HAL
open science

Résilience de quartiers et systèmes de transport face à l'inondation - Mobilisation de l'analyse fonctionnelle

Michaël Gonzva, Mireia Balsells, Bruno Barroca

To cite this version:

Michaël Gonzva, Mireia Balsells, Bruno Barroca. Résilience de quartiers et systèmes de transport face à l'inondation - Mobilisation de l'analyse fonctionnelle. Florence Rudolf. Les villes à la croisée des stratégies globales et locales des enjeux climatiques, Presses de l'Université Laval, pp.201-219, 2016, 978-2-7637-2874-2. hal-01676292

HAL Id: hal-01676292

https://hal.science/hal-01676292

Submitted on 5 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 de quartiers et systèmes de transport face à l'inondation : mobilisation de l'analyse fonctionnelle

Michaël Gonzva, Mireia Balsells, Bruno Barroca

Introduction

La perspective d'un changement climatique combinée à la concentration des biens et des personnes en milieu urbain laisse présager des événements dévastateurs pour les années à venir (Serre *et al.*, 2012). Les changements climatiques semblent de surcroît avoir un rôle amplificateur sur les risques « naturels » qui doivent alors être réexaminés en fonction de cette nouvelle donne climatique (Quenault, 2013). Parmi les risques liés aux conditions climatiques, le risque inondation apparaît comme l'un des plus fréquents et des plus catastrophiques[1]. Pour illustration, en France, un habitant sur quatre et un emploi sur trois sont en effet potentiellement exposés au risque d'inondation (MEDDE, 2012). Lors d'événements climatiques intenses, les systèmes de transport ont montré leur sensibilité au travers d'incidents nombreux (Oslakovic Stipanovic *et al.*, 2013). En outre, les quartiers urbains sont aussi affectés par ces incertitudes et ces risques. Or, leurs nombreuses interactions de dépendances et d'interdépendances avec les autres échelles spatiales urbaines (territoires, villes, etc.) rendent encore plus difficile la gestion des risques naturels (Balsells *et al.*, 2013a), en particulier celle du risque inondation.
Du côté de la recherche scientifique, depuis le milieu des années 2000, le concept de *résilience* véhicule une nouvelle manière d'analyser le risque. Selon ce concept, le risque est appliqué à différentes échelles spatiales et temporelles (Serre, 2011) d'une part, et appréhendé de manière systémique, d'autre part. La résilience est ainsi vue comme la capacité d'un système à absorber le changement et à persister au-delà d'une perturbation (Barroca *et al.*, 2013). De plus, la notion de durabilité peut sembler sous-jacente au concept de résilience. En effet, si l'on considère que la résilience se traduit, dans la gestion des risques, par des actions de réduction des conséquences de perturbations naturelles (Balsells *et al.*, 2013a), alors cette gestion des risques n'apparaît plus comme une contrainte uniquement, mais comme une opportunité pour un développement urbain durable.
Dans cette communication, nous nous intéressons à l'étude de la résilience urbaine face au risque d'inondation à l'échelle locale du quartier. Cette recherche porte spécifiquement sur la résilience face au risque d'inondation des quartiers et des systèmes de transport, deux systèmes physiquement et fonctionnellement imbriqués. L'enjeu est de déterminer comment des composants urbains structurants tels que les systèmes de transport s'intègrent dans le fonctionnement technique des quartiers en contribuant globalement à la résilience des villes face à des risques d'inondation.

Résilience urbaine face au risque d'inondation

Émergence de la résilience dans la gestion des risques d'inondation en milieu urbain
Compte tenu de l'actuelle situation concernant les catastrophes naturelles et les perturbations sociales qui affectent les systèmes urbains, la résilience urbaine est présentée comme un moyen par lequel les systèmes urbains peuvent faire face à des chocs inattendus et atteindre la durabilité au fil du temps (Toubin *et al.,* 2014). En effet, il apparaît qu'« améliorer la résilience augmente les chances d'un

[1] EM-DAT: The OFDA/CRED International Disaster Database – www.emdat.be.

développement durable dans un environnement changeant où le futur est imprévisible et la surprise est probable »[2] (Folke *et al.,* 2002). Dans ce contexte, la résilience est clairement reconnue comme un nouveau paradigme dans la gestion des risques d'inondation permettant, en définitive, de faire face à des environnements complexes (Lhomme *et al.,* 2013). Ainsi, la perturbation n'est plus nécessairement considérée comme un événement négatif, mais joue, au contraire, un rôle important dans le fonctionnement du système urbain. De ce point de vue, la gestion des risques d'inondation pour un système urbain ne doit pas se limiter seulement à faire croître continuellement sa résistance, idée basée sur le fait qu'il existe une unique situation d'équilibre possible pour ce système maintenue grâce à des mesures de protection. Mais, conceptuellement, il s'agit plutôt de créer d'autres situations d'équilibres viables qui permettent aux systèmes urbains de continuer à fonctionner lorsque survient une inondation. Cette distinction est la principale différence avec la notion traditionnelle de réduction de la vulnérabilité d'un système. C'est à partir de cette différence que la résilience représente un changement concernant les stratégies traditionnelles de gestion des risques d'inondation. La résilience offre une approche plus globale que la réduction de vulnérabilité en considérant les interactions entre les systèmes urbains et notamment leur emboitement physique et fonctionnel.

Résilience urbaine : échelles spatiale et temporelle

Dans le contexte urbain, il existe différents types de systèmes (constructions et réseaux techniques, organisation des secours, etc.) à des échelles locales dont le but est d'assurer des fonctions et des services en continu afin de maintenir un niveau socio-économique suffisant à des échelles spatiales plus larges. Étudier la résilience urbaine renvoie alors à la question de la pertinence des échelles, aussi bien spatiales que temporelles, pour la traiter. La résilience est un concept qui a évolué par rapport au développement dynamique des systèmes toujours plus complexes et adaptables, et présentant toujours plus d'interactions à différentes échelles. Ainsi, au vu de l'échelonnement de ces systèmes urbains sur plusieurs dimensions, la résilience urbaine au risque d'inondation peut être exprimée au travers de processus eux-mêmes formulés à diverses échelles spatiales et temporelles. Cette idée conduit à la notion de *panarchy* développée par Gunderson et Holling (2002). En effet, la *panarchy* considère les dynamiques rapides et lentes, les interactions et les interdépendances entre les différentes échelles. Il s'agit alors de promouvoir des changements locaux et à court terme qui sont ensuite assimilés par des échelles plus larges menant à leur transformation et adaptation au fil du temps. Ces adaptations permettent ainsi de répondre à de possibles contraintes futures. C'est cette notion de *panarchy* et d'imbrication de systèmes urbains agissant à différentes échelles que nous allons illustrer dans cette communication à partir des exemples des systèmes de transport guidé et des quartiers.

