



Numéro spécial

L'interdépendance des réseaux comme clefs d'analyse et d'amélioration de la résilience urbaine face aux extrêmes hydrologiques

The interdependence of networks as key to analysing and improving urban resilience to hydrological extremes

Richard LAGANIER & Damien SERRE

Abstract : It is fundamental to analyze the dysfunctions and the effects of the urban technical network during a disaster to set up a resilience strategy. It is therefore necessary to adapt the functioning of urban networks to potential disruptions, to rebuild urban networks following a major disruption by taking into account lessons learned from past crises, or to define crisis management modalities by integrating the very complexity of the city itself. As a result, technical networks appear to be an important lever to support such strategies, provided the conceptual framework of the analysis is clarified and operational methods and tools are developed for risk management actors.

Key-words : Urban resilience, technical network, adaptation, rebuild

Résumé : Analyser les dysfonctionnements et les effets des réseaux techniques urbains durant une catastrophe est fondamental pour mettre en place une stratégie de résilience d'un territoire. Dès lors, il est nécessaire d'adapter le fonctionnement des réseaux urbains aux perturbations potentielles, de reconstruire les réseaux urbains suite à une perturbation majeure en prenant en considération les leçons tirées des crises passées ou de définir des modalités de gestion de crise en intégrant la complexité même de la ville. Les réseaux techniques apparaissent ainsi comme un levier d'action important pour appuyer de telles stratégies, à condition de préciser le cadre conceptuel de l'analyse, de développer des méthodes et des outils opérationnels pour les acteurs de la gestion des risques.

Mots-clefs : Résilience urbaine, réseaux techniques, adaptation, reconstruction

Les catastrophes naturelles et technologiques qui touchent avec des occurrences plus ou moins importantes les systèmes urbains montrent l'intérêt de mettre en œuvre une politique de résilience qui tienne compte de la complexité des territoires touchés. Dans cette perspective, le concept de résilience interroge la façon de penser le système urbain et ses perturbations. Il peut être défini comme « la capacité d'un système urbain à absorber une perturbation et à retrouver ses fonctions à la suite de cette perturbation ». A cet égard, la ville constitue un ensemble de systèmes en interactions dans lequel les réseaux techniques jouent un rôle majeur dans la propagation des risques en milieu urbain et dans l'aggravation des effets. Analyser les dysfonctionnements des systèmes sociotechniques durant une catastrophe et leurs effets dans la diffusion du risque est fondamental pour mettre en place une stratégie de résilience du territoire. Dès lors, l'opérationnalité du concept passerait par la nécessité d'adapter le fonctionnement des réseaux urbains aux perturbations potentielles, à reconstruire les réseaux urbains suite à une perturbation majeure en prenant en considération les leçons tirées des crises passées ou à définir des modalités de gestion de crise en intégrant la complexité même de la ville. Les réseaux techniques apparaissent ainsi comme un levier d'action important pour appuyer de telles stratégies, à condition de préciser le cadre conceptuel de l'analyse, de développer des méthodes et des outils opérationnels pour les acteurs de la gestion des risques. En partant d'une analyse théorique sur la nature des interdépendances des services urbains, il s'agira de comprendre dans quelle mesure ces interdépendances sont prises en compte dans les développements opérationnels (aménagement, gestion de crises).

Richard LAGANIER
Professeur de géographie
UMR PRODIG, Université Paris Diderot – Sorbonne Paris Cité
richard.laganier@univ-paris-diderot.fr
Damien SERRE
Professeur de Géographie
UMR 7300 ESPACE – Université d'Avignon
damien.serre@univ-avignon.fr

En effet, les services urbains (transports, énergie, eau, déchets, télécommunications) ont montré leur importance dans la propagation des perturbations et dans le maintien et le rétablissement des fonctions urbaines pendant et après une crise hydrologique. De plus, le fonctionnement local des équipements des services urbains détermine le niveau de fonctionnement d'un service irriguant un territoire bien plus large et dépassant les périmètres de compétence des collectivités concernées et des espaces soumis aux aléas naturels. Une expérience de démarche collaborative conduite avec les gestionnaires des services urbains de l'agglomération parisienne sera présentée. Elle illustrera en particulier une des réponses possibles au besoin de communication et de coordination exprimé par ces acteurs pour accompagner l'émergence de stratégies intégrées mises en place par chaque service dans le cadre de leur préparation au risque de crue centennale.

