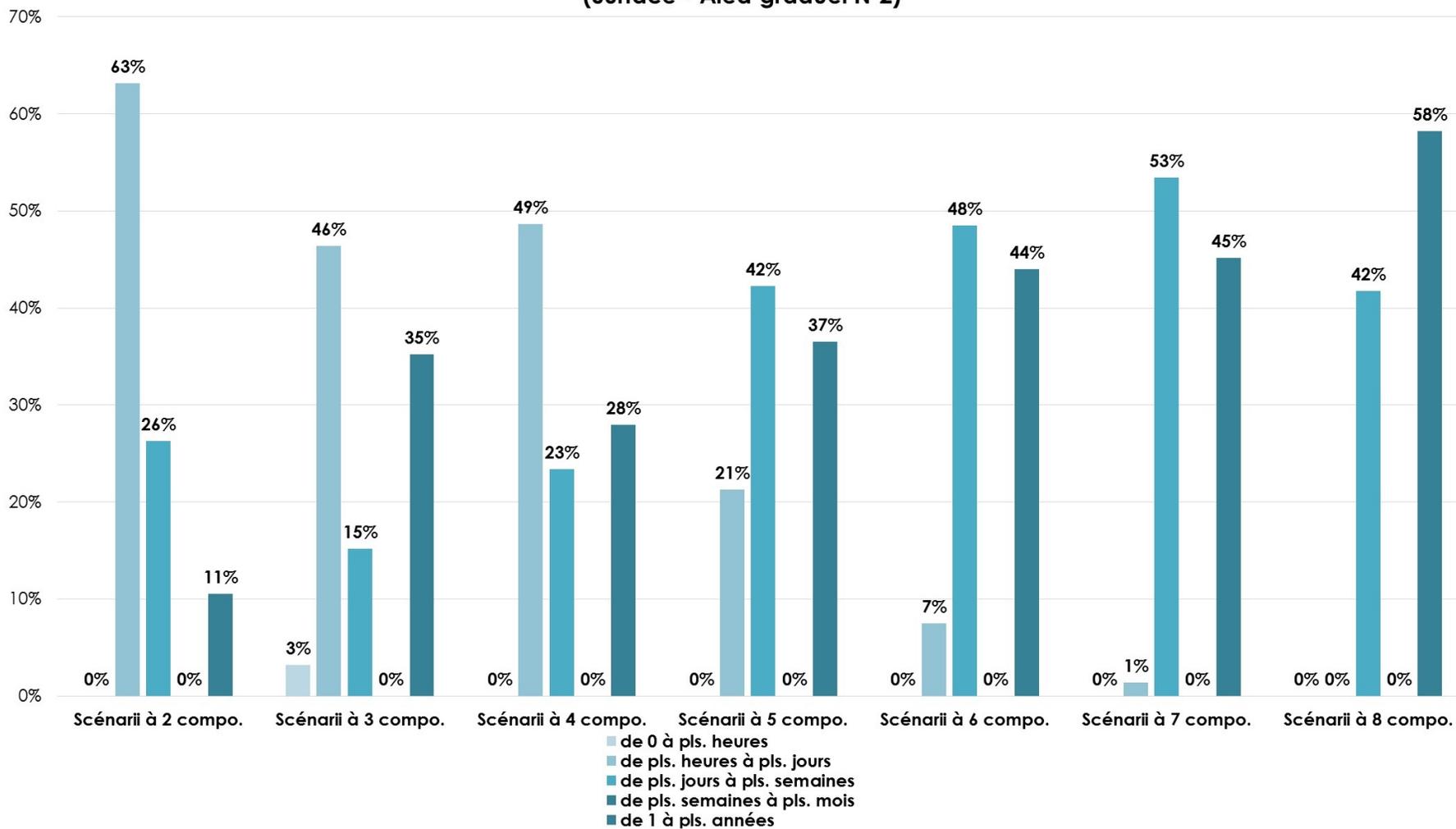


FIGURE D.6 – Histogramme présentant la distribution du **délai total** relatif à un scénario graduel d'**aléa intermédiaire** (N°2) en fonction de la **longueur** des scénarios de défaillances pour la configuration d'implantation en **surface**

