



HAL
open science

Résilience des systèmes urbains : proposition d'un cadre méthodologique pour répondre aux besoins des exploitants

Michaël Gonzva, Bruno Barroca, Damien Serre

► To cite this version:

Michaël Gonzva, Bruno Barroca, Damien Serre. Résilience des systèmes urbains : proposition d'un cadre méthodologique pour répondre aux besoins des exploitants. Colloque international " Penser et faire la résilience. Risques et territoires ", Mar 2017, Pau, France. hal-01677382

HAL Id: hal-01677382

<https://hal.science/hal-01677382v1>

Submitted on 8 Jan 2018

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 urbains : proposition d'un cadre méthodologique pour répondre aux besoins des exploitants

M. Gonzva^{1,2}, B. Barroca², D. Serre³

¹SYSTRA, Direction Innovation, 75015 Paris, France
(e-mail : mgonzva@systra.com)

²Université Paris-Est Marne-la-Vallée, Lab'Urba (Laboratoire d'Urbanisme – Département Génie Urbain, Marne La Vallée, France
(e-mails : bruno.barroca@u-pem.fr; michael.gonzva@u-pem.fr)

³Université d'Avignon et des Pays du Vaucluse, UMR ESPACE 7300 CNRS, Avignon, France
(e-mail: damien.serre@univ-avignon.fr)

Mots-clés

Gestion des risques – Démarche méthodologique – Résilience opérationnelle – Systèmes critiques urbains

Communication

Indépendamment de leurs spécificités géographiques, sociales ou économiques, toutes les villes font face à des risques de typologie différente et d'intensité variable. Malgré la diversité des risques il existe des traits communs essentiellement liés à la spécificité des territoires urbains fondamentalement marquées par leur complexité. Leur maîtrise et gestion soulèvent des interrogations théoriques liées à la compréhension des phénomènes et des défis opérationnels quant aux actions concrètes de mitigation à mettre en œuvre. Parmi les éléments-clés de la maîtrise des risques les infrastructures critiques particulièrement vulnérables sont des éléments essentiels au fonctionnement urbain.

Les infrastructures critiques ont été analysées vis-à-vis de leurs fragilités, de leurs dépendances et de leurs services. La volonté de fiabilisation pour un fonctionnement en mode dégradé est un des résultats qui a amené à sécuriser et à protéger les éléments les plus fragiles. Du côté de la recherche urbaine se développe depuis les années 2000 le concept de résilience. La résilience peut se définir comme la capacité d'un système à absorber le changement, à persister au-delà d'une perturbation et à retrouver rapidement un niveau de service correspondant aux besoins.

L'objectif de cette communication consiste à présenter une démarche méthodologique développée depuis une dizaine d'années dans le but de prendre en compte la complexité des systèmes d'infrastructures critiques urbaines dans un contexte de maîtrise et gestion des risques. Cette complexité est appréhendée sous l'angle de l'omniprésence des interdépendances, communément démontrées comme vecteur de propagation des perturbations. Notre démarche méthodologique a été appliquée à plusieurs systèmes urbains et a été testée dans le but d'y intégrer la complexité et de produire de la connaissance nécessaire à la formalisation de l'action en faveur de la gestion des risques.

Synthèse des méthodes dominantes mobilisées pour l'analyse des risques affectant les systèmes urbains

Les systèmes qui constituent les villes sont considérés comme des infrastructures critiques. Leurs caractéristiques principales sont établies clairement (Kröger 2008) et collectivement identifiées par un grand nombre d'institutions internationales (DHS 2006; Parlement Européen 2008; PSC 2009). Structurellement, ils sont composés d'un grand nombre d'éléments qui interagissent entre eux de façon non linéaire (Simon 1991) et dans lesquels les relations de cause à effet ne sont pas toujours établies scientifiquement et nécessitent alors une part d'intuitif (Serre 2005; Serre 2011). Pour minimiser cette part d'intuitif qui peut représenter un danger dans la compréhension du fonctionnement et surtout des dysfonctionnements de ces infrastructures critiques, il est possible d'avoir recours respectivement à un modèle fonctionnel et dysfonctionnel du système.