Opérationnalité de la résilience urbaine face au risque d'inondation

Bien que la résilience urbaine permette de dépasser conceptuellement et méthodologiquement les analyses sectorielles comme nous l'avons vu, il est difficile de rendre le concept opérationnel, car il donne lieu à de multiples traductions en matière de problématique et de développement méthodologique (Toubin *et al.,* 2012). En effet, même si l'intérêt de la résilience urbaine est évident, les actions visant à l'implémentation ou à l'évaluation opérationnelle de celle-ci sont encore limitées (Barroca *et al.,* 2012). Néanmoins, concernant la gestion des risques d'inondation en milieu urbain, toujours dans une approche théorique, plusieurs études et projets de recherche visant à rendre opérationnelle la résilience urbaine face au risque d'inondation, peuvent être identifiés (Fig.1). En utilisant des approches diverses selon différentes dimensions urbaines et échelles spatiales, ces travaux ont pour objectif principal de développer des outils (modèles, attributs, indicateurs, etc.) et des méthodes pour analyser ou évaluer la résilience urbaine face au risque d'inondation. L'objectif second de ces travaux est d'intégrer ce concept

[2] « Managing for resilience enhances the likelihood of sustaining development in changing environments where the future is unpredictable and surprise is likely ».

dans les pratiques urbaines actuelles. Les travaux identifiés et analysés sont classés en deux groupes principaux (Fig.1) en fonction de leur échelle d'application. Selon qu'il s'agit de travaux qui traitent la résilience d'une manière générale ou qui se focalisent sur la résilience de systèmes particuliers, ils sont respectivement situés en haut ou en bas du tableau.

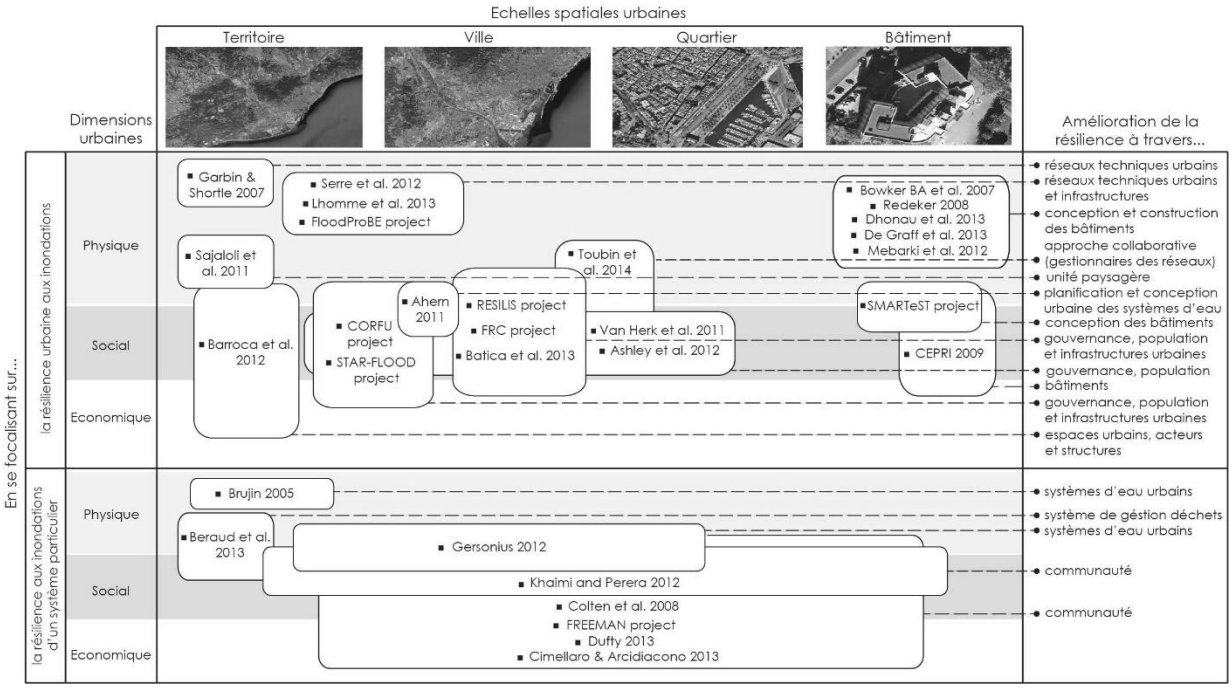

Figure 1. Synthèse sur l'opérationnalisation de la résilience urbaine face au risque d'inondation (auteur : Balsells, M.)

Bien que non exhaustive, il ressort de l'analyse de la bibliographie, la tendance suivante : à ce jour, il n'existe pas – ou peu – de références identifiées concernant des études holistiques, focalisées sur l'opérationnalisation de la résilience face au risque d'inondation, à l'échelle du quartier. Bien que cette échelle soit appréhendée dans certaines recherches (Toubin *et al.,* 2014), la résilience urbaine ne tient pas compte, dans ces dernières, de l'ensemble des composants urbains présents. Par ailleurs, pour les travaux qui se focalisent sur la résilience de systèmes particuliers, aucune attention spécifique n'est accordée à l'échelle du quartier. Il y a donc une carence ou un déficit en matière de modélisation de la résilience urbaine. Enfin, nous constatons qu'il n'y a pas de « bonnes » ou de « mauvaises » échelles spatiales pour étudier ou améliorer la résilience urbaine face au risque d'inondation, mais qu'il existe plutôt plusieurs approches et outils – eux-mêmes destinés à plusieurs acteurs – dont la mobilisation varie selon les échelles d'étude.

Analyse des systèmes urbains face au risque d'inondation

C'est à partir d'une étude préalable du fonctionnement en situation normale du quartier et des systèmes de transport qu'il nous est possible d'appréhender différentes situations en cas d'inondation. Pour ce faire, la notion d'échelle spatiale est primordiale dans cette étude. En effet, lorsque l'on se place à une échelle plus large que celle du quartier (échelle de la ville, du territoire), il est possible d'identifier plusieurs quartiers eux-mêmes constitués par des systèmes de transport et connectés les uns aux autres par d'autres systèmes de transport. Ainsi, dans une approche similaire à la *panarchy* de Gunderson et Holling (2002) (Fig.2), un premier temps consiste à étudier la résilience du quartier et donc des systèmes de transport imbriqués dans celui-ci à la suite d'une perturbation.