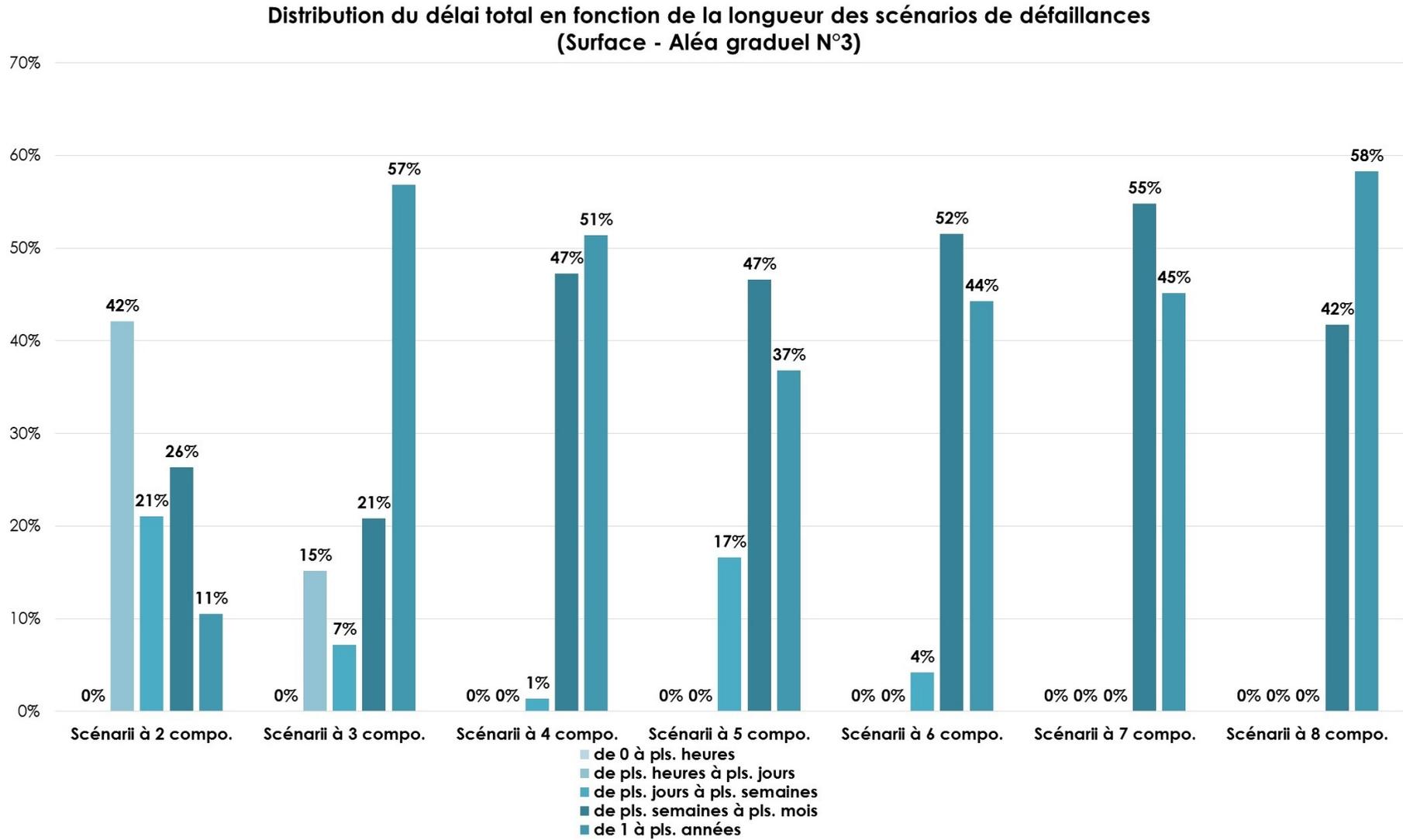


FIGURE D.7 – Histogramme présentant la distribution du **délai total** relatif à un scénario graduel d'**aléa rapide** (N°3) en fonction de la **longueur** des scénarios de défaillances pour la configuration d'implantation en **surface**

Distribution du délai total en fonction de la longueur des scénarios de défaillances (Souterrain - Aléa graduel N°2)

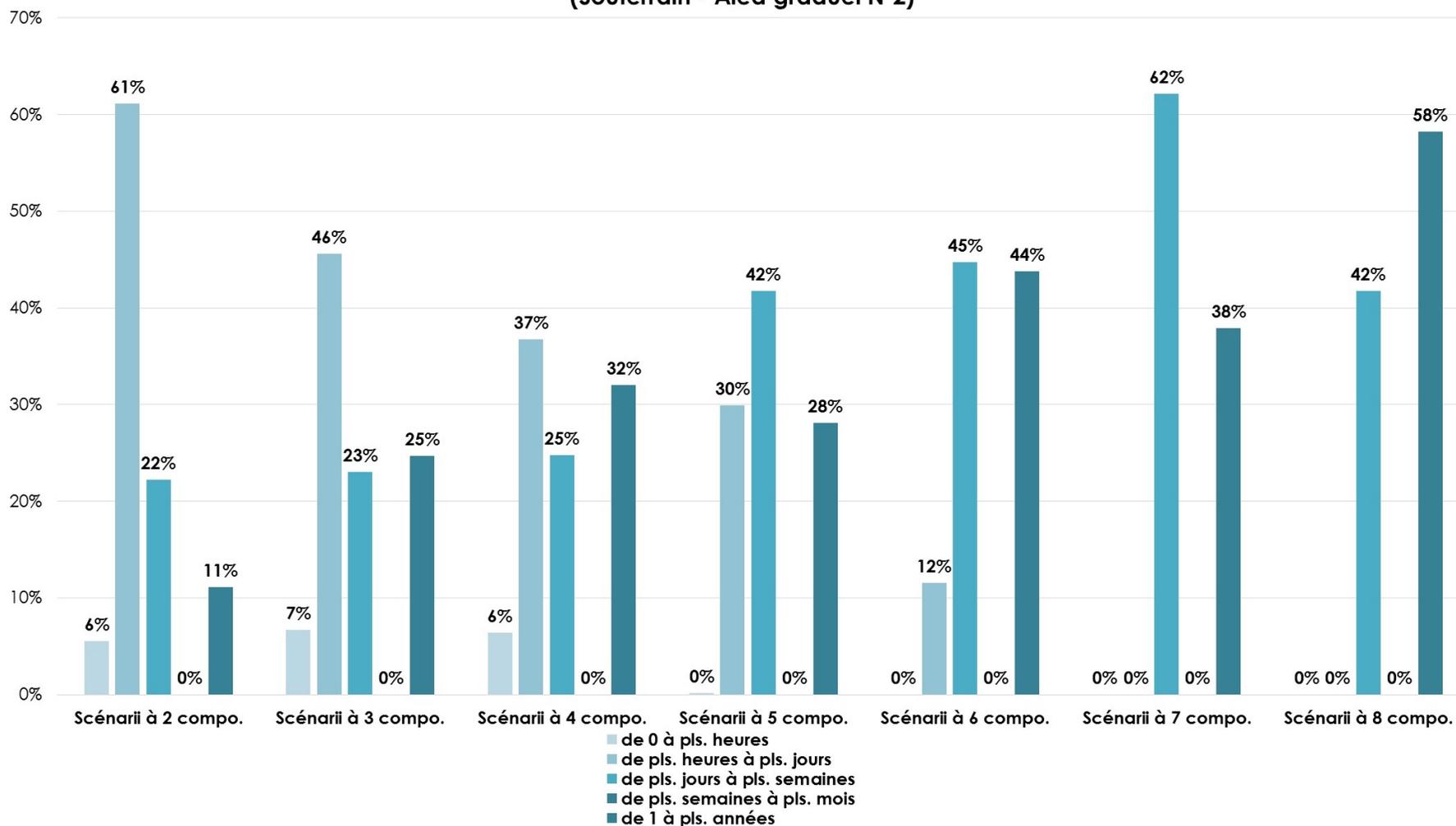


FIGURE D.8 – Histogramme présentant la distribution du **délai total** relatif à un scénario graduel d'**aléa intermédiaire** (N°2) en fonction de la **longueur** des scénarios de défaillances pour la configuration d'implantation en **souterrain**