La modélisation fonctionnelle comme moyen d'analyser les risques qui incombent aux systèmes urbains apparaît donc prometteuse pour réduire le haut degré de complexité d'ordre technique et organisationnel de ces systèmes car cette complexité 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 urbains : les méthodes issues de la Sûreté de Fonctionnement. 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 & Pérès 2007). La Sûreté de Fonctionnement est tout à fait adaptée pour une analyse des défaillances des composants propres à un système urbain lorsque survient un aléa naturel, en s'appuyant sur un support méthodologique diversifié et puissant.

Parmi ces méthodologies, l'Analyse Fonctionnelle pour élaborer un modèle de fonctionnement du système et l'Analyse des Modes de Défaillance et leurs Effets (AMDE) s'avèrent pertinentes et appropriées dans le cas de systèmes urbains touchés par un risque naturel tel qu'une inondation (Gonzva et al. 2016). Premièrement, l'Analyse Fonctionnelle permet une décomposition matérielle et fonctionnelle d'un système en cours de conception ou en fonctionnement. L'Analyse Fonctionnelle consiste alors à recenser, caractériser, ordonner, hiérarchiser et valoriser les fonctions assurées par les composants du système (Zwingelstein 2009). 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.

Ainsi, les 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. En particulier, l'Analyse Fonctionnelle est appliquée à de nombreux systèmes urbains (Gonzva 2017) : 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), etc. Cette tendance ne s'essouffle guère avec des utilisations en cours de l'Analyse Fonctionnelle dans des projets de recherche (Figure 1).

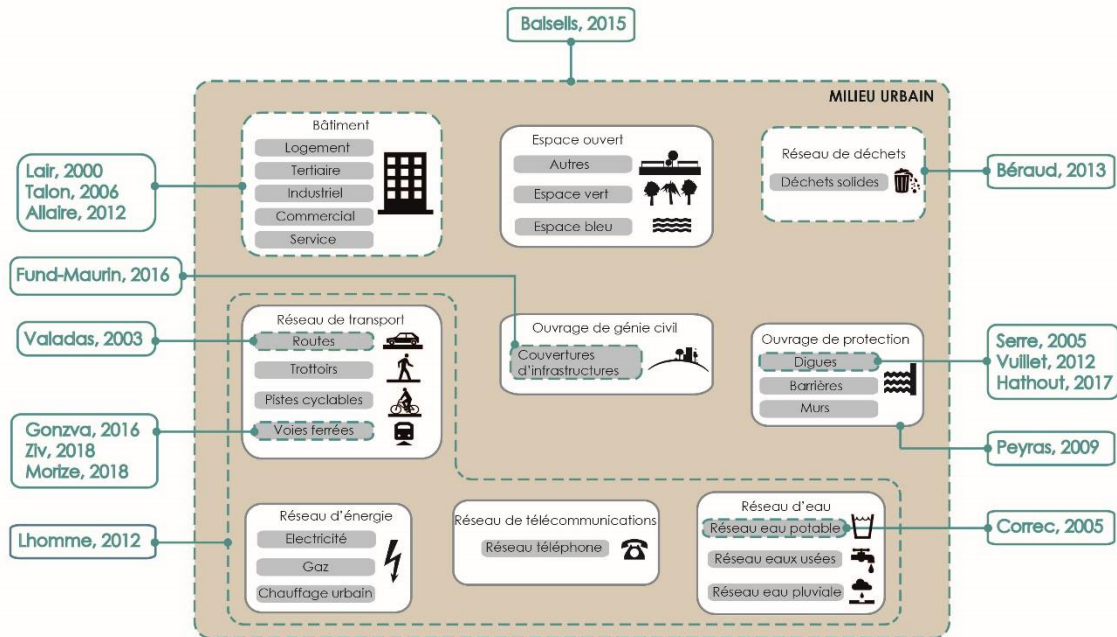


Figure 1. Etat de l'art des applications majeures de l'analyse fonctionnelle issue de la Sûreté de Fonctionnement en génie urbain (Gonzva 2017)

