



HAL
open science

Resilience of urban guided transport systems against natural risks

Michaël Gonzva, Pierre-Etienne Gautier, Youssef Diab, Bruno Barroca

► **To cite this version:**

Michaël Gonzva, Pierre-Etienne Gautier, Youssef Diab, Bruno Barroca. Resilience of urban guided transport systems against natural risks. Décider dans un monde incertain : enjeu majeur de la maîtrise des risques, Congrès Lambda Mu 19, Institut pour la Maitrise des Risques, Oct 2014, Dijon, France. hal-01411355

HAL Id: hal-01411355

<https://hal.science/hal-01411355>

Submitted on 7 Dec 2016

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.

RÉSILIENCE DES SYSTÈMES DE TRANSPORT GUIDÉ FACE AUX RISQUES NATURELS

RESILIENCE OF URBAN GUIDED TRANSPORT SYSTEMS AGAINST NATURAL RISKS

Michaël Gonzva,
Université Paris-Est, LEESU équipe Génie Urbain,
SYSTRA,
72, rue Henry Farman, 75015 Paris
mgonzva@systra.com

Pierre-Étienne Gautier,
SYSTRA,
72, rue Henry Farman, 75015 Paris
pegautier@systra.com

Youssef Diab,
Université Paris-Est, École des Ingénieurs de la Ville
de Paris,
Université Paris-Est, LEESU équipe Génie Urbain,
5, Bd Descartes, Bâtiment Lavoisier
Champs sur Marne, 77454 Marne la Vallée Cedex 2
youssef.diab@univ-mlv.fr

Bruno Barroca,
Université Paris-Est, LEESU équipe Génie
Urbain,
5, Bd Descartes, Bâtiment Lavoisier
Champs sur Marne, 77454 Marne la Vallée
Cedex 2
bruno.barroca@univ-mlv.fr

Résumé

Chaque année, les catastrophes naturelles faisant l'actualité provoquent des dommages économiques toujours plus importants auxquels s'ajoutent des impacts sociaux et environnementaux conséquents. Pour exemple, la vulnérabilité des systèmes de transport guidé face à ces catastrophes naturelles est démontrée, notamment au travers de la part d'incidents imputables à des conditions climatiques intenses renforcées par les incertitudes dues au changement climatique. Or, du côté de la recherche scientifique, le concept de résilience véhicule une nouvelle manière d'analyser le risque selon une approche systémique. La résilience est ainsi vue comme la capacité d'un système à absorber le changement et à persister au-delà d'une perturbation. Nos recherches se situent à la croisée de ces domaines en étudiant la résilience des systèmes de transport guidé face aux risques naturels. Dans cette communication sont présentés les premiers résultats de cette étude. A partir de méthodes issues de la Sûreté de Fonctionnement traditionnellement utilisées dans les études de risques, nous déterminons la vulnérabilité des composants d'un système de transport guidé face au risque d'inondation. Cette démarche, innovante dans l'utilisation de la Sûreté de Fonctionnement à des perturbations extérieures au système, permet de mettre en évidence les scénarios de défaillances du système à partir des réponses intermédiaires des composants suite à une perturbation. En se munissant de cadres conceptuels adaptés, cette publication montre qu'il est possible de faire de cette étude de vulnérabilité un tremplin vers l'élaboration de stratégies visant à rendre opérationnel le concept de résilience.

Summary

Every year, natural disasters cause economic damages including also social and environmental impacts, which are more and more critical. For example, the vulnerability of guided transport systems exposed to natural disasters is demonstrated, in particular through the part of incidents due to intense weather conditions strengthened by climate change uncertainties. Besides, resilience concept brings a new way of analyzing the risk according to a systematic approach. Resilience can be defined as the capacity, for a system, to absorb changes and to persist beyond a disturbance. Our researches are situated between these domains by studying resilience of guided transport systems exposed to natural risks. In this paper are presented the first results of this study. Thanks to dependability and safety methods traditionally used in risks studies, we determine the vulnerability of guided transport system components exposed to flood risk. This approach is innovative because we apply dependability and safety methods with external disturbances. Besides, this approach highlights failures sequences of the global system from the intermediate failures of particular components. Thanks to conceptual frameworks adapted to technical systems, this paper demonstrates that this vulnerability study is a preliminary of designing strategies to operationalize the concept of resilience.

Introduction

1. Contexte

Chaque année, les catastrophes naturelles faisant l'actualité provoquent des dommages économiques toujours plus importants auxquels s'ajoutent des impacts sociaux et environnementaux conséquents. Pour illustration, en France, un habitant sur quatre et un emploi sur trois sont potentiellement exposés au risque d'inondation (MEDDE, 2012).

Du côté de la recherche scientifique se développe de plus en plus le concept de résilience. Ce concept change la manière d'appréhender et d'analyser le risque en y associant notamment une approche systémique. Dans cette approche, la résilience est vue comme la capacité d'un système à absorber le changement et à persister au-delà d'une perturbation (Barroca *et al.*, 2013a).

Nos travaux de recherche s'inscrivent dans ce contexte d'avancées scientifiques en s'appliquant aux systèmes de transport guidé de personnes face aux risques naturels. Ces systèmes sont 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). Dans le cas des systèmes de transport, des études ont démontré les impacts négatifs de conditions météorologiques intenses sur ces infrastructures. Le taux d'incidents des infrastructures ferroviaires aux Pays-Bas, en 2003, attribués à des conditions météorologiques défavorables a été évalué entre 5 et 10 %, valeur loin d'être négligeable (Duinmeijer & Bouwknecht, 2004). Chaque évènement révèle donc les preuves incontestables de leur vulnérabilité. Par exemple, les fortes inondations

dans le bassin de la Somme en 2001 ont représenté 2,3 millions d'euros de dommages et pertes opérationnelles pour les infrastructures ferroviaires (Cochran, 2009).