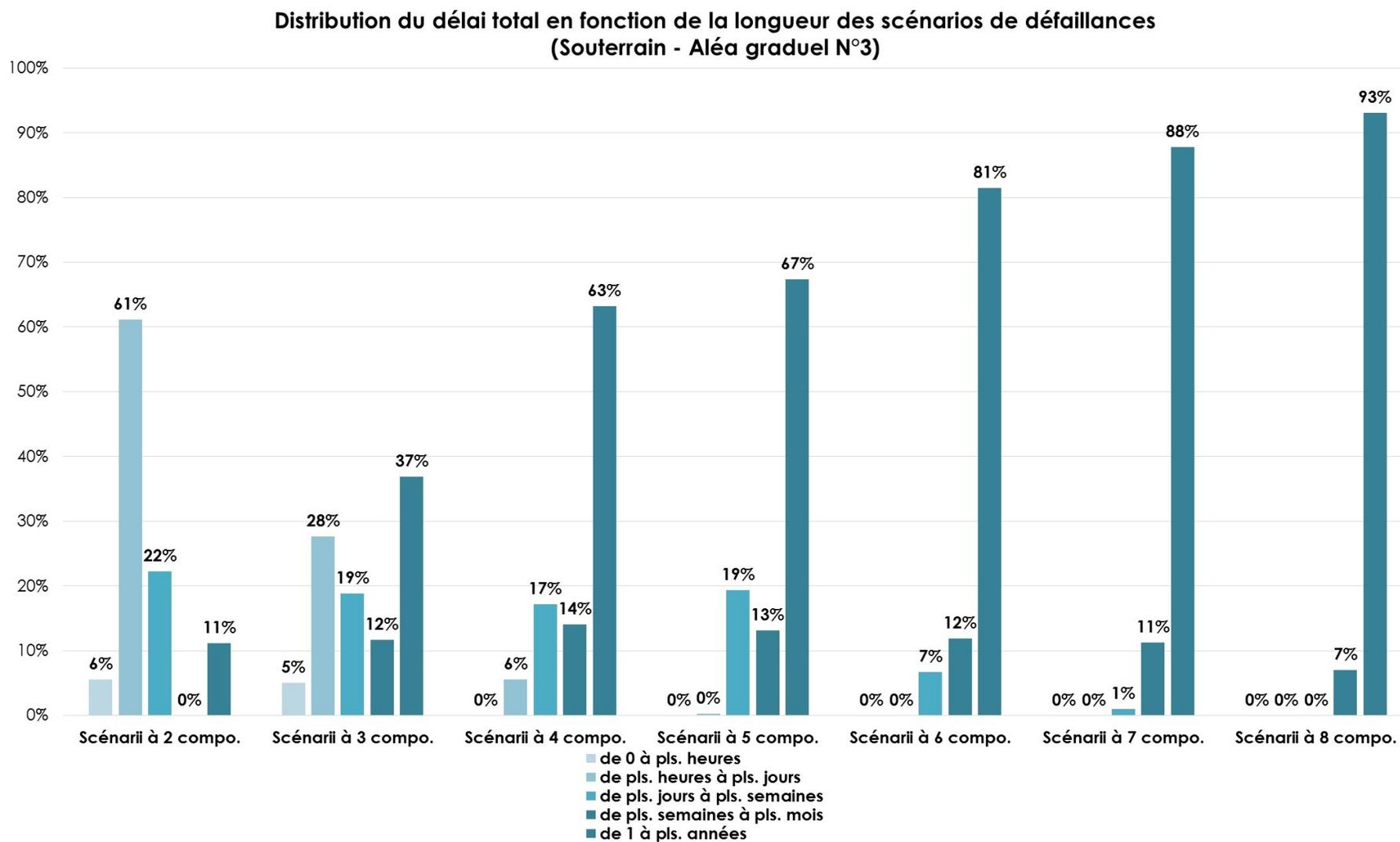


FIGURE D.9 – Histogramme présentant la distribution du **délai total** relatif à un scénario graduel d'**aléa rapide** (N°3) en fonction de la **longueur** des scénarios de défaillances pour la configuration d'implantation en **souterrain**



Annexe E

Modèle quantitatif basé sur les réseaux bayésiens pour caractériser les modes dégradés d'exploitation d'un système de transport guidé touché par une inondation

Le [chapitre 6](#) propose un modèle quantitatif permettant de lier l'intensité de l'aléa inondation, la probabilité de défaillance matérielle des composants du système et les conséquences fonctionnelles sur l'exploitation. Ce modèle est basé sur les **réseaux bayésiens** et propose ainsi des **niveaux de dégradation de l'exploitation** du système de transport guidé sous forme de **réduction de vitesse de circulation** des trains.

Cette annexe présente plusieurs tests du réseau bayésien construit pour un système implanté en **aérien**, un système implanté en **surface** et un système implanté en **souterrain**. Ces tests sont réalisés avec une utilisation du réseau bayésien pour du **diagnostic** c'est-à-dire en fixant les probabilités des effets pour en déterminer celles des causes. Autrement dit, il s'agit de **fixer les probabilités de dégradation du service fourni** par l'intermédiaire des différentes vitesses d'exploitation possibles du système **pour en déduire les probabilités conditionnelles de défaillances des composants**.

Dans le sens du **diagnostic**, le modèle quantitatif est ainsi testé pour les **trois configurations d'implantation** avec les **trois distributions de probabilité des vitesses d'exploitation** suivantes :

- une distribution de probabilité centrée sur une valeur **élevée** de vitesse d'exploitation à savoir la vitesse d'exploitation **nominale** ;
- une distribution de probabilité centrée sur une valeur **moyenne** de vitesse d'exploitation à savoir la vitesse de **30 km/h** ;
- une distribution de probabilité centrée sur une valeur **faible** de vitesse d'exploitation à savoir l'**interruption** du système.