Exemple à l'échelle d'une infrastructure critique : les systèmes de transport

Dans une démarche d'analyse de la vulnérabilité des systèmes de transport, 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 2). Cette troisième méthode est utilisée pour représenter les résultats obtenus lors de l'AMDE. Ces Arbres d'Evènements servent dans leur caractéristique causale c'est-à-dire pour formaliser sous forme de graphes d'évènements causaux une séquence d'évènements constituée d'un évènement initiateur et d'une combinaison de défaillances successives.

La démarche méthodologique s'avère, de plus, efficace pour traiter les trois configurations classiques d'implantation des éléments 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.

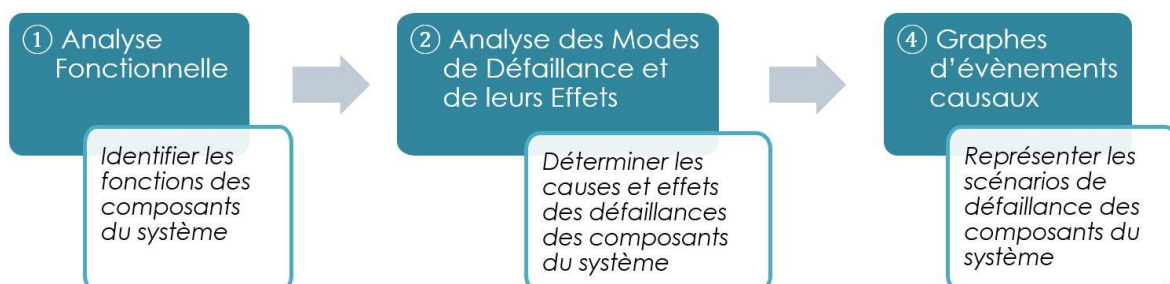


Figure 2. Démarche méthodologique globale de caractérisation de la vulnérabilité d'un système de transport guidé soumis à un risque inondation (Gonzva 2017)

A partir d'une étude statistique sur l'ensemble des scénarios de défaillances par effet domino, une analyse comportementale des composants est réalisée. Trois profils de composants émergent en situation de risque, lorsque le système subit une inondation (Gonzva 2017) : les 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.

Ainsi, cette démarche méthodologique globale permet la production des *scénarios de défaillances* par effet domino des composants du système lorsqu'il est touché par une inondation. En ce sens, elle est bien une démarche d'analyse « par l'intérieur » (Gouadjio Kagho 2013) de la vulnérabilité des systèmes de transport, c'est-à-dire au travers des mécanismes internes de défaillances entre composants.

Contribution des analyses à l'échelle d'infrastructures critiques à l'amélioration de la résilience urbaine

Dès lors, deux interrogations se posent. Premièrement, cette démarche méthodologique systémique est-elle applicable à d'autres systèmes urbains, voire à tous les systèmes urbains indépendamment du service délivré (électricité, eau, déchets, etc.) ? Dans ce cas, elle offrirait un cadre d'analyse commun des systèmes urbains sous l'angle des risques et permettrait donc une compréhension cohérente de leur perturbation lorsque survient un aléa naturel. Deuxièmement, dans quelle mesure une analyse individuelle de la vulnérabilité des systèmes urbains à partir d'un tel cadre méthodologique formel peut-elle être un socle de connaissances dans le but d'améliorer la résilience de la ville ? Cette seconde interrogation a un corollaire : quels développements futurs, théoriques et pratiques, de ce cadre méthodologique doivent être réalisés pour renforcer la résilience de la ville à partir de l'amélioration de la résilience de ses systèmes constitutifs ?