Par ailleurs, les effets du changement climatique amplifient les incertitudes déjà importantes au sein de l'évaluation des aléas et des processus de décision pour la maîtrise des risques dans le domaine des transports. En effet, l'incertitude relative au renforcement attendu des phénomènes naturels rend très complexe 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) qui sont indispensables au vu de la vulnérabilité des systèmes de transport aux conditions climatiques.

2. Objectifs

Les objectifs de cette communication sont de présenter les premiers résultats de nos travaux de recherche sur la résilience des systèmes de transport guidé soumis à des aléas naturels d'intensité variable. L'aspect innovant de ces travaux repose sur l'application de méthodes issues de la Sûreté de Fonctionnement à des perturbations externes au système de transport – les aléas naturels – et qui génèrent des défaillances sur des parties du système et non pas seulement quelques composants. Traditionnellement, ces méthodes sont appliquées sur des perturbations internes aux systèmes et qui affectent un ou deux composants.

Nos travaux ont pour but :

- d'analyser la vulnérabilité des systèmes dans des contextes multi-risques, c'est-à-dire dans le cas de systèmes soumis, tout au long de leur durée de vie, à différents types d'aléas d'intensité variable afin de pouvoir améliorer leur résilience non pas face à un seul risque mais à plusieurs ;
- d'élaborer des stratégies de résilience de ces systèmes, à la fois sur le plan physique (protections) et organisationnel (modes dégradés), pour les fiabiliser.

Matrice de vulnérabilité multi-systèmes et multi-aléas : premier état de l'art de la vulnérabilité

1. Contenu et objectifs de la matrice

La vulnérabilité des systèmes de transport guidé à différents aléas naturels est avérée et clairement démontrée dans la part d'incidents imputables à des conditions climatiques intenses. Dans la plupart des pays européens, ces aléas naturels concernent souvent la neige, les variations de températures (très basses et très hautes) et les phénomènes liés aux aléas hydrologiques (pluies intenses, inondations). C'est la raison pour laquelle il nous a semblé pertinent, en toute première approche, d'établir un premier état de l'art 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 : (i) fournir une évaluation initiale de la vulnérabilité d'un panel de systèmes de transport guidé face à un panel d'aléas naturels et (ii) 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 : transports urbains (tramways, métros), transports régionaux (lignes express), transports nationaux classiques (lignes classiques) et transports nationaux rapides (lignes à grande vitesse). Or, pour préciser cette première approche, il apparaît intéressant d'intégrer le type d'implantation du système de transport : en 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 l'aléa de vents forts ou l'aléa de basses températures. En termes d'aléas, onze sont identifiés suite à une revue de la littérature assez diverse (documentations techniques, retours d'expériences, articles de presse...) mentionnant des 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 (roches, arbres...), sable et poussières, feux environnants et variations d'humidité.

Finalement, la matrice croise les deux panels établis afin de caractériser l'impact des aléas et donc la vulnérabilité des systèmes de transport.

2. Présentation de la matrice

La matrice obtenue par ce premier travail de caractérisation qualitative de la vulnérabilité de systèmes de transport guidé face à plusieurs aléas est présentée en Tab.1.

Cette caractérisation de la vulnérabilité, pour ce premier état de l'art, est qualitative et se décline en quatre niveaux selon l'impact sur l'exploitation du système de transport : non significatif (pas ou peu d'atteintes), faible (atteintes de composants impliquant des temps de retards de l'ordre de quelques minutes), moyen (atteintes de composants impliquant des temps d'arrêt d'au moins plusieurs jours). Certains couples (système de transport guidé, aléa) sont qualifiés avec deux niveaux (case bicolore) indiquant des tendances sur l'impact lié à l'exploitation qui vont en s'accroissant. Ces niveaux ont été déterminés à partir de la revue de la 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. Une estimation sommaire issue de ces données a alors été faite pour caractériser la vulnérabilité.

SYSTEMES DE TRANSPORT GUIDE								
Urbains					Régionaux		Nationaux classiques	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
	Inondations	Orange	Rouge	Orange	Rouge	Rouge	Rouge	Rouge
	Neige	Orange	Jaune	Orange	Jaune	Orange	Orange	Orange
	Basses températures / Gel	Orange	Jaune	Orange	Jaune	Orange	Orange	Orange
	Chutes d'éléments	Orange	Blanc	Orange	Blanc	Orange	Orange	Orange
	Sable et poussière	Jaune	Jaune	Jaune	Blanc	Orange	Orange	Orange
	Feux environnants	Blanc	Blanc	Blanc	Blanc	Orange	Orange	Orange
	Vents forts	Blanc	Blanc	Blanc	Blanc	Orange	Orange	Orange
	Hautes températures	Jaune	Blanc	Jaune	Blanc	Orange	Orange	Orange
	Feuilles mortes	Jaune	Blanc	Jaune	Blanc	Orange	Orange	Orange
	Variations d'humidité	Blanc	Blanc	Blanc	Blanc	Orange	Orange	Orange
	Degré de vulnérabilité global du système	Jaune	Jaune	Jaune	Jaune	Orange	Orange	Orange

Table 1. Matrice de vulnérabilité multi-systèmes & multi-aléas
Impacts sur l'exploitation des aléas naturels : *non significatif* (blanc), *faible* (jaune), *moyen* (orange) et *fort* (rouge)

3. Conclusions préliminaires de la vulnérabilité des systèmes de transport guidé

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

Premièrement, on constate que la vulnérabilité croît avec la vitesse d'exploitation du système. En effet, des tramways (première colonne du Tab.1) aux systèmes à grande vitesse (dernière colonne du Tab.1), il apparaît que pour un aléa donné, l'impact de celui-ci sur l'exploitation du système de transport est d'autant plus fort que la vitesse d'exploitation est grande. Cette tendance ressort bien en observant le gradient de couleurs passant du blanc vers le rouge à mesure que l'on lit le tableau de gauche à droite.