E.1 Réseau bayésien d'un système de transport guidé aérien

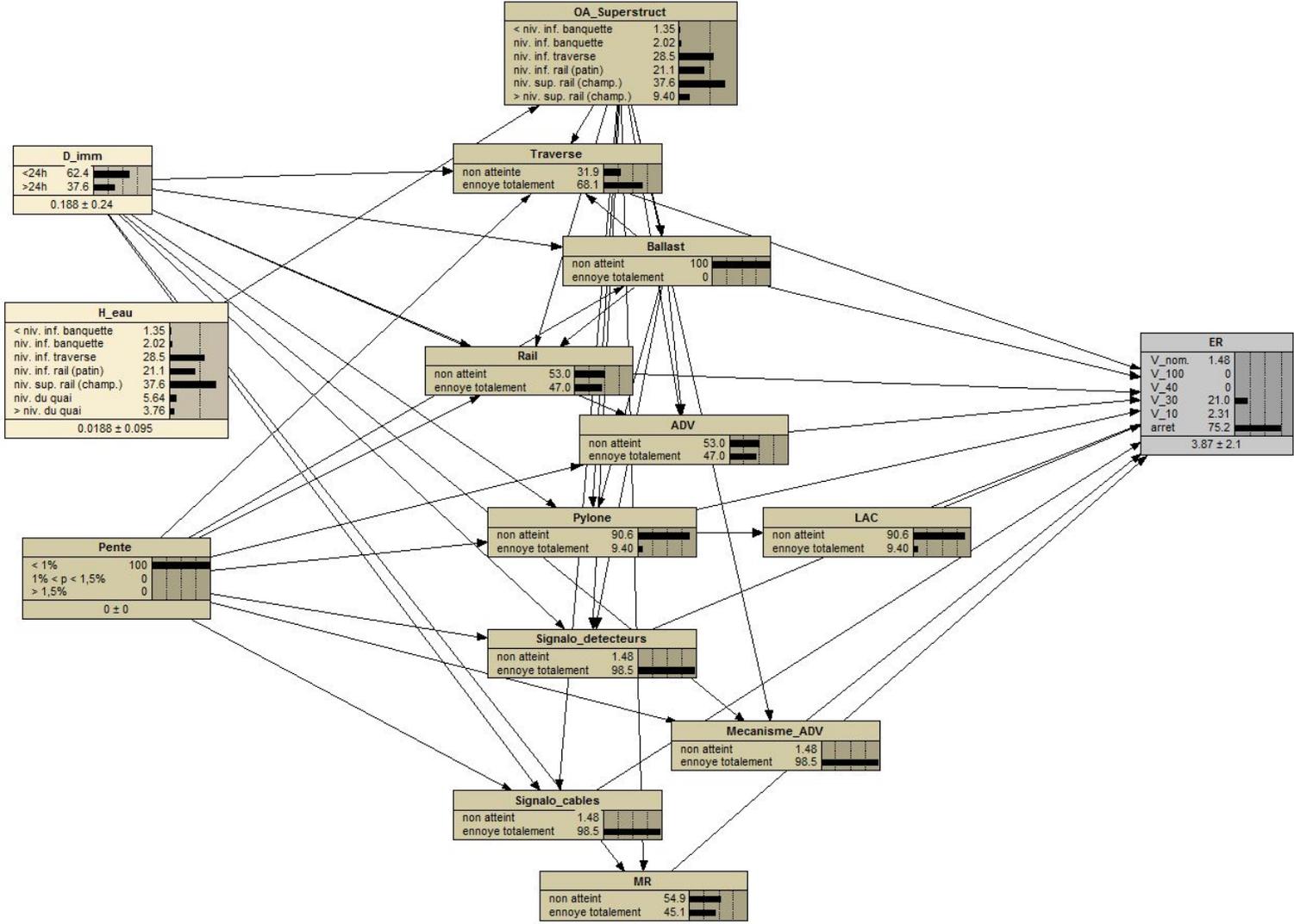


FIGURE E.1 – Résultats obtenus par le modèle quantitatif en utilisation pour du **diagnostic** pour la configuration d’implantation en **aérien** et pour une distribution de probabilité de vitesse d’exploitation centrée sur une **valeur faible**

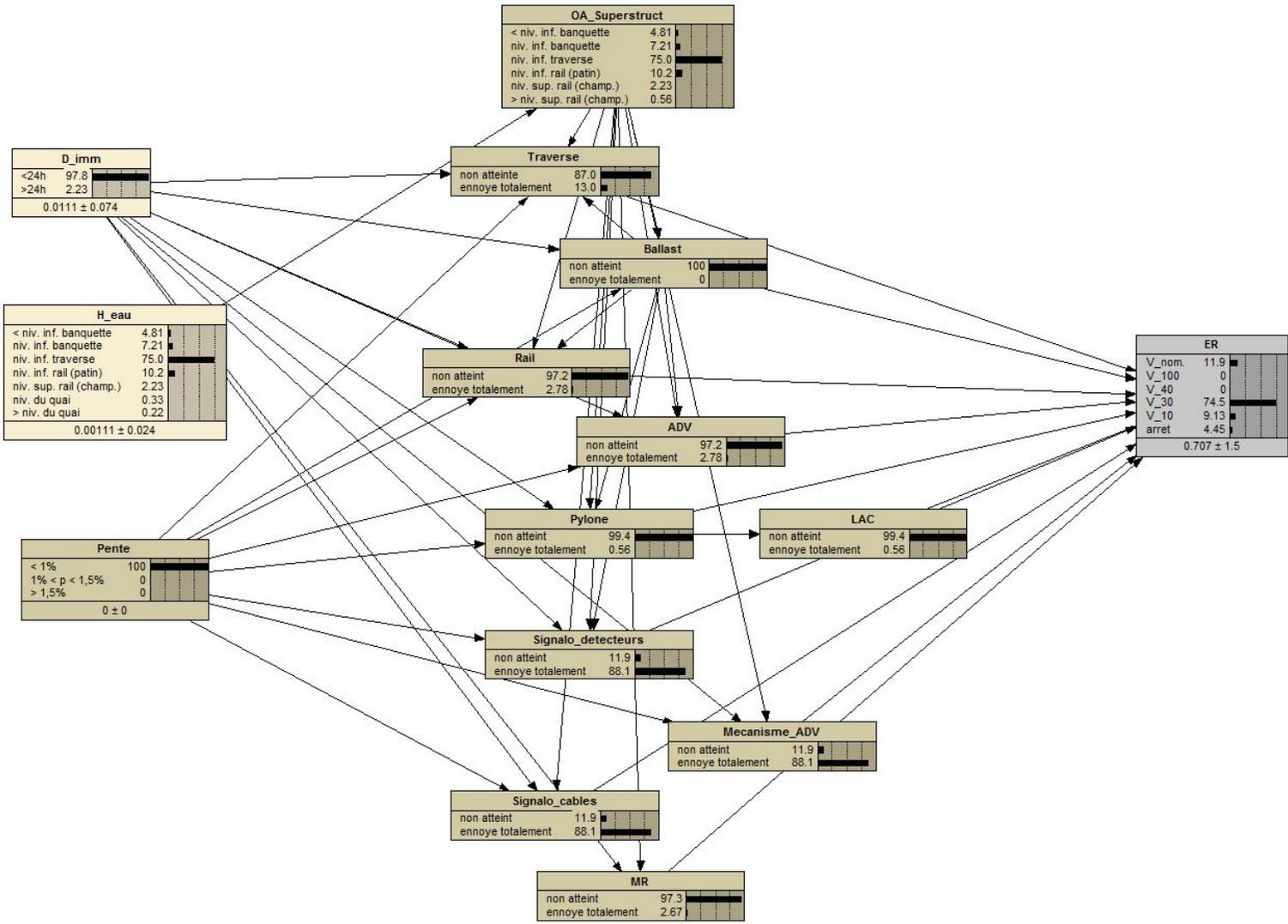


FIGURE E.2 – Résultats obtenus par le modèle quantitatif en utilisation pour du **diagnostic** pour la configuration d’implantation en **aérien** et pour une distribution de probabilité de vitesse d’exploitation centrée sur une **valeur moyenne**