Les interdépendances des services urbains, facteurs de propagation des crises

La ville concentre les activités, les biens et les personnes. Lorsqu'un événement survient (séisme, cyclone, inondation, accident industriel ou une combinaison de plusieurs aléas), le fonctionnement de la ville est généralement complètement perturbé, et, selon la gravité du phénomène, les effets de la crise peuvent se faire ressentir à une échelle beaucoup plus large. Ainsi, évaluer le niveau de résilience d'une ville face aux risques est une étape essentielle pour ensuite insuffler des politiques de résilience (SERRE *et al.*, 2013a).

Plusieurs facteurs compliquent aujourd'hui la gestion des risques en ville. Depuis 2007, la moitié de la population mondiale vit en milieu urbain. Il est attendu un doublement de la population urbaine dans les trente prochaines années. Ce taux de croissance équivaut à la construction d'une nouvelle ville d'un million d'habitants par semaine (www.floodresiliencgroup.org). Cette urbanisation rapide soulève des enjeux majeurs liés à la maîtrise des risques en ville. Elle s'accompagne aussi généralement d'un étalement urbain important. Cet étalement urbain est à lui seul porteur de risques, puisque d'un côté, cela aboutit à construire la ville dans des zones où les aléas peuvent être plus forts ; d'un autre côté, les réseaux techniques urbains ne sont plus adaptés et sous dimensionnés (GOURBESVILLE, 2008). De plus, cette urbanisation rapide est accompagnée par un changement climatique annoncé, dont les effets se font déjà ressentir. Le changement climatique engendre un certain nombre d'incertitudes selon les scénarios d'élévation de la température proposés par les experts de l'International Panel on Climate Change (IPCC). Mais, quel que soit le scénario retenu, des conséquences sur la fréquence et la sévérité des précipitations sont attendues tout comme des épisodes de canicule et de sécheresse. C'est sur base de ces données incertaines, incomplètes et imprécises que sont produits les modèles de prévision des aléas.

Dans ce contexte d'incertitudes, notamment à cause du changement climatique, il devient donc nécessaire de développer de nouvelles stratégies de gestion des risques pour anticiper des scénarios que les modèles probabilistes jugent extrêmes ou rares (ZEVENBERGEN & CASHMAN, 2011). Aussi, le changement climatique, combiné à la concentration des biens et des personnes en milieu urbain, laisse présager des événements dévastateurs pour les années à venir. Par exemple, le risque d'inondation devrait augmenter de manière significative : le coût économique du risque d'inondation devrait atteindre dans le monde la valeur de 100 milliards d'euros par an à la fin du siècle. Environ 75 % de ces dommages seraient recensés en milieu urbain.

Il résulte de ces phénomènes sociaux (étalement urbain, urbanisation dans des zones dangereuses et changement climatique avec pour origine la société industrielle) une vulnérabilité accrue non seulement aux événements extrêmes, mais aussi à des événements considérés comme courants par le passé. En conséquence, de nouvelles stratégies de gestion des risques en milieu urbain doivent être envisagées. Ces stratégies doivent intégrer cette multitude de facteurs aggravant comme le développement urbain et le changement climatique. Cette gestion intégrée doit intervenir à plusieurs échelles spatiales et temporelles. L'enjeu est bien d'augmenter la résilience de la ville face aux risques, mais aussi de concevoir les nouveaux quartiers urbains ou les nouvelles villes en considérant tous ces enjeux : certains urbanistes considèrent que les aléas, trop souvent vécus comme un événement négatif, doivent être considérés comme une opportunité urbaine. Il s'agit ici de concevoir la ville adaptée aux risques (BALSELLS *et al.*, 2014).

La propagation du risque

Les réseaux techniques en ville...