Deuxièmement, le « degré de sensibilité globale du système » est un item synthétisant la tendance générale, au vu de l'impact par aléa, de vulnérabilité du système de transport globalement pour tous les aléas. Ce qui en ressort est que se dessine deux groupes : les transports « intraurbains » (tramways, métros) et « interurbains » (lignes express régionales, lignes nationales classiques et à grande vitesse). Ainsi, le premier groupe semble moins vulnérable que le second groupe.

Troisièmement, une dernière tendance peut être mentionnée à partir de cette matrice : pour un aléa donné, le positionnement en souterrain ou à la surface de certains systèmes de transport influence leur vulnérabilité. En effet, typiquement, lorsqu'ils se réalisent, les aléas de chutes d'éléments (arbres, rochers...) ou de feuilles mortes ont des conséquences bien plus importantes sur l'exploitation de systèmes en surface que de systèmes en souterrain. Ainsi, pour un aléa donné, le souterrain a, dans cette première analyse, une influence sur le degré d'impact sur l'exploitation du système.

Pour aller plus loin dans cette analyse préliminaire qualitative, il est intéressant d'identifier quel(s) élément(s) du système de transport, lorsqu'il(s) est(sont) touché(s) par l'aléa naturel, provoque(nt) le niveau observé dans la matrice. Autrement dit, le niveau de vulnérabilité constaté dépend souvent du dysfonctionnement d'une partie du système de transport et non pas de l'ensemble du système ; pour illustration, le niveau de vulnérabilité de l'aléa de vents forts est dû au risque lié au matériel roulant. Ainsi, les aléas semblent affecter préférentiellement un ou plusieurs sous-systèmes ou composants sur le plan matériel dont les conséquences s'observent sur le plan fonctionnel. C'est la raison pour laquelle il apparaît indispensable de décomposer en éléments plus fins un système de transport guidé pour appréhender plus clairement sa résilience face aux risques naturels. L'utilisation de méthodes issues de la Sécurité de Fonctionnement permet d'arriver à cette fin en apportant des outils de maîtrise des risques dans un contexte d'incertitude face à nos modèles.

Mobilisation des méthodes issues de la Sécurité de Fonctionnement

1. Présentation et objectifs

La notion de système complexe s'applique bien à un système de transport guidé dans la mesure où un système complexe est composé d'un grand nombre d'éléments qui interagissent entre eux de façon non linéaire (Simon, 1991). Or, la complexité inhérente de ce système (grand nombre de sous-systèmes interagissant ensemble, multiples défaillances simultanées, etc.) rend les approches physiques classiques peu voire non efficaces pour produire un modèle de fonctionnement (Villemeur, 1998 ; Zwingelstein, 1996).

Dans ce contexte, le choix de mettre en œuvre des méthodes issues de la Sûreté de Fonctionnement est motivé par plusieurs raisons. Tout s'abord, 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 & Peres, 2007). Pour y parvenir, la modélisation par la Sûreté de Fonctionnement repose sur le principe de la modélisation fonctionnelle (Serre, 2005) qui consiste à déterminer les interactions entre les composants d'un système et son environnement de façon à établir de manière formelle les liens entre les défaillances des fonctions, leurs causes et leurs effets (Serre *et al.*, 2007). Dans la plupart des études mobilisant la Sûreté de Fonctionnement, cette modélisation fonctionnelle est une analyse préalable à l'application d'autres méthodes, qualitatives ou quantitatives (Lhomme, 2012). Ainsi, la seconde raison provient du fait que la Sûreté de Fonctionnement peut être considérée comme une riche palette de méthodes au service de la maîtrise des risques (Lhomme, 2012), principalement dans le cas où ces risques affectent des systèmes complexes urbains. Enfin, ces méthodes ont été développées à l'origine pour étudier des systèmes industriels au fonctionnement complexe (Villemeur, 1998). Or, et c'est la troisième raison qui motive le choix de la Sûreté de Fonctionnement, des travaux récents de recherche appliquée mobilisent ces méthodes pour la modélisation du fonctionnement de systèmes complexes urbains (Serre, 2005; Vuillet, 2012 ; Lhomme, 2012).

Parmi ces méthodes existe l'Analyse Fonctionnelle (AF), une des plus utilisées en Sûreté de Fonctionnement. Elle permet de modéliser le fonctionnement de systèmes à partir de deux analyses dépendantes l'une de l'autre : une analyse structurelle et une analyse fonctionnelle. L'analyse structurelle permet de définir les positions et les relations des différents composants du système pour formuler, dans l'analyse fonctionnelle, les fonctions de chaque composant. Deux outils faisant référence à la méthode APTÉ sont alors mis en œuvre pour représenter le système : le Bloc-diagramme Fonctionnel (BdF) et le Tableau d'Analyse Fonctionnelle (TAF) (Zwingelstein, 1996). 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 ainsi que les circulations des flux extérieurs *via* des composants du système. Le TAF découle de l'analyse du BdF en rassemblant les fonctions identifiées du système. De plus, une autre méthode, très souvent appliquée consécutivement à l'AF, est l'Analyse des Modes de Défaillances et de leurs Effets (AMDE). En effet, l'AMDE est une méthode particulièrement efficace pour l'analyse des modes de défaillance et permet de structurer, sous forme de tableaux, les informations sur les dégradations : les pertes de performance, leurs causes, leurs effets (Talon *et al.*, 2009). Cette méthode, en considérant chacun des composants du système et en analysant leurs modes de défaillance, permet de mieux comprendre comment le système fonctionne avant, pendant et après l'inondation par exemple (Lhomme, 2012).

Ainsi, l'utilisation de l'AF suivie de l'AMDE apparaît pertinente dans notre approche qui consiste à décomposer structurellement et fonctionnellement à partir de sous-éléments un système de transport guidé afin de mieux comprendre ses modes de défaillance, et ainsi sa vulnérabilité aux aléas naturels.

2. Analyse Fonctionnelle (AF) d'un système de transport guidé

Tout d'abord, l'analyse structurelle permet de déterminer 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 relatives à l'interopérabilité du système ferroviaire européen. 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 se divise ainsi en huit composants :

- 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.