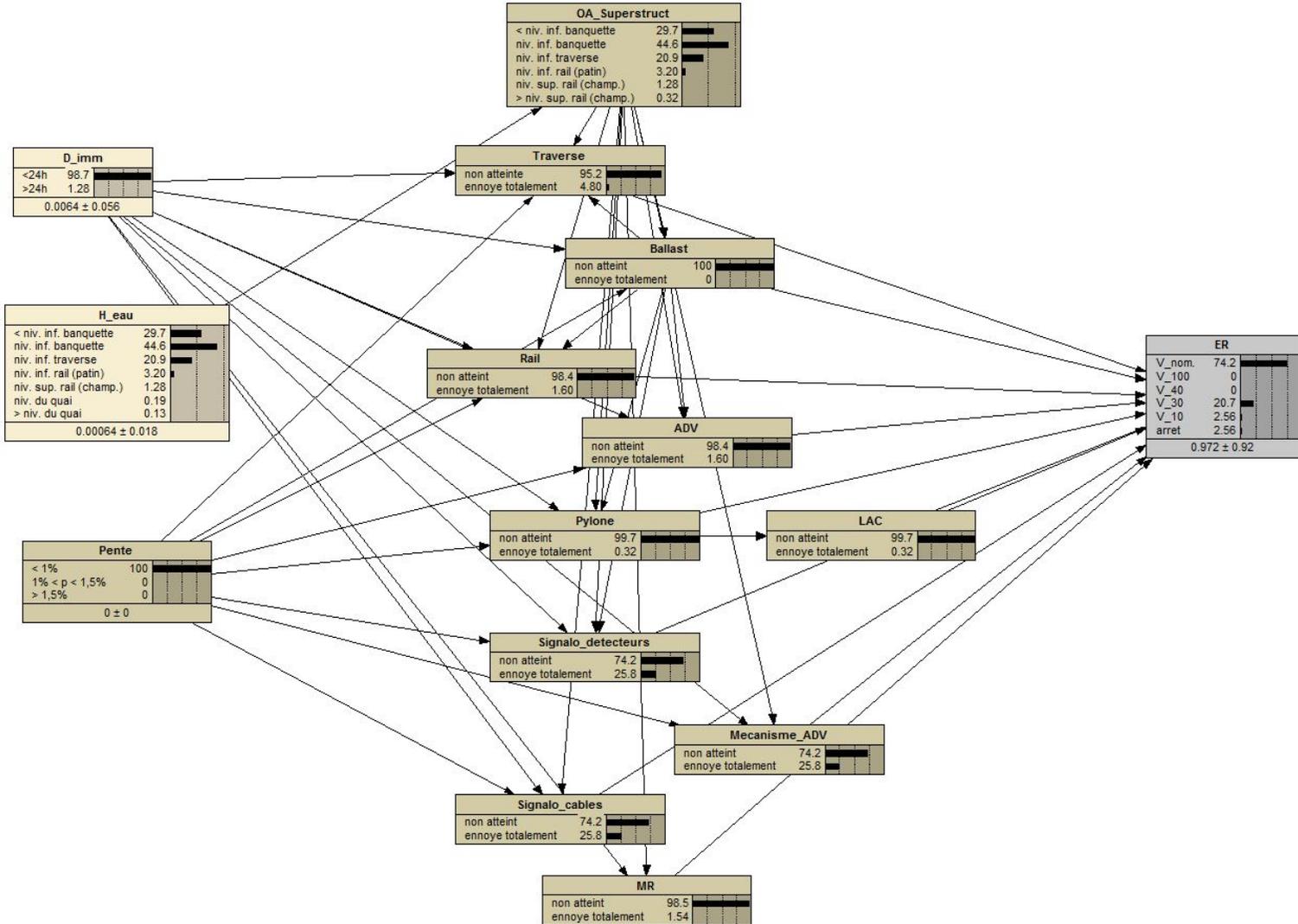


FIGURE E.3 – Résultats obtenus par le modèle quantitatif en utilisation pour du **diagnostic** pour la configuration d’implantation en **aérien** et pour une distribution de probabilité de vitesse d’exploitation centrée sur une **valeur élevée**

E.2 Réseau bayésien d'un système de transport guidé en surface

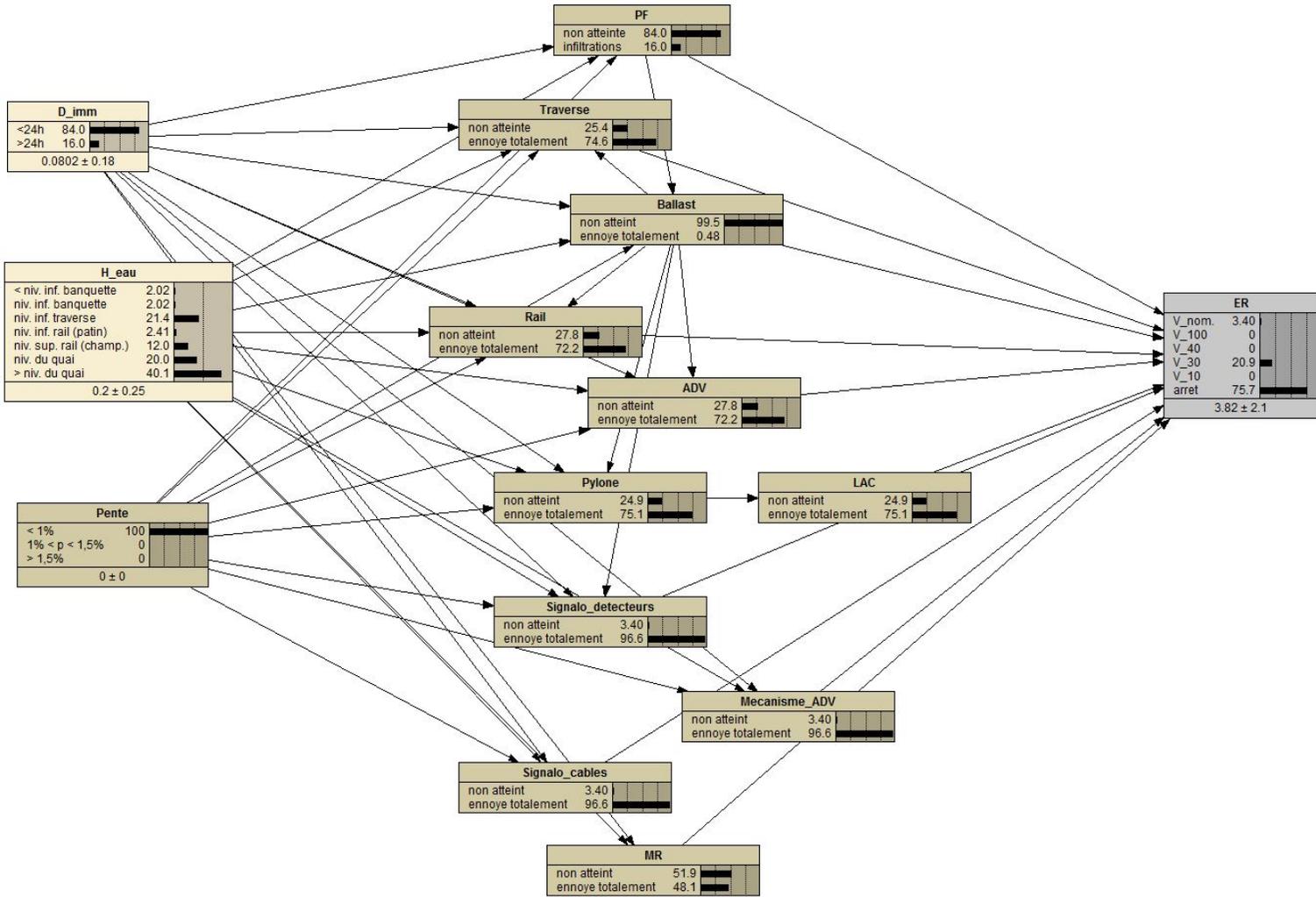


FIGURE E.4 – Résultats obtenus par le modèle quantitatif en utilisation pour du **diagnostic** pour la configuration d’implantation en **surface** et pour une distribution de probabilité de vitesse d’exploitation centrée sur une **valeur faible**