Le développement et la dépendance des villes aux réseaux techniques urbains impliquent une certaine forme d'urbanisation, qualifiée de « réticulaire » (DUPUY, 1991). Ainsi, l'organisation des réseaux n'est pas seulement celle d'un système technique. Elle implique aussi l'organisation d'un espace selon ses principes de fonctionnement. Cette forme d'urbanisation est à l'origine de la diffusion des risques en ville. En effet, le développement des réseaux techniques s'intensifie depuis le milieu du XIX^{ème} siècle en particulier dans le domaine de la gestion des eaux. Les réseaux deviennent rapidement des axes de développement et de connectivité

de plus en plus complexes sous forme de réseaux maillés interdépendants. Au XX^{ème} siècle, les transports en commun, les réseaux de distribution d'électricité, de gaz, de téléphonie, de fibre optique, de chauffage urbain, de gestion des déchets, etc., viennent complexifier la structure de ce maillage ainsi que les relations d'interdépendance.

... face aux défis du XXI^{ème} siècle.

Aujourd'hui, les réseaux techniques urbains sont très sensibles. Le fonctionnement de la ville dépend en grande partie du fonctionnement des réseaux. La moindre défaillance peut avoir des conséquences en cascade sur le fonctionnement urbain (ROBERT & MORABITO, 2009). De la même manière, à l'échelle planétaire, la défaillance des réseaux techniques d'une ville, peut avoir des conséquences partout dans le monde. Deux exemples illustrent cette sensibilité :

- la chute des tours du World Trade Center à New York en 2001 provoque une panne du web en Afrique du Sud, en Allemagne, en Italie et en Roumanie ;
- 57 millions d'Italiens se retrouvent sans électricité suite à un blackout du réseau électrique le 28 septembre 2003, l'opérateur peine à remettre le système en route à cause de la défaillance du réseau de télécommunications dépendant du réseau électrique.

Les exemples sont nombreux dans le monde. Ce type de défaillance des réseaux techniques, - dits vitaux, essentiels ou critiques (ROBERT & MORABITO, 2009) - et leurs effets, montrent la sensibilité des réseaux à tous types d'aléas, de l'erreur humaine, aux attentats, jusqu'aux aléas technologiques et naturels.

Les réseaux techniques urbains doivent être rendus plus sûrs au cours du XXI^{ème} siècle pour éviter ce type de défaillances. Mais, du fait de l'enchevêtrement des réseaux, de leur extension tentaculaire et d'une extrême concentration de certains nœuds, augmenter la résilience des réseaux est très difficile, d'autant plus que l'interconnexion et l'interdépendance de l'ensemble de ces réseaux ont abouti à la création d'un macro-réseau, reliant le monde entier à partir d'une extrême concentration en ville.

Les réseaux techniques : des infrastructures essentielles

Le changement climatique devrait aboutir à des situations de risques plus extrêmes et plus courantes dans les années à venir compte-tenu de l'évolution de la vulnérabilité des espaces urbanisés et de l'intensité des aléas. Un certain nombre de dysfonctionnements urbains apparaîtront aux niveaux physique (endommagement), socio-économique, organisationnel, et fonctionnel (capacité de la ville à fonctionner en mode dégradé et à se reconstruire en s'adaptant).

La relation entre les réseaux techniques urbains et la question du risque d'inondation date de l'Antiquité. Depuis cette période, l'objectif recherché consistait à collecter l'eau urbaine et à l'évacuer le plus rapidement possible en dehors de la ville. Aujourd'hui, la croissance rapide des villes n'a pas permis la construction de nouveaux réseaux performants, et les anciens réseaux sont sous-dimensionnés pour assurer un drainage urbain efficace. Ces problèmes techniques, couplés à des problèmes financiers ne permettant pas la remise à niveau de ces réseaux. Par voie de conséquence, il convient de développer des technologies pour mieux connaître les réseaux et préparer la ville à l'inondation (GOURBESVILLE, 2008).

L'analyse des retours d'expériences de villes ayant subi des dommages montrent à la fois une dépendance du fonctionnement urbain à ses réseaux techniques et une diffusion des effets des aléas via ces mêmes réseaux. Il ressort de diverses études sur les réseaux techniques urbains que ces réseaux sont à la fois vulnérables face aux risques et à la fois propagateurs de cette vulnérabilité à cause de leurs interdépendances et de leurs extensions.