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

- 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, l'analyse fonctionnelle à proprement parler permet de déterminer les types de relations et interactions qu'entretiennent les composants du système, en situation normale.

En premier lieu, nous étudions les relations de contacts qui existent entre les composants du système eux-mêmes et entre les composants du système et les éléments de l'environnement. En effet, ces relations traduisent l'existence d'au moins une connexion physique, matériel entre les deux éléments (matériel roulant alimenté par l'énergie, circulant sur l'infrastructure, etc.). Un second temps d'analyse fait apparaître les flux de dépendances entre tous ces éléments. En effet, l'existence d'un flux d'un premier composant vers un second composant traduit une relation induite de vulnérabilité dans la mesure où la réalisation de ce flux est conditionnée par le bon fonctionnement du premier composant.

Le BdF de ces deux types de relations, contact et dépendance, en situation normale est présenté ci-dessous (Fig.1).

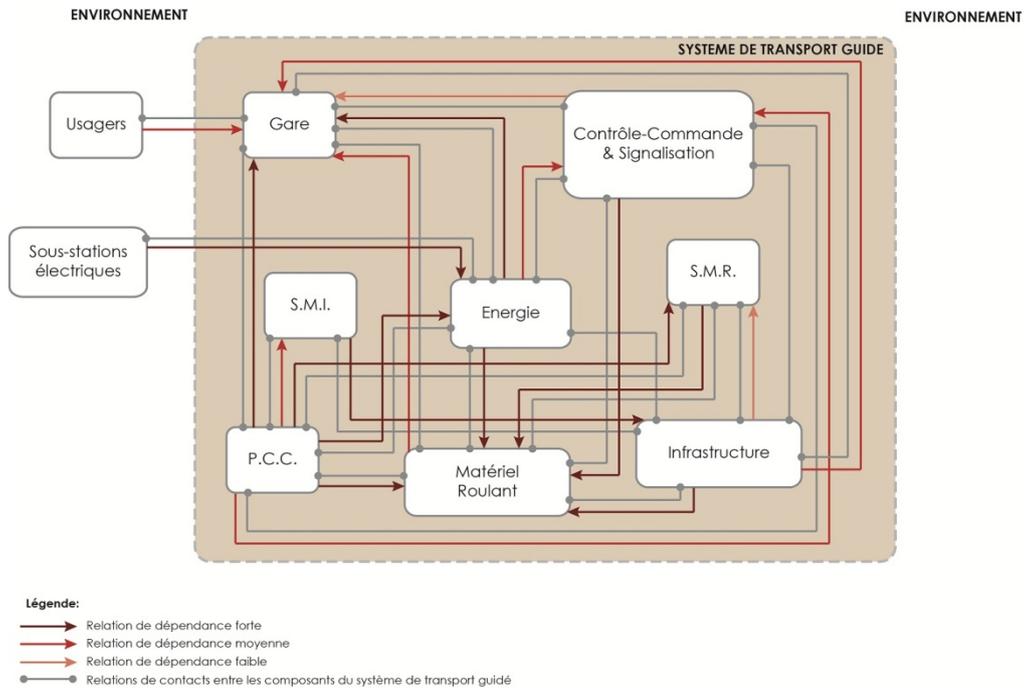


Figure 1. Bloc-diagramme Fonctionnel (BdF) d'un système de transport guidé en surface en situation normale

Ce BdF permet de mettre en évidence un certain nombre de relations de dépendance ou d'interdépendance. Pour illustration, en termes de relation avec le milieu extérieur, on constate que le système est fortement dépendant et à plusieurs niveaux successifs du composant extérieur « sous-stations électriques ». En effet, 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. Cette chaîne de dépendances fait donc déjà apparaître une vulnérabilité du système aux « sous-stations électriques ».

Ce premier travail d'analyse fonctionnelle est réalisé en situation normale, par opposition à une situation où survient un aléa naturel. Pour appréhender le fonctionnement et dysfonctionnements d'un système de transport guidé lorsqu'il fait face à un aléa naturel, nous avons appliqué l'analyse fonctionnelle lorsque survient une inondation. En effet, dans le Tab.1, les systèmes de transport guidé apparaissent très vulnérables face au risque inondation, qu'ils soient en souterrain ou en surface. C'est la raison pour laquelle nous appliquons l'AF au système de transport en présence d'un risque d'inondation en distinguant les cas selon que le système est implanté en souterrain ou en surface. Le BdF des relations de vulnérabilité pour un système en surface est présenté ci-dessous pour illustrer la démarche (Fig.2). La construction des niveaux de vulnérabilité présentés est issue de retours d'expériences sur les impacts de crue sur ces deux types de systèmes, permettant d'évaluer qualitativement un degré empirique de vulnérabilité. La limite à ce type de diagramme préliminaire réside justement dans l'aspect qualitatif (tant sur les impacts eux-mêmes que sur la probabilité qu'ils surviennent). Néanmoins, ce diagramme met en exergue les relations entre composants, comme souhaité.