La résilience urbaine à cette échelle est alors vue comme un processus qui vise à améliorer la capacité du quartier et des systèmes de transport imbriqués à répondre aux perturbations. La résilience peut être considérée ici comme une propriété, une qualité inhérente au système. Un deuxième temps d'analyse considère les impacts de perturbations locales à long terme. La résilience n'est plus définie comme une propriété du système, mais comme un processus qui amène à une condition de résilience. Ainsi, pour un quartier donné, caractérisé notamment par plusieurs systèmes de transport, l'objectif est de répondre aux défis à court terme de gestion des risques d'inondation par des actions à cette échelle locale. En raison de l'aspect systémique du *quartier*, des actions d'amélioration de la résilience de certains composants urbains peuvent se traduire par l'amélioration de la résilience du quartier dans son ensemble. L'objectif de ces interventions est également de promouvoir des mécanismes permettant la transformation et l'adaptation à long terme et à des échelles spatiales plus larges. Ces échelles spatiales intègrent alors plusieurs quartiers, notamment caractérisés par des systèmes de transport, et connectés entre eux par d'autres systèmes de transport. Ces transformations et adaptations à long terme et de façon continue devraient permettre de répondre positivement à de possibles perturbations futures.

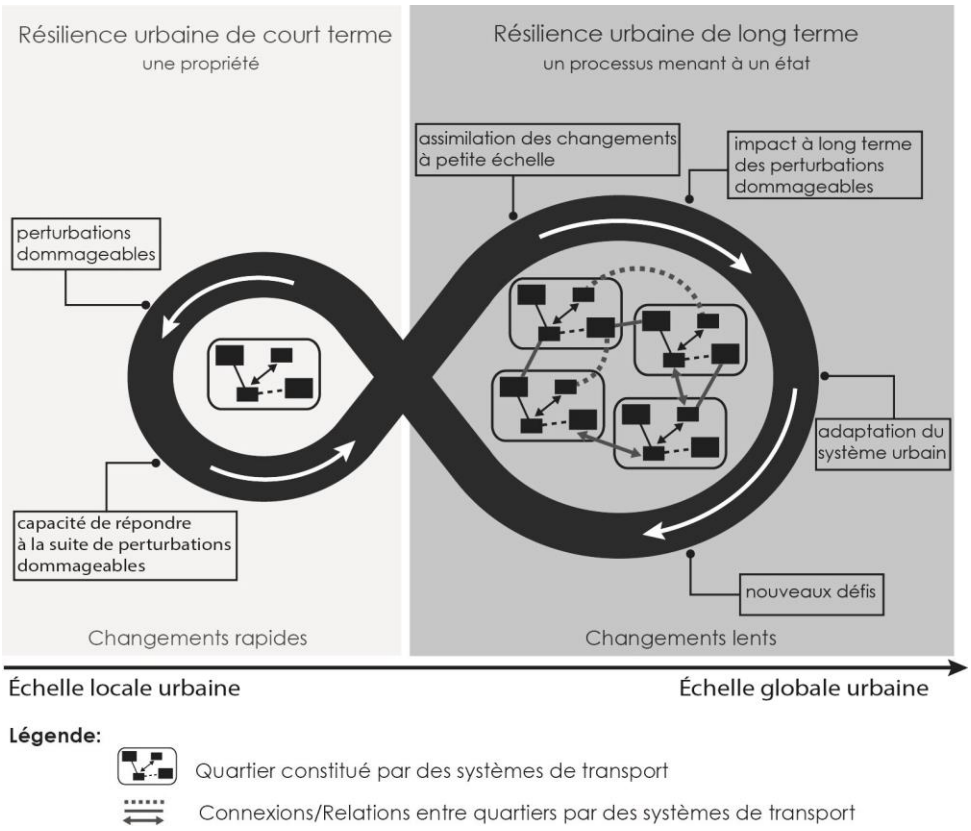

Figure 2. Concept de panarchy (Gunderson et Holling, 2002) adapté à nos systèmes d'étude (auteur : Balsells, M., 2014)

Méthodes de Sûreté de Fonctionnement : l'Analyse Fonctionnelle

Méthodes de Sûreté de Fonctionnement

Les quartiers et les systèmes de transport en tant que composants du milieu urbain peuvent être chacun considéré comme des systèmes complexes dans la mesure où les successions de causes et d'effets qui régissent leur fonctionnement ainsi que leurs nombreuses interactions avec leur environnement sont complexes à appréhender. Or, la complexité inhérente de ces systèmes (grand nombre de sous-systèmes interagissant, multiples défaillances simultanées, processus bouclés, etc.) rend les approches physiques

classiques peu, voire non efficaces, pour produire un modèle de fonctionnement (Villemeur, 1998 ; Zwingelstein, 1996).
La Sûreté de Fonctionnement consiste à connaître, à évaluer, à prévoir, à mesurer et à 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 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 les méthodes issues de la Sûreté de Fonctionnement, cette modélisation fonctionnelle est une analyse préalable à l'application d'autres méthodes, qualitatives ou quantitatives.
Ainsi, 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.

Analyse Fonctionnelle et applications en génie urbain
Les méthodes de la Sûreté de Fonctionnement ont été développées à l'origine pour étudier des systèmes industriels au fonctionnement complexe (Villemeur, 1998). Or, depuis un certain nombre d'années, des travaux de recherche appliquée mobilisent ces méthodes pour la modélisation du fonctionnement de systèmes complexes de type urbain. Parmi ces méthodes existe l'AF qui est une des plus utilisées en Sûreté de Fonctionnement. Elle permet de modéliser le fonctionnement de systèmes complexes 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 (Zwingelstein, 1996). Deux outils sont alors mis en œuvre pour représenter le système : le Bloc-diagramme Fonctionnel (BdF) et le Tableau d'Analyse Fonctionnelle (TAF) (Zwingelstein, 1996). Le Bloc-diagramme Fonctionnel 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. Le Tableau d'Analyse Fonctionnelle découle de l'analyse du Bloc-diagramme Fonctionnel en rassemblant les fonctions identifiées du système.

Cette méthode a été appliquée dans plusieurs travaux de génie urbain, car elle est un outil préalable puissant pour déterminer le modèle de fonctionnement, et donc de dysfonctionnement, de systèmes complexes lorsqu'ils font face à une crise. L'Analyse Fonctionnelle permet ainsi d'étudier la résilience de systèmes face à cet aléa naturel, tels que les digues (Serre, 2005 ; Serre et al., 2012; Vuillet, 2012), les réseaux techniques urbains (Lhomme, 2012) ou encore le service de gestion des déchets (Béraud, 2013). D'autres applications en génie urbain existent, non nécessairement associées à la résilience urbaine (Fig.3).