L'analyse du comportement des réseaux techniques urbains renvoie vers deux notions importantes et liées.

- La notion d'infrastructure critique (essentielle, vitale) : une infrastructure peut être définie comme un ensemble d'installations et de services nécessaires au fonctionnement de la ville (ASCE, 2009). Ces infrastructures sont jugées critiques si leur dysfonctionnement menace la sécurité, l'économie, le mode de vie et la santé publique d'une ville, d'une région voire même d'un état. Ces infrastructures critiques ont la spécificité de dépasser les frontières géographiques, politiques, culturelles et organisationnelles (BOIN & McCONNELL, 2007).
- La notion d'interdépendance des réseaux : la plupart de ces infrastructures critiques interagissent. Or, ces interactions sont souvent complexes et méconnues, car elles dépassent les limites du système en question. L'analyse des interdépendances requiert de changer d'échelle pour analyser les composants d'un système (échelle fine), puis les relations entre les systèmes (échelle plus large).

Dans le cadre de l'analyse des infrastructures critiques interdépendantes, on peut distinguer deux types d'interactions :

- les interactions au sein d'une et une seule infrastructure critique (le réseau d'énergie, le réseau d'assainissement ou le réseau routier) ;

- les interactions entre les infrastructures critiques (McNALLY & LEE, 2007), ce qui aboutit à l'analyse du réseau de réseaux (le macro-réseau).

Ainsi, l'infrastructure critique est d'abord analysée comme un système à part entière, puis, à une échelle plus large comme un système d'infrastructures critiques (macro-réseau). À titre d'exemple, dans le cas d'une inondation en milieu urbain, des infrastructures critiques interdépendantes peuvent entraîner le scénario suivant :

- de fortes pluies sur un milieu physique très urbanisé provoquent une inondation par surcharge des réseaux d'eau pluviale ;
- les réseaux étant interdépendants, les réseaux de transport seront alors perturbés par immersion de leurs voies ;
- cette immersion perturbera alors la population dans ses déplacements tout comme l'activité économique ;
- de même, les voies, en se comportant comme le lit d'une rivière, permettront aux eaux d'atteindre les habitations et l'ensemble des composants urbains comme les infrastructures publiques qui assurent certaines fonctions urbaines.

En vue de l'amélioration de la résilience des villes, les réseaux techniques sont donc identifiés comme points d'entrée des défaillances (SERRE *et al.*, 2014). Ils constituent les systèmes sur lesquels se focaliseront les mesures techniques et de gestion.