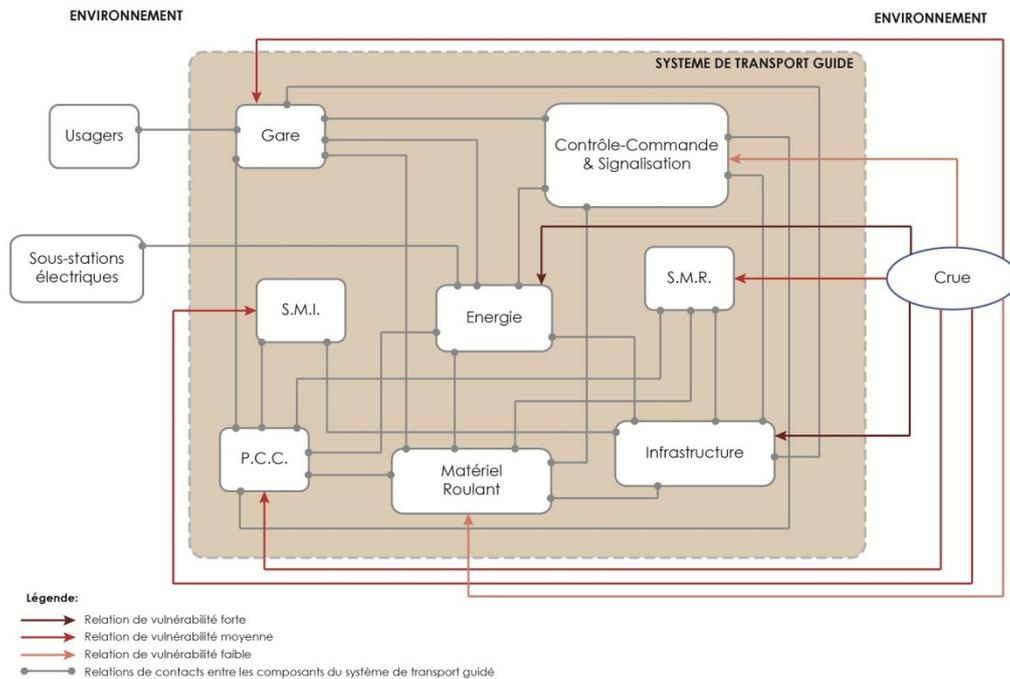


Figure 2. Bloc-diagramme Fonctionnel (BdF) d'un système de transport guidé en surface face au risque d'inondation

Ainsi, à ce stade, l'AF est terminée. Pour résumer, notre travail a permis de construire trois BdF dont un en situation normale (BdF des relations de contact et dépendance) et deux en situation d'aléa inondation (BdF de vulnérabilité de système souterrain et BdF de vulnérabilité de système de surface), puis les trois TAF associés. Au travers de l'analyse fonctionnelle, étudier la vulnérabilité d'un système de transport soumis au risque d'inondation a permis de mettre en évidence les composants 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 composant lors d'une inondation, l'AF ne suffit pas à elle seule. C'est la raison pour laquelle nous mobilisons une autre méthode de la Sûreté de Fonctionnement : l'AMDE.

3. Analyse des Modes de Défaillance et de leurs Effets (AMDE) d'un système de transport guidé

L'AMDE débute dès la fin de l'AF. En particulier, elle prend pour données de départ le TAF en cherchant à déterminer les modes de défaillance des fonctions 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.

Pour illustrer ce travail, le Tab.2 ci-dessous présente un extrait de l'AMDE pour le composant « ballast » du sous-système « Infrastructure » qui correspond finalement au TAF de ce composant (colonnes « Compo. », « N° Fonct. » et « Fonctions ») complété avec ses modes de défaillances (colonnes « Défaillance », « Causes de la défaillance de la fonction » et « Effets de la défaillance de la fonction »).

Compo.	N° Fonct.	Fonction	Défaillance	Causes de la défaillance de la fonction	Effets de la défaillance de la fonction
Ballast	47	<ul style="list-style-type: none"> Permettre la stabilité de circulation du matériel roulant 	<ul style="list-style-type: none"> Ne permet pas la stabilité de circulation du matériel roulant 	<ul style="list-style-type: none"> Dislocation de la voie ferrée 	<ul style="list-style-type: none"> Interruption de la circulation ferroviaire
	48	<ul style="list-style-type: none"> Répartir les charges sur la plate-forme Immobiliser les traverses dans leur position Assurer le drainage des eaux zénithales 	<ul style="list-style-type: none"> Ne répartit les charges sur la plate-forme N'immobilise pas les traverses dans leur position N'assure pas le drainage des eaux zénithales 	<ul style="list-style-type: none"> Emportement du ballast Submersion du ballast 	<ul style="list-style-type: none"> Dislocation de la voie ferrée
	49	<ul style="list-style-type: none"> Résister aux pressions hydromécaniques exercées par la crue Éviter la submersion Éviter l'emportement 	<ul style="list-style-type: none"> Ne résiste pas aux pressions hydromécaniques exercées par la crue N'évite pas la submersion N'évite pas l'emportement 	<ul style="list-style-type: none"> Débit trop grand Hauteur d'eau trop grande Durée d'immersion trop grande Charriage d'éléments massifs par la crue 	<ul style="list-style-type: none"> Emportement du ballast Submersion du ballast
	50	<ul style="list-style-type: none"> Assurer le maintien physique de la plate-forme voie durant la crue 	<ul style="list-style-type: none"> N'assure pas le maintien physique de la plate-forme voie durant la crue 	<ul style="list-style-type: none"> Hauteur d'eau trop grande Charriage d'éléments massifs par la crue 	<ul style="list-style-type: none"> Emportement du ballast Dislocation de la voie ferrée

Table 2. Extrait de l'AMDE pour le composant « ballast » d'un système de transport guidé en surface

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

4. Exploitation des résultats de l'AMDE : scénarios de défaillance

Grâce à l'AMDE et en raison de son caractère exhaustif dans l'identification des modes de défaillances de chacune des fonctions assurées par chacun des composants du système, il est possible d'établir des scénarios de défaillance. Notre objectif premier 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. De proche en proche, on détermine alors 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.