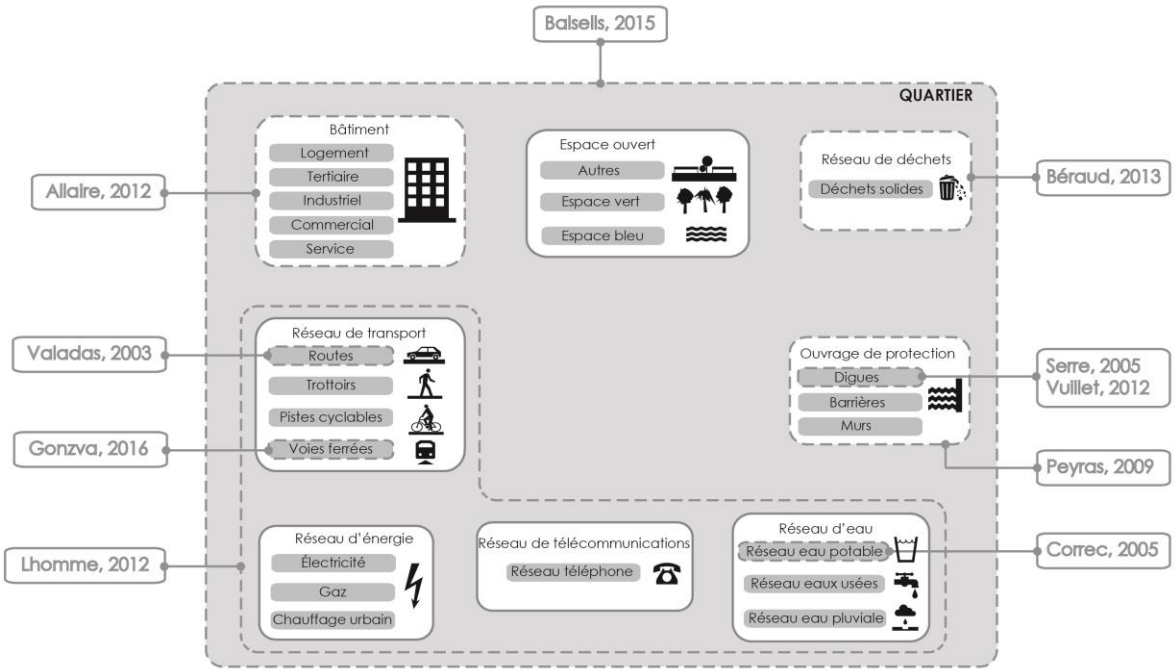

Figure 3. Références d'application de l'Analyse Fonctionnelle en génie urbain (auteur : Gonzva, M., 2014)

Applications de l'Analyse Fonctionnelle aux systèmes étudiés

Le premier système qui fait l'objet d'une Analyse Fonctionnelle est le système quartier. Un quartier est défini comme une « fraction du territoire d'une ville, dotée d'une physionomie propre et caractérisée par des traits distinctifs lui conférant une certaine unité et une individualité » (Merlin et Choay, 2000). Selon son emplacement géographique dans la ville, ses évolutions spatiales et sociales uniques ou encore le profil de sa population, les quartiers peuvent et doivent offrir un nombre spécifique de fonctions urbaines et à des degrés divers. Lorsque des fonctions spécifiques sont représentées dans un quartier, des activités, des flux et par conséquent des dynamiques urbaines peuvent être identifiées. Ce travail de modélisation des systèmes urbains, déjà assez bien couvert à l'échelle de la ville (De Rosnay, 1975 ; Lhomme, 2012), apparaît aussi possible à l'échelle du quartier. En effet, un quartier peut être considéré comme un système ouvert, complexe, lequel est caractérisé par des processus d'échange avec son environnement, et en constante évolution et développement. Dans cette recherche, un quartier est défini comme un système social, économique, physique et technique. Nous mettons en évidence la dimension physique et technique des quartiers et de ses composants ; l'approche se limite donc explicitement à cette double dimension lors de l'analyse d'un quartier.

En se focalisant sur cette dimension et en utilisant une approche systémique, qui consiste à concevoir tout système complexe dans son ensemble afin de comprendre son fonctionnement, il est donc possible d'identifier un système dont les principaux composants incluent : des bâtiments, des réseaux de transport, des réseaux d'énergie, etc. Ainsi, pour améliorer la compréhension du fonctionnement du système *quartier*, nous avons mobilisé l'Analyse Fonctionnelle.

Pour réaliser l'Analyse Fonctionnelle technique d'un quartier, il est nécessaire d'abord de fixer le niveau de granularité spatiale adapté aux besoins de l'étude. Très qualitativement, trois niveaux urbains peuvent être identifiés : un niveau *macro* qui correspond au système urbain étudié, un niveau *méso* qui correspond aux composants du système étudié et enfin un niveau *micro* qui s'intéresse aux sous-composants et aux matériaux des composants du niveau macro. Puisque notre objectif s'attache à la description détaillée d'un quartier et de son fonctionnement dans sa dimension physique/technique, le rang intermédiaire *méso* nous paraît adapté. Nous nous focalisons donc sur les fonctions assurées par chaque composant d'un quartier.

Ensuite, nous procédons à l'analyse structurelle du quartier pour lister les composants du quartier et déterminer leurs interactions avec les autres composants. Les interactions techniques entre les composants et entre les composants et son environnement sont représentées au moyen d'un Bloc-diagramme Fonctionnel (Fig.4). Ce Bloc-diagramme Fonctionnel indique les relations de contact et de flux d'échange en fonctionnement normal entre les composants du quartier eux-mêmes et entre les composants du quartier et son milieu extérieur.