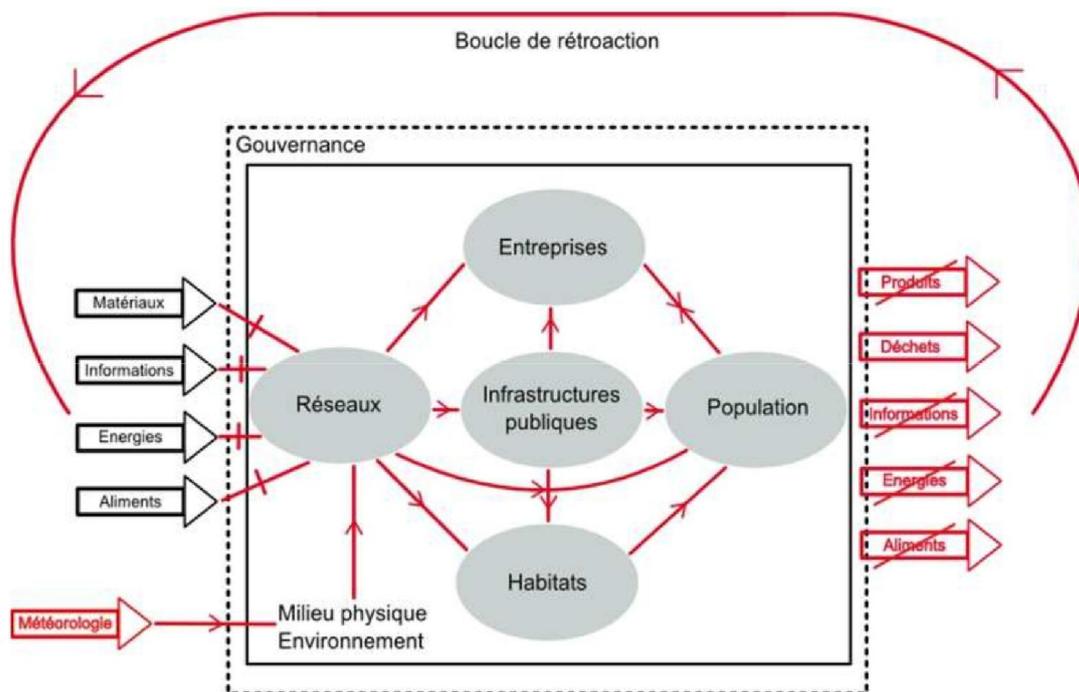


Figure 1 : Les réseaux techniques et la propagation du risque d'inondation dans la ville.

Du fait de leur importance pour le bon fonctionnement des sociétés, et en particulier des sociétés urbanisées, les infrastructures critiques ont toujours fait l'objet d'une attention particulière. Paradoxalement, cette attention singulière a contribué à nourrir une certaine mythologie autour de leur fiabilité. Or, dans le cas des inondations, ces infrastructures se révèlent particulièrement vulnérables (rupture de digues, routes coupées, réseau électrique en panne...). En France, deux études récentes concernant les réseaux techniques ont ainsi recensé un ensemble de facteurs de vulnérabilité : une étude spécifique a ainsi été menée sur la Loire moyenne par l'établissement public territorial du bassin de la Loire en 2006 ; une autre plus générale par le CERTU en 2007. Au Royaume-Uni, à la suite des inondations de 2007, l'agence environnementale nationale a réalisé un retour d'expérience qui a souligné l'exposition importante aux inondations de certaines infrastructures critiques. En effet, les réseaux se comportent à la fois comme des propagateurs de la défaillance de par leur extension géographique et leurs interdépendances, et sont en même temps essentiels à la reconstruction (FELTS, 2005). Les réseaux sont ainsi le système nerveux de la ville dans lequel la moindre défaillance peut entraîner des conséquences importantes sur l'ensemble du système urbain.

Construire des stratégies de résilience et d'adaptations

Pour construire une ville résiliente, il ne suffit donc pas de construire des bâtiments résilients. Il semble avant tout nécessaire de rendre les réseaux techniques résilients car ils propagent les risques en ville par des dysfonctionnements en chaîne. L'approche proposée ici est porteuse de méthodes et d'outils d'aide à la décision concernant les stratégies possibles d'amélioration de la résilience des réseaux.

Les infrastructures critiques en réseaux doivent être considérées comme un levier important pour l'amélioration des conditions de résilience urbaine face aux divers aléas (naturels, technologiques et humains) et face aux conséquences du changement climatique. L'évaluation de leur résilience peut permettre d'orienter les réponses à mettre en place afin de diminuer les effets des aléas en ville (améliorations des réseaux, recommandations d'évacuation, priorisation des interventions, etc.). Il s'agit donc d'évaluer la capacité de ces réseaux à fonctionner en mode dégradé, c'est-à-dire pendant l'aléa, et leur capacité à être remis en service, pour améliorer l'efficacité de la ville à récupérer ses fonctions dépendantes de ses réseaux. Cette évaluation permet notamment d'identifier les dysfonctionnements possibles des réseaux techniques et ainsi la diffusion des effets des risques en milieu urbain.

Quelles capacités pour planifier la résilience des réseaux techniques ?