Concernant la première interrogation, une raison d'ordre structurel étaye la possibilité de transposition de la démarche à d'autres systèmes urbains. Ces derniers présentent, en effet, 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. A chaque niveau de granularité, l'élément peut être considéré comme un système, et dès lors la démarche est potentiellement applicable.

Par exemple, le réseau électrique en France peut être distingué en trois sous-systèmes :

- 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, industriels et particuliers.

Il est aisé de constater que chaque composant peut être dissocié à son tour en éléments plus fins. De cette manière, il devient possible de réappliquer la démarche méthodologique globale permettant l'identification des *scénarios de défaillances* par effet domino des composants. Par ailleurs, la capacité de la démarche à intégrer des niveaux différents d'implantation de composants du

système étudié est un atout. En effet, 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.). La méthodologie permet donc d'inclure dans l'analyse les particularités du territoire urbain sur lequel est ou sera implanté le système urbain étudié : selon le contexte local géographique, météorologique, urbain, la démarche met en avant la configuration d'implantation souterrain, en surface ou aérienne la plus à même de réduire la vulnérabilité. Ainsi, 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, consécutivement, dans les stratégies d'amélioration de la résilience de ces systèmes.

La seconde interrogation aborde la portée opérationnelle des connaissances générées par un tel cadre méthodologique pour le renforcement de la résilience à l'échelle urbaine. En ce sens, elle oriente les perspectives de travail vers les opérateurs et gestionnaires des systèmes urbains concernés par l'enjeu que représente la gestion complexe de l'ensemble des risques susceptibles de survenir. Le projet européen 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 3).

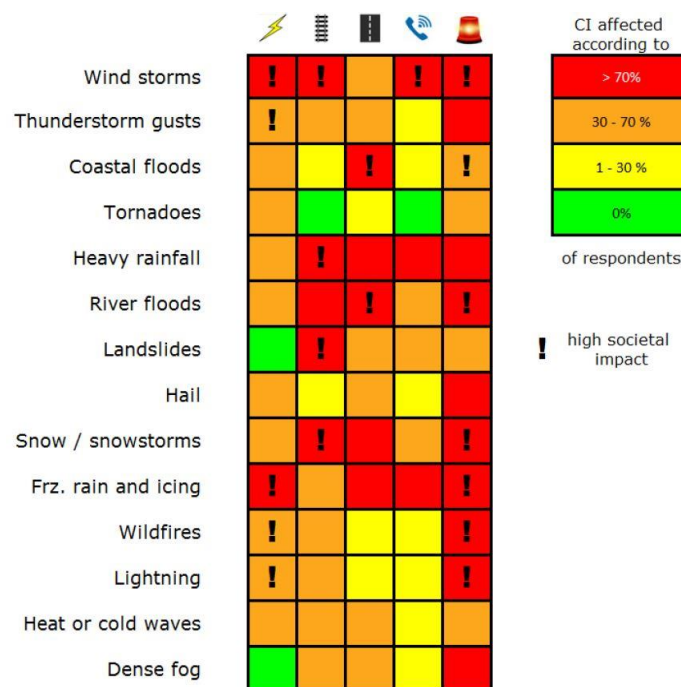


Figure 3 : Résultats d'interviews menées dans le cadre du projet européen RAIN auprès de gestionnaires et exploitants européens d'infrastructures critiques ayant à faire face à des risques naturels (GROENEMEIJER, 2015)

Il semble que ce soit au travers de la continuité d'activité des systèmes urbains que peut se positionner une démarche d'amélioration de leur résilience. En particulier, la capacité à faire

fonctionner les systèmes urbains en mode dégradé est une composante importante de la résilience (Lhomme et al. 2010; Toubin 2014). En effet, la résilience d'un système est directement liée à son degré de préparation en matière de continuité d'activité lors d'un événement 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). La continuité d'activité donne au concept de résilience une portée collective qui dépasse l'échelle du système.