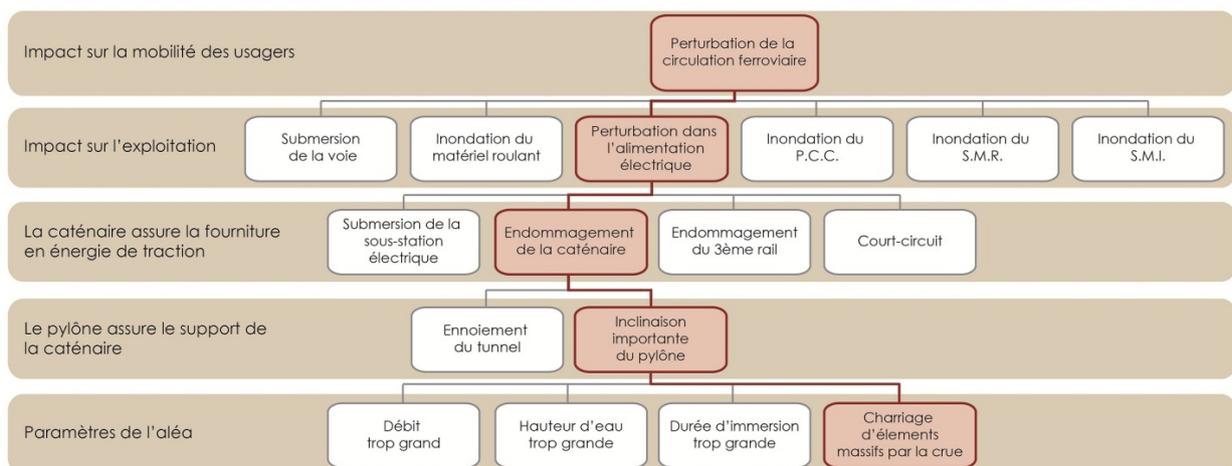


Figure 3. Exemple de scénario produit à partir de l'AMDE (représentation inspirée de (Lhomme *et al.*, 2011))

Ce mécanisme de construction fait donc apparaître les réponses intermédiaires des composants (lorsqu'ils sont soumis à une perturbation de type inondation) pour permettre une meilleure compréhension de la réponse globale du système, caractéristique de sa vulnérabilité face au risque d'inondation.

Perspectives de recherche : de la vulnérabilité à la résilience

Le travail présenté précédemment peut se résumer en une étude de la vulnérabilité des systèmes de transport guidé face à l'aléa d'inondation. L'aléa d'inondation a été traité dans cette communication afin d'illustrer l'aspect innovant de notre recherche : l'application de méthodes issues de la Sûreté de Fonctionnement à des perturbations extérieures au système. L'AMDE notamment a permis de dresser les scénarios de défaillance faisant intervenir des composants au fonctionnement dépendants les uns des autres. Néanmoins, pour rendre opérationnel ce travail c'est-à-dire traiter cette vulnérabilité, il apparaît nécessaire de se munir d'un cadre conceptuel afin d'élaborer des stratégies d'action et de gestion des risques. Or, le concept de résilience est pertinent dans cette optique dans la mesure où, lorsqu'il est muni d'un modèle conceptuel, il permet d'envisager des réponses opérationnelles qui ne concernent pas uniquement la vision très ingénieriste qui consiste à fiabiliser les systèmes (Barroca *et al.*, 2013b). En effet, ces réponses portent également sur des stratégies plus larges d'adaptation du besoin à la capacité de service du système ou encore d'absorption de la perturbation. Deux modèles complémentaires existent à ce jour pour donner un cadre conceptuel à la résilience et nos recherches actuelles consistent alors à rendre possible son opérationnalisation dans le domaine des transports.

1. Applications aux systèmes de transport guidé : modèle BB

Le modèle BB (pour « Behind the Barriers ») développé par (Barroca *et al.*, 2013b) repose sur l'identification de quatre types de résiliences complémentaires, quatre « piliers » du concept de résilience : la résilience cognitive, fonctionnelle, corrélative et organisationnelle. Concernant les systèmes de transport guidé, la résilience cognitive – qui concerne la connaissance du risque et de ses impacts – semble assez explorée et étudiée, et la résilience organisationnelle – qui renvoie notamment à des structures territoriales – s'applique à l'environnement spatial et urbain autour de notre système. L'attention se porte donc sur le fait de rendre opérationnelles la résilience fonctionnelle – qui vise à fiabiliser le système technique – et la résilience corrélative – qui caractérise la relation entre la demande de service et la capacité du système à y répondre.

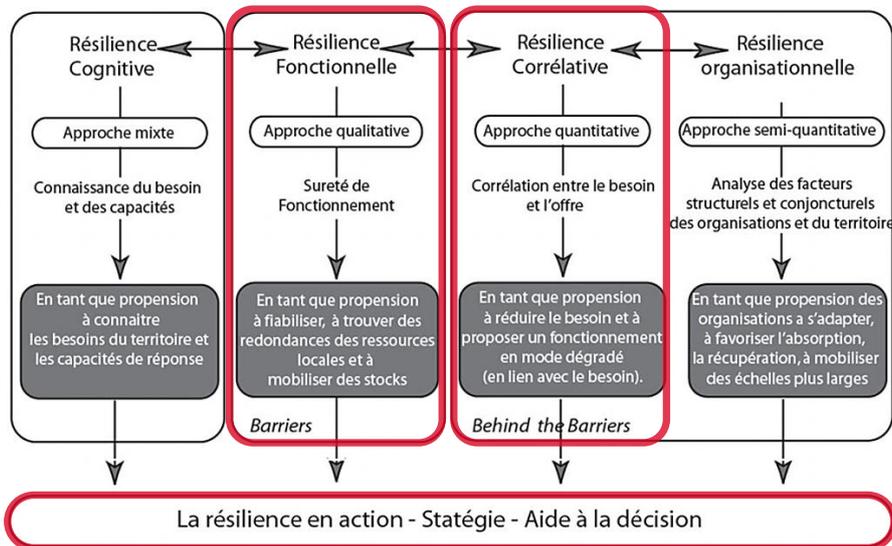


Figure 4. Modèle conceptuel « Behind the Barriers » et positionnement de nos recherches (Barroca *et al.*, 2013b)

Pour illustrer le lien existant entre les résiliences fonctionnelle et corrélative et les systèmes de transport guidé face à des aléas naturels, nous prenons le cas du phénomène de vents forts (ou vents traversiers) sur la ligne TGV-Méditerranée dans le sud-est de la France (Sourget *et al.*, 2004). En effet, la SNCF a développé une méthodologie complète d'analyse des risques dus aux vents traversiers sur cette ligne TGV conduisant à une double stratégie de protection et appliquée tant en phase projet qu'en opérationnel : des murs de protections anti-vent ont été construits sur les sites identifiés comme les plus dangereux et un système de régulation automatique de vitesse des trains a été mis en œuvre. Les murs de protections peuvent être rapprochés de la résilience fonctionnelle dans la mesure où ils fiabilisent le système de transport tandis que le système de régulation de vitesse des trains peut être associé à la résilience corrélative car, en réduisant la vitesse d'exploitation, il diminue la sollicitation pour préserver le système de transport (adaptation de la demande à la capacité du système à y répondre). Ainsi, bien que cette approche de la résilience n'ait pas été à proprement parlé utilisée dans cette étude de risque de vents traversiers par la SNCF, on constate avec un certain recul que la méthodologie employée pour fiabiliser le système s'intègre tout à fait au modèle BB et à sa typologie de résiliences complémentaires.