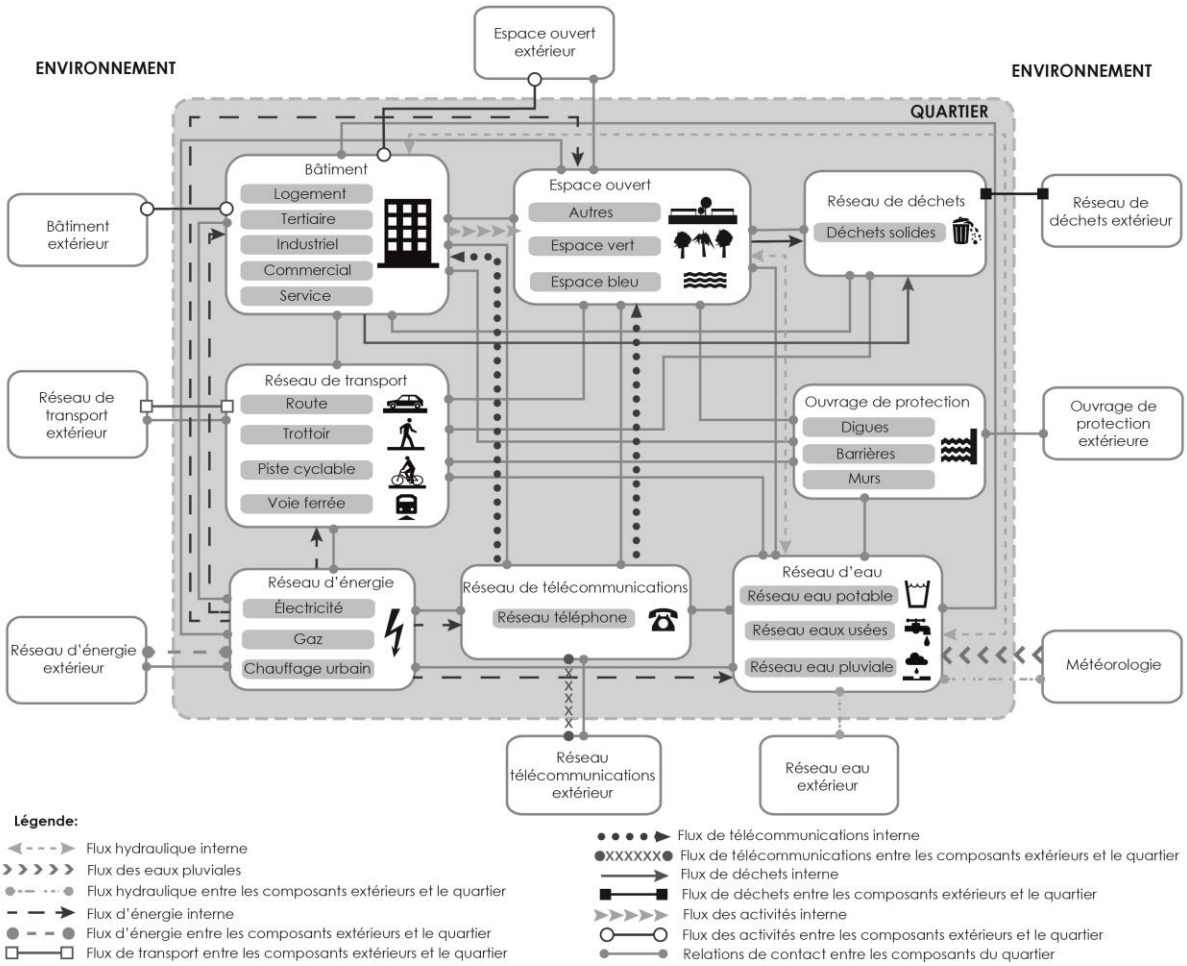

Figure 4. Bloc-diagramme Fonctionnel du système quartier (Balsells *et al.,* 2013b)

L'analyse du Bloc-diagramme Fonctionnel conduit aux fonctions des composants. Selon la source de l'interaction (contact ou flux en fonctionnement normal), on peut distinguer les fonctions *essentielles* et *techniques* des composants d'un quartier. Nous définissons les fonctions *essentielles* comme les fonctions pour lesquelles le composant a été conçu et les fonctions *techniques* comme les solutions pour répondre aux fonctions essentielles. Toutes ces données sont répertoriées dans les Tableaux d'Analyse Fonctionnelle ; dont un exemple est donné dans le Tableau1 pour le réseau de transport.

Numéro	Composant	Classification de la fonction	Fonction
1	Réseau de transport	Fonctions essentielles	• Assurer les flux
		Fonctions techniques	• Résister aux sollicitations mécaniques • Permettre le bon fonctionnement des autres composants du quartier • Assurer la continuité de service

Tableau 1. Extrait du Tableau d'Analyse Fonctionnelle dans le cas du système *quartier*

Le second système urbain qui fait l'objet d'une Analyse Fonctionnelle correspond aux systèmes de transport guidé. Les systèmes de transport guidé urbains concernent (CERTU& CETE de Lyon, 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.

Dans un premier temps, 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. Dans cette optique, les spécifications techniques d'interopérabilité (STI) formulent un découpage du système ferroviaire. C'est ce découpage qui sert de base à la décomposition du système étudié, complétée par d'autres composants considérés comme nécessaires au fonctionnement d'un système de transport guidé. Le système se divise ainsi en huit composants :

- Contrôle-commande et signalisation, ce quipermet de garantir la circulation des trains en toute sécurité ;
- Énergiequi correspond à la fourniture en énergie de traction du matériel roulant ;
- Gare ;
- Infrastructure qui correspond aux équipements fixes relatifs aux voies ;
- Matériel roulant ;
- Poste de commandement centralisé (PCC) qui assure l'exploitation par une gestion en temps réel du système de transport ;
- Site de maintenance des infrastructures (SMI) qui assure la maintenance des équipements fixes relatifs aux voies, à l'énergie et au contrôle-commande et signalisation ;
- Site de maintenance et de remisage (SMR) qui assure la maintenance en atelier du matériel roulant (dépannage, entretien, remplacement) et son remisage en période hors exploitation.

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

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

Dans un second temps, 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, matérielle entre les deux éléments (matériel roulant alimenté par l'énergie, circulant sur l'infrastructure, etc.). Ces relations de contact permettent au système d'assurer le service de transport des usagers à partir des fonctions qu'assure chaque composant. 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 entre eux dans la mesure où la réalisation de ce flux est conditionnée par le bon fonctionnement du premier composant.

Le Bloc-diagramme Fonctionnel des relations de contact et flux de dépendances en situation normale est présenté ci-dessous (Fig.5).