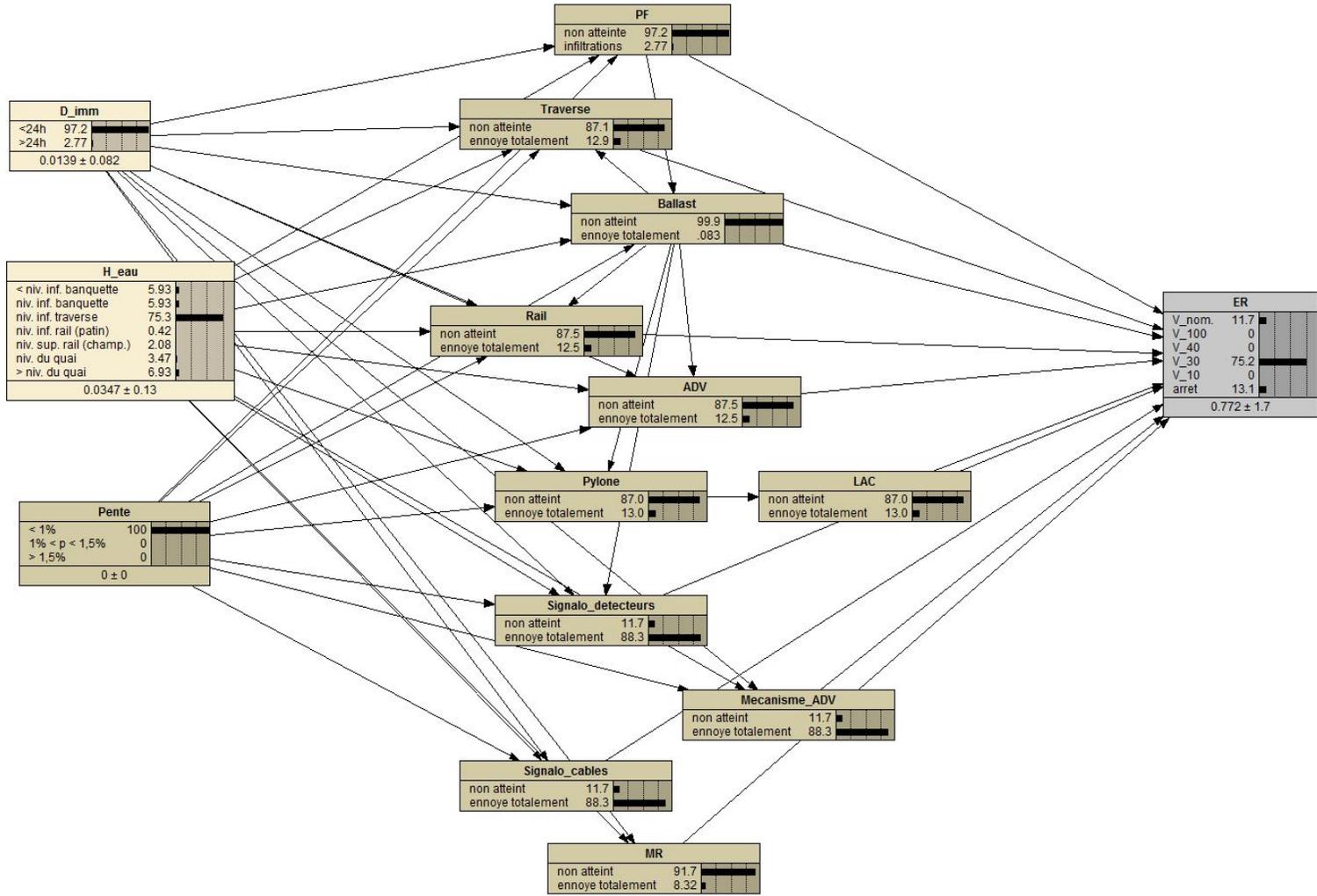


FIGURE E.5 – Résultats obtenus par le modèle quantitatif en utilisation pour du **diagnostic** pour la configuration d’implantation en **surface** et pour une distribution de probabilité de vitesse d’exploitation centrée sur une **valeur moyenne**