Finalement, notre travail actuel sur l'aléa inondation est exactement dans la continuité du travail réalisé sur l'aléa de vents traversiers, en ayant pour objectif final l'amélioration de la résilience fonctionnelle et corrélative des systèmes de transport guidé.

2. Application aux systèmes de transport guidé : modèle DS3

Le modèle DS3 (pour « Spatial Decision Support System ») développé par (Lhomme *et al.*, 2010) repose sur la définition de trois capacités primordiales pour étudier la résilience de systèmes techniques, tels les systèmes de transport guidé.

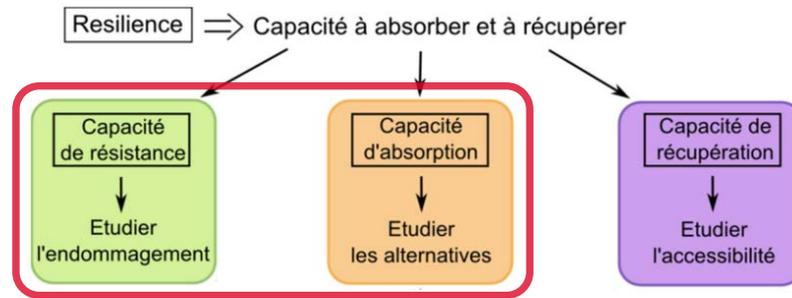


Figure 5. Modèle conceptuel « DS3 » et positionnement de nos recherches

Ces capacités sont la capacité de résistance qui consiste à analyser le degré d'endommagement matériel du système technique suite à une perturbation, la capacité d'absorption qui consiste à analyser les alternatives pouvant être offertes par le système technique suite à la défaillance d'un ou de plusieurs de ses composants (processus bouclés, composants redondants... qui permettent des fonctionnements en mode dégradé) et enfin la capacité de récupération qui correspond au temps nécessaire à la remise en service d'un ou plusieurs composants endommagés afin de retrouver un service opérationnel. Notre attention se focalise essentiellement sur les deux premières capacités plutôt que sur la capacité de récupération qui s'intéresse plus spécifiquement à la post-catastrophe. Ce modèle conceptuel appliqué aux systèmes de transport apparaît pertinent dans la caractérisation de « profils de résilience » de ces systèmes, complémentaires au modèle BB qui caractérise les stratégies opérationnelles de résilience. En effet, ces profils permettraient d'élaborer une « échelle de résilience » qui caractérise le degré de résilience d'un système de transport, en fonction de sa capacité de résistance, d'absorption et, éventuellement, de récupération face à une inondation. Pour la capacité de résistance, des paramètres tels que le coût et le temps de reconstruction d'un système après une inondation viendraient caractériser l'endommagement des composants successivement touchés par scénario de défaillance. Pour caractériser la capacité d'absorption, des paramètres tels que des temps de retard ou des linéaires de lignes interrompues viendraient caractériser le niveau de perturbation généré par l'inondation par scénario de défaillance. Ainsi, ces profils s'échelonnent donc d'un profil minimum correspondant à un système de transport très peu résilient et un profil maximum correspondant, au contraire, à un système fortement résilient. De plus, cette classification aurait le mérite de comparer, au moins relativement, deux systèmes de transport en termes de résilience. Ces profils permettraient, enfin, de juger de l'efficacité d'une stratégie de protection en observant l'évolution des trois capacités avant et après l'application de cette stratégie. Finalement, le modèle DS3 offre l'opportunité de hiérarchiser un certain nombre de systèmes de transport selon leur capacité à faire face à un aléa naturel, par exemple une inondation.

3. Liens entre les deux modèles conceptuels

Appliqués aux systèmes de transport guidé, ces deux modèles conceptuels de résilience se complètent plus qu'ils ne s'opposent. En effet, dans une certaine mesure, on peut considérer qu'ils ne s'emploient pas aux mêmes phases d'un projet de transport. D'où la pertinence de mobiliser ces deux approches conjointement.

Le modèle DS3 s'intéresse aux capacités intrinsèques du système à résister, à absorber et récupérer suite à la réalisation d'un aléa. En ce sens, il peut permettre de déterminer le degré de dégradation du système post-catastrophe et ainsi de caractériser l'apport de stratégies de protection sur le système. Ainsi, le modèle DS3 contribue, en phase d'exploitation du système et pendant tout son cycle de vie, à évaluer l'aptitude du système à faire face à des aléas.

Le modèle BB permet de simplifier le système réel étudié en structurant le concept de résilience en quatre axes décrits plus haut. Il offre donc une connaissance du système en lien avec ses capacités intrinsèques de résilience ainsi qu'en lien avec son organisation, ses ressources extérieures. Dans ce sens, ce 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 amont durant la conception du projet de transport, avant que l'aléa ne survienne.

Conclusion

À partir d'une analyse initiale qualitative de la vulnérabilité d'un panel de systèmes de transport guidé face à un panel d'aléas naturels, quelques aléas naturels ont pu être identifiés comme impactant fortement l'exploitation des systèmes de transport. En particulier, l'aléa inondation provoque un risque majeur lorsqu'il affecte un système de transport. C'est la raison pour laquelle cet aléa a été traité en premier lieu. Or, l'analyse préliminaire de vulnérabilité n'a pas apporté de précision quant aux composants ou sous-systèmes spécifiquement impactés par le risque.