La démarche méthodologique, une fois appliquée à un système urbain tel que les systèmes de transport guidé face au risque inondation, offre justement des connaissances en faveur de l'élaboration de stratégies de continuité d'activité. En particulier, 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. 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. Deuxièmement, une stratégie dans le cadre de l'exploitation peut consister à assurer un suivi accru de l'état des composants au profil propagateur pour prévenir leur dysfonctionnement. Troisièmement, une 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.

Conclusion

Toutes les villes font face à des risques de typologie différente et d'intensité variable. Cette diversité des risques – naturels, technologiques, etc. – laissent apparaître un trait commun qui est celui de la complexité des territoires urbains. Cette complexité peut être appréhendée en partie par l'analyse des systèmes techniques qui constituent les villes : réseaux de transport, réseau d'alimentation en eau potable, etc. Ces infrastructures sont des éléments-clés de la maîtrise et de la gestion des risques urbains car ils sont d'une part vulnérables, et d'autre part, le bon fonctionnement d'une ville dépend du bon fonctionnement de ceux-ci.

Basée sur plusieurs méthodes issues de la sûreté de fonctionnement c'est-à-dire visant à étudier le fonctionnement et les dysfonctionnements potentielles d'un système, une démarche méthodologique globale permet la production des scénarios de défaillances par effet domino des composants d'un système lorsqu'il est touché par une inondation. La connaissance exhaustive de ces défaillances en chaîne est essentielle car elles sont un facteur dominant de la vulnérabilité d'un système. C'est donc cette démarche d'analyse interne du système qui donne une caractérisation de la vulnérabilité, nécessaire mais non suffisante, à toute amélioration de la résilience.

Appliquée aux systèmes de transport guidé subissant une inondation, cette méthodologie apparaît tout à fait applicable aux autres systèmes urbains au vue des structures et des fonctions similaires qu'ils présentent. Néanmoins, la méthode jusqu'ici particulièrement théorique nécessite des développements d'ordre opérationnel afin de devenir un outil d'aide à la décision en termes de conception et d'exploitation des systèmes urbains par les exploitants et les gestionnaires. Parmi ces développements, la confrontation des résultats de la méthode à des incidents passés sur les systèmes urbains apparaît essentielle afin d'améliorer celle-ci.