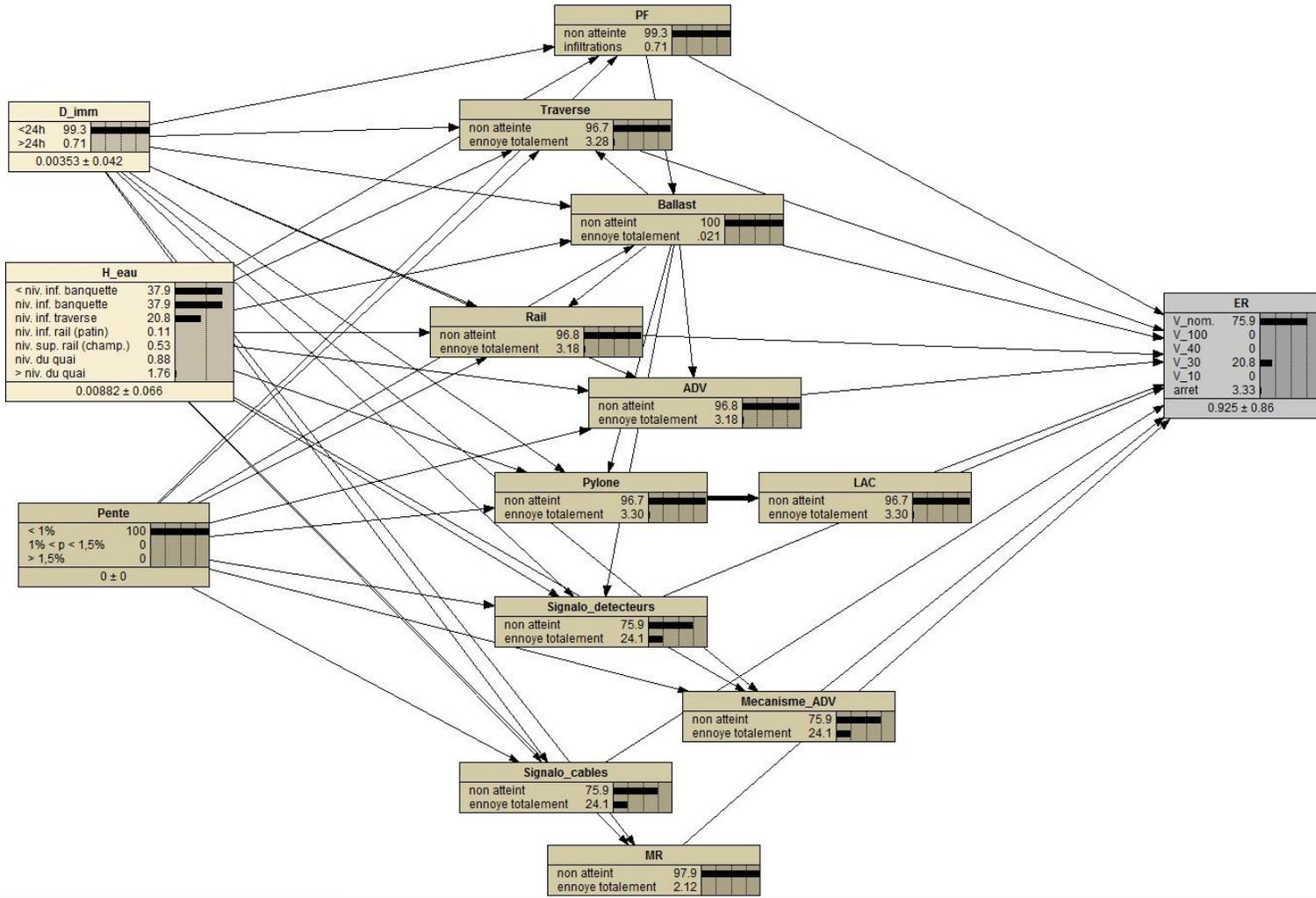


FIGURE E.6 – Résultats obtenus par le modèle quantitatif en utilisation pour du **diagnostic** pour la configuration d’implantation en **surface** et pour une distribution de probabilité de vitesse d’exploitation centrée sur une **valeur élevée**

E.3 Réseau bayésien d'un système de transport guidé souterrain

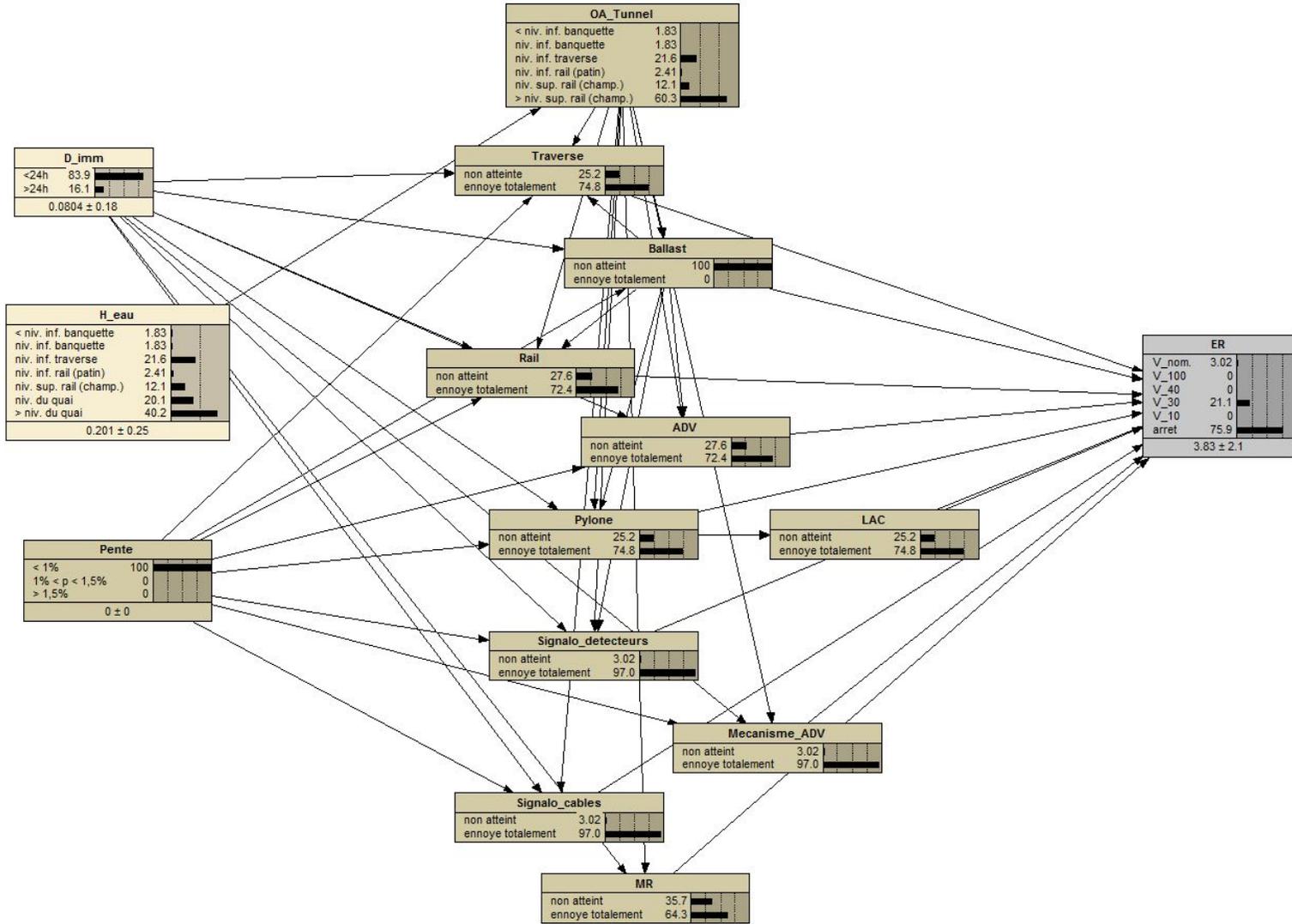


FIGURE E.7 – Résultats obtenus par le modèle quantitatif en utilisation pour du **diagnostic** pour la configuration d'implantation en **souterrain** et pour une distribution de probabilité de vitesse d'exploitation centrée sur une **valeur faible**