L'aspect innovant de nos travaux réside alors dans l'application de méthodes de Sûreté de Fonctionnement à des perturbations extérieures au système, c'est-à-dire les aléas naturels. Plusieurs conclusions peuvent être tirées de la mobilisation de ces méthodes. Premièrement, l'analyse fonctionnelle a permis de mettre en évidence les relations de contact, de dépendances et de vulnérabilité face à une inondation qui existent entre les différents composants d'un système de transport guidé, en situation normale. Dans une certaine mesure, l'analyse fonctionnelle a alors permis de caractériser le système complexe étudié par un système mécanique équivalent, constitué de composants en relation et soumis à une sollicitation extérieure. Deuxièmement, la réalisation consécutive d'une AMDE a mis en exergue les causes et les effets des dysfonctions de composants. Or, l'AMDE a identifié les interdépendances entre les fonctions, et donc entre les composants, assurées par le système. Ainsi, à partir de réponses intermédiaires des composants du système soumis à une perturbation de type inondation, il a été possible de caractériser la réponse globale du système (perturbation de la circulation ferroviaire, interruption,...). Ces réponses du système sont élaborées à partir des scénarios de défaillance, faisant apparaître les relations de causalité dans les dysfonctionnements successifs des composants.

Enfin, pour rendre opérationnel les résultats déterminés par l'analyse fonctionnelle puis l'AMDE, nous nous sommes munis de cadres conceptuels centrés autour de la résilience afin de l'appliquer aux systèmes de transport guidé. Nos travaux semblent parfaitement s'adapter au premier modèle de résilience, le modèle « BB – Behind the Barriers » qui définit une typologie de résiliences complémentaires. Le second modèle de résilience, le modèle « DS3 » apparaît plus comme une perspective de

recherche dans la mesure où il pourrait permettre la définition de profils de résilience afin de caractériser la résilience plus ou moins grande de systèmes de transport à partir de valeurs liées à l'endommagement des composants, au temps de remise en service ou au niveau de perturbation occasionnée sur l'exploitation. Ces profils de résilience seraient sans doute, du moins dans un premier temps, le moyen de classer relativement les uns par rapport aux autres des systèmes de transport jugés résilients face à un aléa naturel. Ces profils s'intègrent finalement dans une attente majeure des acteurs du monde industriel et du monde universitaire : rendre opérationnel et fournir une approche plus physique du concept de résilience appliqué à des systèmes urbains.

Ainsi, les perspectives sont nombreuses. L'approche présentée ici est qualitative à semi-qualitative et ne permet pas encore de quantifier la vulnérabilité d'un système de transport guidé donné face à un aléa inondation défini par des paramètres physiques. Néanmoins, cette approche pose les bases pour quantifier cette vulnérabilité.

Les résultats présentés dans cette communication apportent des premiers éléments d'aide à la décision dans le monde incertain qu'est la maîtrise des risques naturels affectant les systèmes de transport guidé.

Références

- Barroca, B., Di Nardo, M., & Mboumoua, I., 2013a, De la vulnérabilité à la résilience : mutation ou bouleversement ? . EchoGéo, N°24. DOI:10.4000/echogeo.13439.
- Barroca, B., & Serre, D., 2013b, Behind The Barriers : A Resilience Conceptual Model. S.A.P.I.EN.S , 6.1, [En ligne], 15 Nov. 2013, <http://sapiens.revues.org/1529>.
- Cochran, I., 2009, Infrastructures de transport en France : Vulnérabilité au changement climatique et possibilités d'adaptation. Étude Climat n°18, Caisse des Dépôts. http://www.cdcclimat.com/IMG/pdf/18_Etude_Climat_FR_Infrastructures_de_transport_en_France.pdf
- Duinmeijer, A.G.P., Bouwknecht, R., 2004, Betrouwbaarheid Railinfrastructuur 2003 (Reliability Rail Infrastructure 2003). Prorail, Utrecht. Eads.
- 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, Université Paris-Diderot, 365p.
- Lhomme, S., Serre, D., Diab, Y. et Laganier, R., 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 des géographes français, pp. 487-502.
- Lhomme, S., Serre, D., Diab, Y., & Laganier, R., 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. In XXIX^{ème} Rencontres Universitaires de Génie Civil, pp. 60-69. Tlemcen.
- MEDDE, 2012, Première évaluation nationale des risques d'inondation, Principaux résultats, – EPRI 2011. Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie.
- Noyes D., Peres F., 2007, Analyse des systèmes – Sûreté de Fonctionnement, Techniques de l'ingénieur, AG3520, 9 p.
- Simon H. A., 1991, Sciences des systèmes Sciences de l'artificiel. Paris: Dunod, 229 p.
- Serre, D., 2005, Évaluation de la performance des digues de protection contre les inondations Modélisation de critères de décision dans un Système d'Information Géographique. Thèse de doctorat. Université Marne-la-Vallée.
- Serre, D., Peyras, L., Curt, C., Boissier, D., Diab Y., 2007, Assessment of civil engineering hydraulic infrastructures, Canadian Geotechnical Journal, N°44, pp. 1298-1313.
- Talon, A., Boissier, D., Peyras, L., 2009, Analyse de risques : Identification et estimation : Démarches d'analyse de risques - Méthodes qualitatives d'analyse de risques. Coordonnateur : H. Niandou. [En ligne], Mars 2009. http://www.unit.eu/cours/cyberrisques/etage_3_aurelie/co/Etage_3_synthese_web.html.
- Villemeur, A., 1998, Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels. Fiabilité, facteurs humains, informatisation, Collection de la Direction des Études et Recherches d'Électricité de France. Éd. Eyrolles, Paris.
- 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. Université Paris-Est Marne-la-Vallée.
- Zwingselstein, G., 1996, La maintenance basée sur la fiabilité, Collection Diagnostic et Maintenance, Hermès.