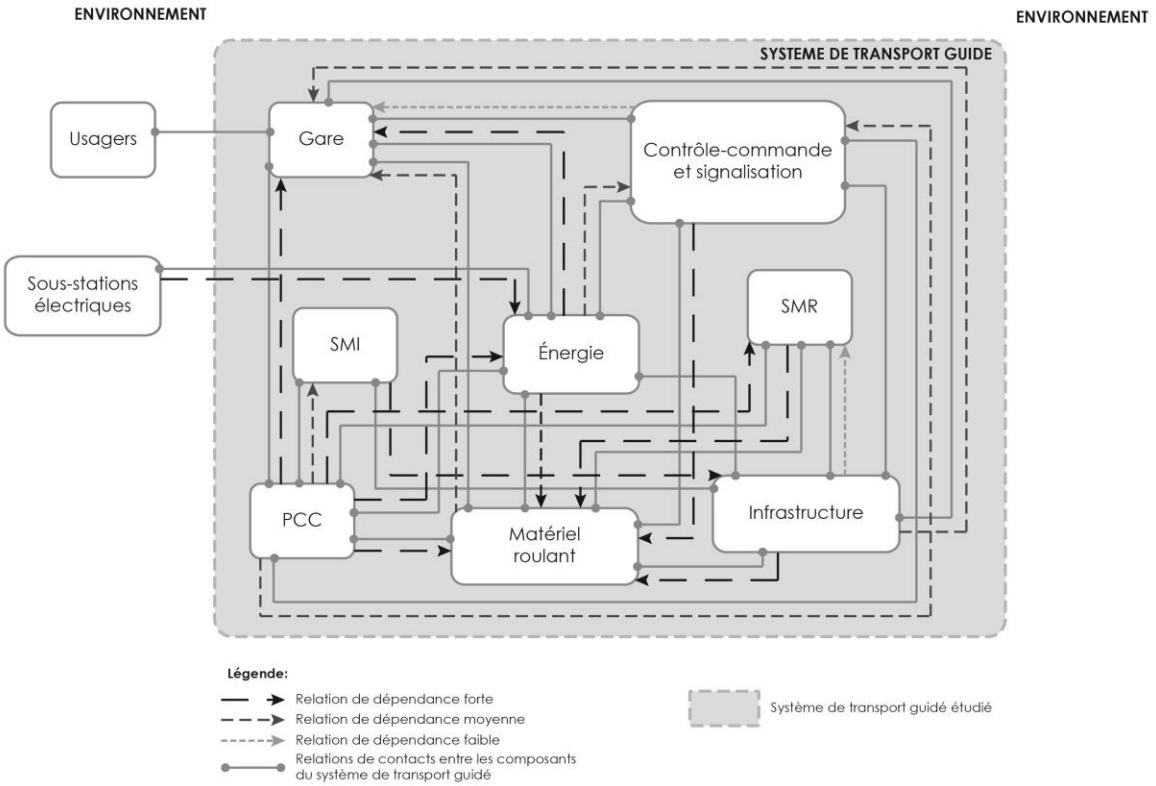

Figure 5. Bloc-diagramme Fonctionnel du système de transport guidé (auteur : Gonzva, M., 2014)

Ce Bloc-diagramme Fonctionnel permet de mettre en évidence un certain nombre de relations de dépendances, faibles, moyennes ou fortes. De plus, de la même façon que dans l'AF du quartier, il est possible de déterminer le Tableau d'Analyse Fonctionnelle du système de transport guidé contenant les fonctions *essentielles* et les fonctions *techniques* de chacun des composants (Tableau 2).

Numéro	Composant	Classification de la fonction	Fonction
1	Énergie	Fonctions essentielles	• Assurer la distribution de l'énergie électrique de traction
		Fonctions techniques	• Résister aux pressions hydromécaniques exercées par la crue • Permettre le bon fonctionnement du matériel roulant • Assurer la continuité de service

Tableau 2. Extrait du Tableau d'Analyse Fonctionnelle dans le cas du système de transport guidé

Imbrication locale des analyses fonctionnelles

À partir de ces analyses fonctionnelles, réalisées à partir de l'étude d'un composant du *quartier*, et du point de vue du système *quartier* dans sa globalité, la question qui se pose est désormais l'imbrication fonctionnelle de ces analyses. En effet, le système de transport guidé est un composant du quartier dans la mesure où, dans les faits, le premier est physiquement inclus dans le second. Or, l'imbrication des analyses fonctionnelles de ces systèmes devrait pouvoir apporter une meilleure compréhension du

fonctionnement général du système *quartier*. En particulier, dans le cas où ce dernier fait face à une inondation, l'imbrication des analyses fonctionnelles semble pouvoir déterminer de façon précise et complète la chaîne de dysfonctions générées.

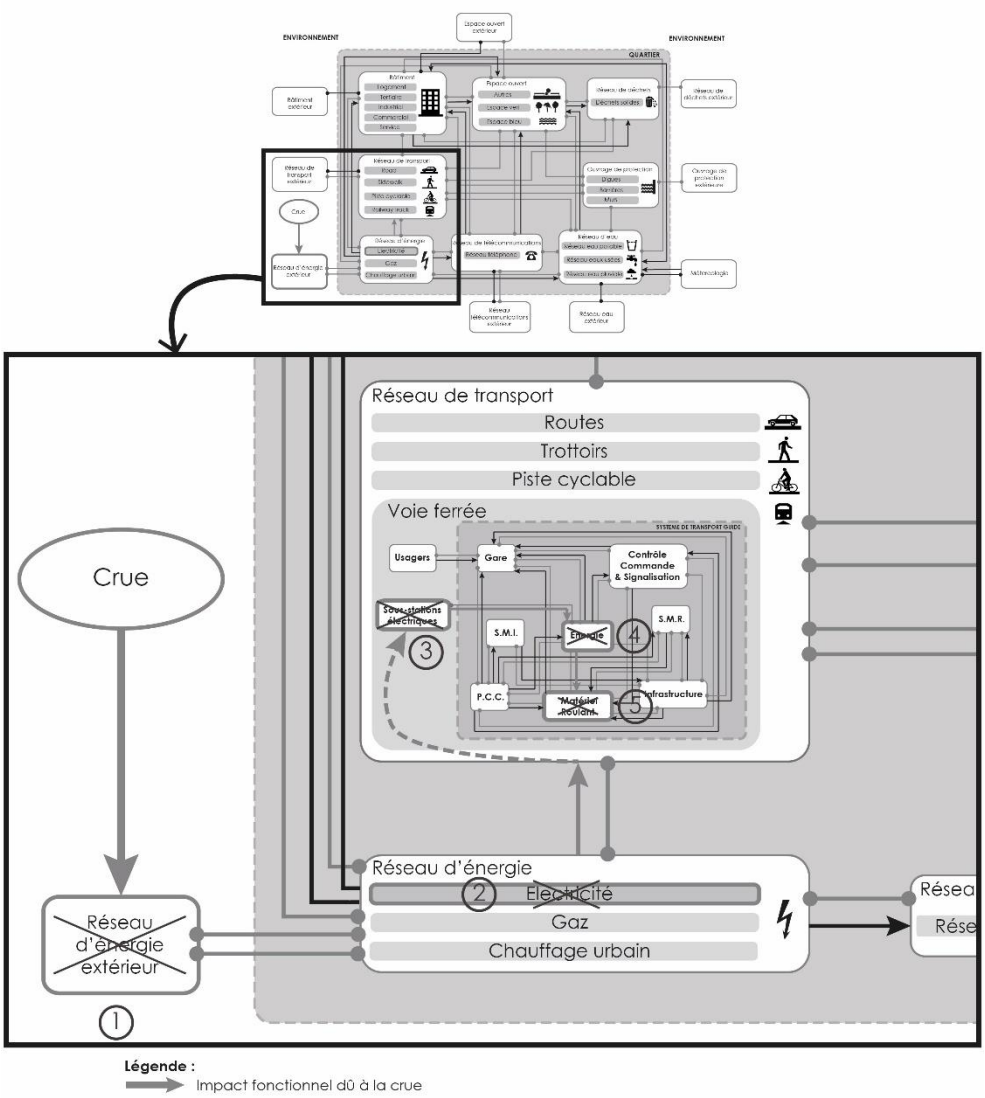

Figure 6. Imbrication des analyses fonctionnelles du quartier et du système de transport guidé (auteur : Balsells, M., Gonzva, M., 2014)