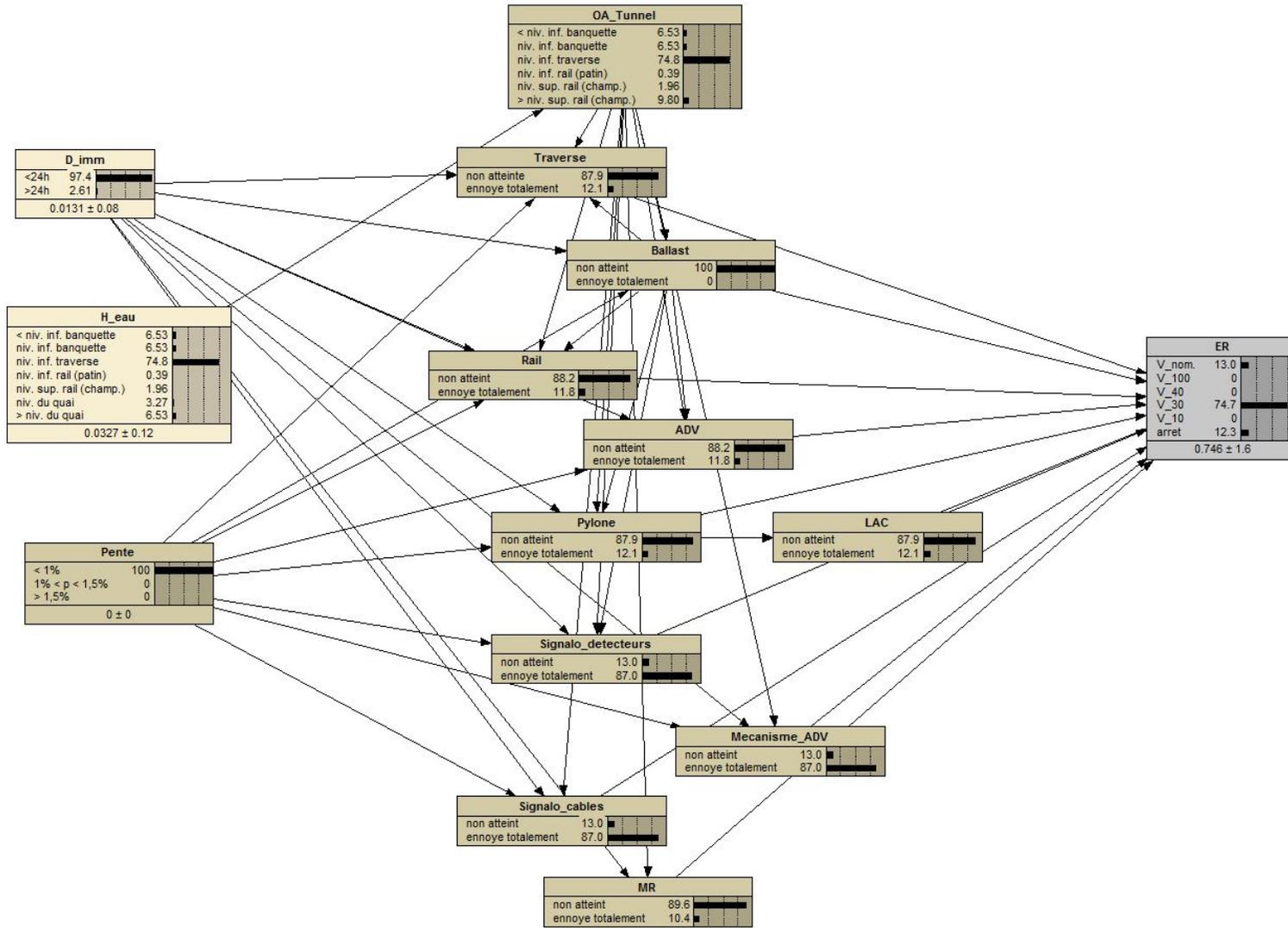


FIGURE E.8 – Résultats obtenus par le modèle quantitatif en utilisation pour du **diagnostic** pour la configuration d’implantation en **souterrain** et pour une distribution de probabilité de vitesse d’exploitation centrée sur une **valeur moyenne**

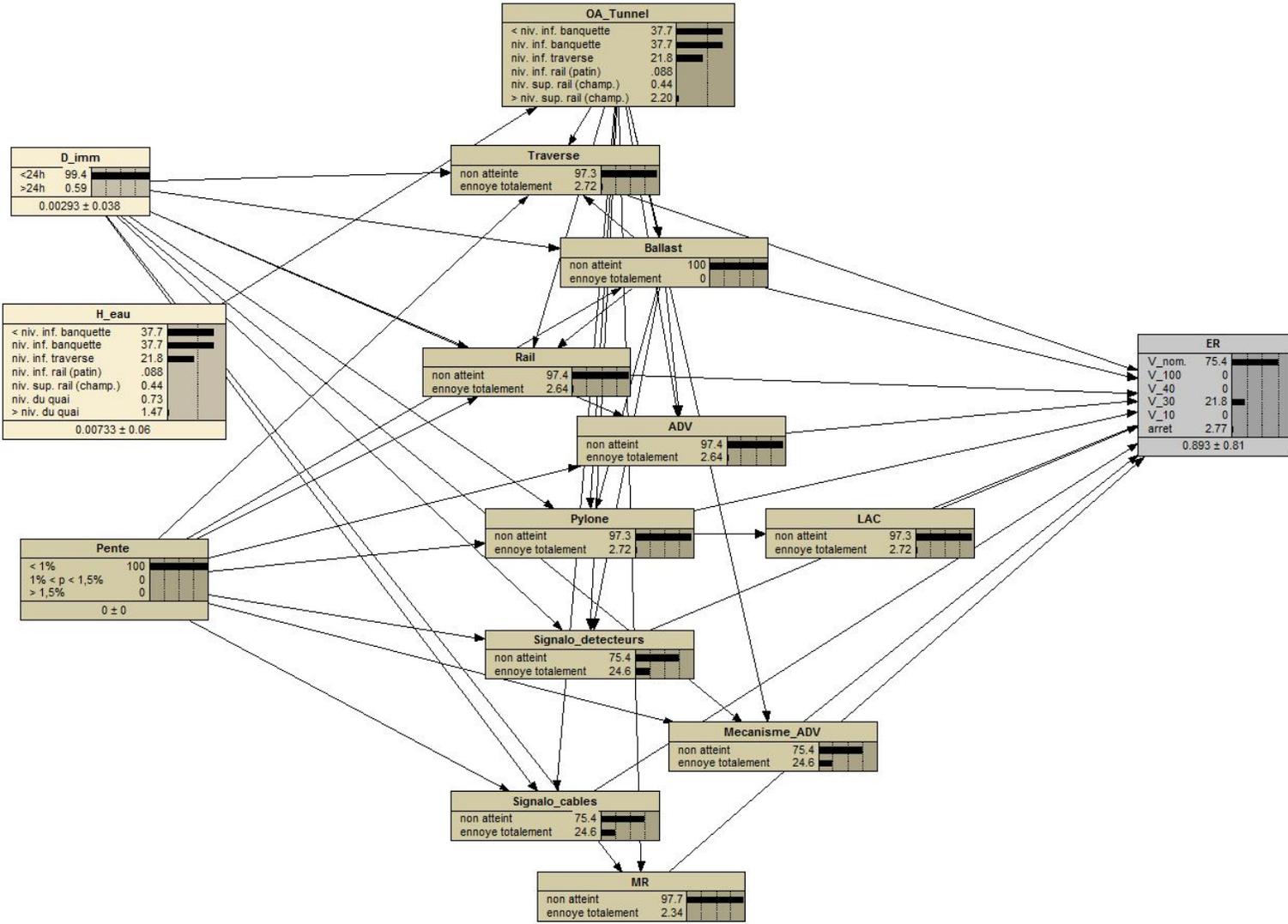


FIGURE E.9 – Résultats obtenus par le modèle quantitatif en utilisation pour du **diagnostic** pour la configuration d’implantation en **souterrain** et pour une distribution de probabilité de vitesse d’exploitation centrée sur une **valeur élevée**