Références

- Beraud, H., 2013. *Initier la résilience du service de gestion des déchets aux catastrophes naturelles - Le cas des territoires urbains et de l'inondation*. Université Paris-Est.
- Commissariat Général au Développement Durable, 2013. *Approche intégrée de la résilience des territoires - Séminaire de travail 5 février 2013*, Paris. Available at: <http://hdl.handle.net/2042/51490>.
- DHS, 2006. *National Infrastructure Protection Plan*, Washington, D.C.
- Gonzva, M. et al., 2016. 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"*, 26(3 (juillet-septembre)), pp.329–361.
- Gonzva, M., 2017. *Résilience des systèmes de transport guidé en milieu urbain : approche quantitative des perturbations et stratégies de gestion*. Paris-Est.
- Gouadjio Kagho, N.C., 2013. *Etude de la vulnérabilité et de la robustesse des ouvrages*. Université Paris-Est.
- Kröger, W., 2008. Critical infrastructures at risk: A need for a new conceptual approach and extended analytical tools. *Reliability Engineering & System Safety*, 93(12), pp.1781–1787. Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0951832008000744> [Accessed August 6, 2013].
- Lair, J., 2000. *Evaluation de la durabilité des systèmes constructifs du bâtiment*. Université Blaise-Pascal.
- Lhomme, S. et al., 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*, pp.487–502. Available at: http://hal.ird.fr/docs/00/58/00/25/PDF/Lhomme-Laganier_BAGF.pdf.
- Mortureux, Y., 2001. La sûreté de fonctionnement : méthodes pour maîtriser les risques. *Techniques de l'Ingénieur*, 33(0), p.17.
- Noyes, D. & Pérès, F., 2007. Analyse des systèmes - Sûreté de fonctionnement. *Techniques de l'Ingénieur*, 33, p.14.
- Parlement Européen, 2008. *Directive 2008/114/CE du 8 décembre 2008 concernant le recensement et la désignation des infrastructures critiques européennes ainsi que l'évaluation de la nécessité d'améliorer leur protection*,
- Peyras, L., 2002. *Diagnostic et analyse de risques liés au vieillissement des barrages - Développement de méthodes d'aide à l'expertise*. Université Blaise Pascal - Clermont II.
- PSC, 2009. *National Strategy for Critical Infrastructure*, Canada. Available at: www.ahmac.gov.au.
- 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*. Marne-la-Vallée.
- Serre, D., 2011. *La ville résiliente aux inondations - Méthodes et outils d'évaluation*. Université Paris-Est.
- Simon, H.A., 1991. *Sciences des systèmes, sciences de l'artificiel* Dunod., Paris.
- Talon, A., 2006. *Evaluation des scénarii de dégradation des produits de construction*. Université Blaise Pascal - Clermont II. Available at: <http://tel.archives-ouvertes.fr/docs/00/69/50/40/PDF/2006CLF21668.pdf>.
- Talon, A., Boissier, D. & Peyras, L., 2009. Démarches d'analyse de risques - Méthodes qualitatives d'analyse de risques. *Université Numérique Ingénierie et Technologie (UNIT)*. Available at: http://www.unit.eu/cours/cyberriques/etage_3_aurelie/co/Etage_3_synthese_web.html [Accessed April 1, 2016].
- Toubin, M., 2014. *Améliorer la résilience urbaine par un diagnostic collaboratif - L'exemple des services urbains parisiens face à l'inondation*. Université Paris-Diderot.
- Valadas, E., 2003. *Identification des scénarios de dégradations des chaussées bitumineuses épaisses*. Université Blaise-Pascal.
- Villemeur, A., 1997. *Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels - Fiabilité, facteurs humains, informatisation* 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*. Université Paris-Est Marne-la-Vallée.

Zwingelstein, G., 1996. *La maintenance basée sur la fiabilité* Hermes Sci.,

Zwingelstein, G., 2009. Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels complexes - Analyse prévisionnelle et bases de données de fiabilité. *Techniques de l'ingénieur*, (Juin).

Biographies

Michaël Gonzva est diplômé de l'École des Ingénieurs de la Ville de Paris ainsi que d'un master en génie urbain de l'Université Paris-Est. Afin de spécialiser sa formation, il termine son doctorat sur la résilience des systèmes de transport guidé face aux risques naturels dans le cadre d'un partenariat entre l'Université Paris-Est et le groupe international d'ingénierie ferroviaire SYSTRA.

Bruno Barroca est Architecte DPLG et maître de conférences au département de génie urbain de l'université Paris-Est Marne-la-Vallée. Ses recherches au sein du Lab'Urba se concentrent sur l'étude des risques urbains et sur la mise en action de la résilience dans les territoires urbains. A ce titre, il co-pilote le groupe « Risque » du LABEX Futurs Urbains et co-dirige la revue « Risques urbains » publiée chez ISTE édition.

Damien Serre est professeur de Géographie à l'Université d'Avignon et des Pays du Vaucluse. Il conduit ses recherches au sein de l'UMR ESPACE. Ses recherches s'intéressent au domaine des risques et plus précisément aux stratégies de résilience des territoires au regard de diverses sollicitations des systèmes territoriaux et urbains, incluant les infrastructures critiques, leurs natures, leurs formes, leurs relations et leurs positions. Dans ce contexte, les Systèmes Spatiaux d'Aide à la Décision constituent un moyen d'opérationnalisation du concept de résilience lorsqu'ils sont couplés à des modélisations spécifiques.