Pour illustrer l'imbrication fonctionnelle, nous prenons l'exemple d'une inondation qui touche (1) le « réseau d'énergie extérieur » du quartier (Fig.6). Alors, ce composant présentant un flux d'échange avec le « réseau d'énergie » du quartier risque de mettre en dysfonctionnement ce dernier. Ce faisant, la partie (2) « électricité » du « réseau d'énergie » risque à son tour de dysfonctionner. Le « flux d'énergie interne » reliant le « réseau d'énergie » du quartier au « réseau de transport » local implique donc une perturbation du réseau de transport du quartier. Or, c'est à cette étape que l'imbrication de l'Analyse Fonctionnelle du système de transport guidé avec celle du quartier est intéressante dans la mesure où elle précise comment se traduit la dysfonction au sein des éléments du composant « réseau de transport ». En effet, l'interruption du service électrique implique une dysfonction (3) des « sous-stations électriques », donc de la partie (4) « Énergie » de traction du système de transport et finalement (5) du « Matériel roulant » qui ne peut alors plus assurer le service de transport d'usagers de gare en gare.
Cette illustration sur un cas relativement simple d'inondation affectant initialement le réseau d'énergie du quartier met donc en évidence la chaîne complète de composants qui dysfonctionnent pour entraîner

l'arrêt du service de transport. Ainsi, l'imbrication des analyses fonctionnelles apporte, d'une part, une meilleure compréhension de la cause exacte du dysfonctionnement du système de transport guidé (le système « imbriqué ») et, d'autre part, une meilleure compréhension des conséquences du dysfonctionnement sur le quartier (le système « imbriquant »).
Finalement, la notion de système imbriqué et de système imbriquant apporte une meilleure compréhension du caractère résilient (ou non) d'un système à partir du caractère résilient (ou non) de ses composants. À partir de l'Analyse Fonctionnelle, il semble tout à fait possible de mettre en évidence les composants intervenant dans les chaînes de dysfonctionnement. Ce faisant, à une échelle locale, l'AF permet donc de cibler les actions ou les stratégies d'amélioration de la résilience sur les composants les plus sensibles.

Quelle imbrication des analyses fonctionnelles à une échelle plus large ?
Comme nous l'avons montré précédemment, l'échelle urbaine locale, représentée par le quartier, apparaît opérationnelle pour mobiliser l'imbrication des analyses fonctionnelles dans l'étude de la résilience face au risque inondation.
En revanche, il est intéressant de s'interroger jusqu'à quelle échelle urbaine cette imbrication peut être mise en œuvre. À des échelles plus larges, typiquement à l'échelle de plusieurs quartiers connectés entre eux par des systèmes de transport guidé, la complexité du système semble devenir limitante pour l'imbrication fonctionnelle. En effet, à cette échelle, l'étude ne porte plus sur un système (le quartier), mais plutôt sur un système de systèmes (plusieurs quartiers) complexes. Dans ce cas, les interactions entre la multitude de composants étudiés sont teintées de nombreuses interdépendances : interactions multiples, redondances fonctionnelles (notamment au niveau des réseaux d'énergie). Par exemple, dans notre illustration précédente (Fig.6), le fait que la crue atteigne (1) le « réseau d'énergie extérieur » peut ne pas conduire nécessairement à la dysfonction (2) du « réseau d'énergie » électrique dans la mesure où, à l'échelle de plusieurs quartiers, ce réseau est très certainement redondant. De plus, l'imbrication des systèmes les uns dans les autres se complexifie, car elle peut atteindre un grand nombre de niveaux d'imbrication. Ainsi, l'Analyse Fonctionnelle ne suffit plus à elle seule pour tenir compte de ces interdépendances. La mise en œuvre subséquente d'autres méthodes issues de la Sûreté de Fonctionnement peut alors être nécessaire afin d'intégrer cette complexité. Cette réflexion rejoint donc une des hypothèses formulées par Lhomme (2012) selon laquelle il est possible de modéliser des chaînes de défaillances successives de systèmes composés de systèmes complexes par l'utilisation d'une combinaison de méthodes issues de la Sûreté de Fonctionnement telles que l'analyse des modes de défaillance et de leurs effets.

Conclusion

Cette communication porte sur l'étude de la résilience face au risque inondation des quartiers et des systèmes de transport guidé. Le caractère résilient de ces deux systèmes urbains est intéressant à étudier dans la mesure où ils sont imbriqués physiquement tout autant que fonctionnellement. Cette imbrication fonctionnelle est ici étudiée à l'aide de la méthode de l'Analyse Fonctionnelle issue de la Sûreté de Fonctionnement. En appliquant cette méthode successivement à nos deux systèmes, nous démontrons l'imbrication fonctionnelle qui existe dans leurs interactions, en situation normale. Or, cette modélisation fonctionnelle donne l'opportunité de déterminer leur fonctionnement en situation de crise lorsqu'une inondation survient. Plusieurs conclusions peuvent être tirées. Premièrement, il est primordial de fixer l'échelle d'étude pour l'Analyse Fonctionnelle qui doit être nécessairement locale. À une échelle urbaine locale, typiquement celle du quartier, les échanges entre les composants peuvent être déterminés relativement facilement ce qui permet de mettre en évidence les chaînes de dysfonctionnements de ces composants urbains, en situation d'aléa. Or, à une échelle plus large, typiquement celle de plusieurs quartiers, la quantité d'interactions en chaque système, entre les systèmes et avec leur environnement

respectif complexifie considérablement l'étude. Il apparaît donc que la mobilisation de l'AF dans la compréhension des conséquences d'un risque naturel ne s'avère pas efficace au-delà d'une échelle urbaine locale. Deuxièmement, à l'échelle locale et en situation de risque d'inondation, la modélisation fonctionnelle permet, d'une part, d'avoir une meilleure compréhension de la cause exacte du dysfonctionnement du système de transport guidé (le système « imbriqué ») et, d'autre part, une meilleure compréhension des conséquences du dysfonctionnement sur le quartier (le système « imbriquant »). Il semble aussi possible de déterminer d'autres couples système imbriqué–système imbriquant tels que réseau de distribution d'eau – quartier ou encore service de gestion des déchets – quartier dont l'imbrication des analyses fonctionnelles serait également porteuse de résultats. Troisièmement, l'exemple présenté dans cette communication illustre la cohérence qui existe parmi les nombreuses analyses fonctionnelles de systèmes urbains réalisés (indépendamment) depuis ces dernières années. Ces analyses s'imbriquent et se combinent pour offrir conjointement de nouveaux résultats.

Néanmoins, une limite importante apparaît dans cette approche de la résilience à l'aide de l'imbrication d'analyses fonctionnelles : la question de la granularité d'étude. Cette granularité ne semble, en effet, pas pouvoir s'étendre à une échelle urbaine autre que locale : le quartier. Cette limite est issue de l'approche systémique elle-même qui, au-delà de l'échelle urbaine locale, ne considère plus des systèmes complexes, mais des systèmes de systèmes complexes. Or, dans ce cas, l'Analyse Fonctionnelle, à elle seule du moins, ne permet pas de modéliser des scénarios de défaillances en situation d'aléa. Une seconde limite à l'imbrication peut être mentionnée : l'aspect qualitatif de ce travail. En effet, ces imbrications mettent en exergue les composants touchés par les effets domino générés par une inondation, sans quantifier la probabilité de réalisation de ces chaînes de défaillances successives. Une perspective au travail présentée dans cette communication pourrait donc être celle de mobiliser une combinaison de méthodes issues de la Sûreté de Fonctionnement, par exemple une analyse des modes de défaillance, de leurs effets et de leur criticité. Quoi qu'il en soit, l'AF apparaît comme un outil pertinent pour analyser la résilience de systèmes urbains face au risque d'inondation, en mettant en évidence les composants les plus vulnérables à cet aléa et les plus critiques au fonctionnement global du système. Ainsi, ce travail apporte dans une certaine mesure une aide pour la définition d'actions ou de stratégies d'amélioration de la résilience à des échelles urbaines locales en ciblant les composants.

Références

Balsells Mireia, Barroca Bruno, Diab Youssef, Becue Vincent et Serre Damien, « Améliorer la résilience urbaine face au risque d'inondation : proposition d'une méthodologie », *Colloque futurs urbains, enjeux interdisciplinaires émergents pour comprendre, projeter et fabriquer la ville de demain*, Université de Paris-Est Marne-La-Vallée, 16-18 janvier, 2013a.

Balsells Mireia, Barroca Bruno, Diab Youssef, Becue Vincent et Serre Damien, « Urban design contribution to neighbourhood flood resilience: proposition of a model analysis », *International Conference on Flood Resilience: Experiences in Asia and Europe*, 5-7 September, Exeter, United Kingdom, 2013b.

Barroca Bruno, Serre Damien et Diab Youssef, « Le concept de résilience à l'épreuve du génie urbain », *VertigO - la revue électronique en sciences de l'environnement* [En ligne], vol. 12, n°2, 2012.

Barroca Bruno, Di Nardo Maryline et Mboumoua Irène, « De la vulnérabilité à la résilience : mutation ou bouleversement ? ». *EchoGéo*, n°24, 2013.

Beraud, Hélène, *Initier la résilience du service de gestion des déchets aux catastrophes naturelles – Le cas des territoires urbains et de l'inondation*, Thèse de doctorat, Université Paris-Est, 2013.

CERTU & CETE de Lyon, *Panorama des villes à transports publics guidés*, 2007.

De Rosnay, Joël, *Le macroscope. Vers une vision globale*, Paris, Seuil, 1975.

Folke Carl, Carpenter Steve, Elmqvist Thomas, Gunderson Lance, Crawford S. Holling et Walker Brian, « Resilience and sustainable development: building adaptive capacity in a world of transformations ». *Ambio: A Journal of the Human Environment*, vol. 31, n°5, . 437-440, 2002.

Gunderson Lance, Crawford S. Holling, *Panarchy: Understanding Transformations in Human and Natural Systems*, Island Press, 2002.

Lhomme, Serge, *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, 2012.

Lhomme Serge, Laganier Richard, Diab Youssef et Serre Damien, « La résilience de la ville de Dublin aux inondations : de la théorie à la pratique ». *Cybergeo : European Journal of Geography*, 2013.

Merlin Pierre et Choay Françoise, *Dictionnaire de l'urbanisme et de l'aménagement*, Presses universitaires de France, 2000.

Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie (MEDDE), *Première évaluation nationale des risques d'inondation, Principaux résultats – EPRI 2011*, 2012.

Noyes Daniel et Peres François, « Analyse des systèmes – Sûreté de Fonctionnement », *Techniques de l'ingénieur,* 2007.

Oslakovic Stipanovic Irina, ter Maat Herbert, Hartmann Andreas et Dewulf Geert « Risk Assessment Of Climate Change Impacts On Railway Infrastructure », dans Carrillo, Patricia et Chinowsky Paul (dir.), *Engineering Project Organization Conference*, Devil's Thumb Ranch, Colorado, 2013.

Quenault, Béatrice, « Retour critique sur la mobilisation du concept de résilience en lien avec l'adaptation des systèmes urbains au changement climatique ». *EchoGéo*, n°24, 2013.

Serre, Damien, *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 Paris-Est Marne-la-Vallée, 2005.

Serre, Damien, *La ville résiliente aux inondations - Méthodes et outils d'évaluation*. Mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches, Université Paris-Est Marne-la-Vallée, 2011.

Serre, Damien, Laurent Peyras, Corinne Curt, Daniel Boissier et Youssef Diab, « Assessment of civil engineering hydraulic infrastructures », *Canadian Geotechnical Journal*, n°44, 2007, 1298-1313.

Serre, Damien, Serge Lhomme, Laurent Peyras, Richard Laganier et Youssef Diab, « Analyzing the civil engineering infrastructures to prioritize urban flood resilient actions ». *7th International Conference on Water Sensitive Urban Design*, 21-23 février, Melbourne, Australia, 2012.

Toubin, Marie, Serge, Lhomme, Youssef Diab, Damien Serre et Richard Laganier, « La Résilience urbaine : un nouveau concept opérationnel vecteur de durabilité urbaine ? », *Développement durable et territoires*, vol. 3, n°1, 2012.

Toubin, Marie, Richard Laganier, Youssef Diab et Damien Serre , « Improving the conditions for urban resilience through collaborative learning of Parisian urban services », *Journal of urban planning and development*, vol. 141, n° 4, 2014.

Villemeur, André, *Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels. Fiabilité, facteurs humains, informatisation*, Eyrolles, 1998.

Vuillet, Marc, *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, 2012.

Zwingelstein, Gilles, *La maintenance basée sur la fiabilité*, Hermès, 1996.