Notre approche est systémique plutôt qu'analytique. A ce titre, trois capacités sont primordiales pour étudier et planifier la résilience des réseaux techniques et donc de la ville (Fig.2) :

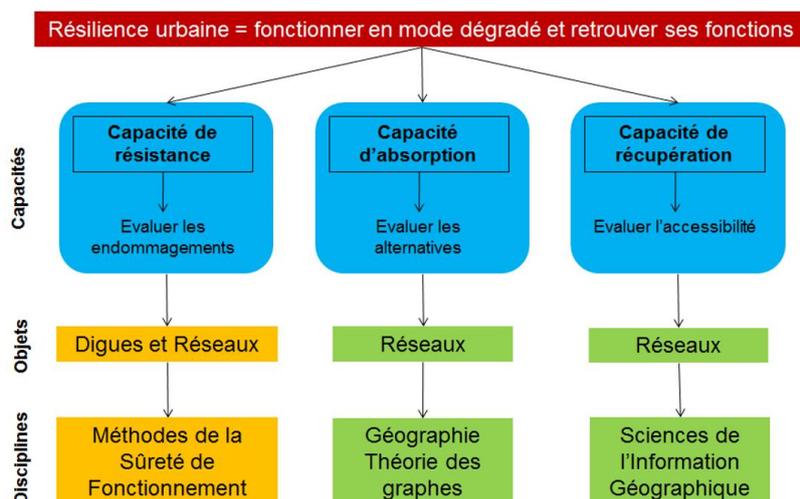


Figure 2 : Les capacités à étudier pour la résilience des réseaux et des dispositifs de protection.

La capacité de résistance face à la perturbation

Il est question ici de déterminer l'endommagement matériel du réseau (et/ou des digues en cas d'inondation) suite à l'aléa. Ainsi, plus un système technique sera endommagé, plus il y aura une probabilité forte de dysfonctionnement du système dans son ensemble et plus il sera difficile de le remettre en service. Pour cela, l'utilisation de méthodes issues de la Sûreté de Fonctionnement permet de déterminer l'endommagement du système et de tenir compte des interdépendances entre les différents réseaux produisant des effets dominos.

La capacité d'absorption face à la perturbation

Il s'agit ici des alternatives pouvant être offertes par le réseau suite à la défaillance d'un ou de plusieurs de ces composants. Autrement dit, l'enjeu est d'étudier la configuration du réseau afin de caractériser sa redondance. Ce sont ces alternatives qui permettent la continuité du service et permettent le fonctionnement du réseau en mode dégradé. Les méthodes issues de la théorie des graphes seront utilisées ici.

La capacité de récupération

La récupération est une capacité essentielle pour la résilience d'un système. Pour un réseau cette récupération peut tout simplement être le temps nécessaire à la remise en service de l'un de ses composants endommagés afin de retrouver un service normal. Ici, les aspects purement techniques sont conjugués à des aspects plus organisationnels. Néanmoins, au niveau des cas étudiés les aspects analysés concernent l'accessibilité des services qui permettent la remise en état du réseau et les composants qui peuvent être potentiellement endommagés. L'objectif est d'utiliser des éléments d'analyse spatiale plutôt que des éléments organisationnels qui nécessitent beaucoup d'informations : les Sciences de l'Information Géographiques apportent des réponses.

Pourquoi évaluer la résilience selon ces trois capacités ?

Cette proposition de cadre conceptuel de l'évaluation de la résilience urbaine présente l'avantage de s'appuyer sur un modèle de ville vu comme un système et s'appuie sur le concept même de résilience tel qu'il est défini dans d'autres disciplines :

- Le modèle systémique urbain de diffusion du risque en ville par les infrastructures de protection et les réseaux techniques ;
- Le concept de résilience et notamment ses principales caractéristiques telles que la redondance (capacité d'absorption du risque) et le rebond (capacité de récupération).

A ces capacités classiques nous rajoutons la capacité de résistance des infrastructures, capacité essentielle liée plutôt à la performance et à la sécurité des ouvrages. Cette capacité est intégrée dans l'évaluation de la résilience car elle conditionne largement la capacité des réseaux à fonctionner en mode dégradé, puis la remise en service de ces infrastructures.

Ce modèle correspond à la définition de la résilience urbaine retenue ici : La résilience caractérise « la capacité d'un système à absorber une perturbation et à récupérer ses fonctions à la suite de cette perturbation ». La résilience urbaine revêt ainsi deux dimensions :

- La capacité de la ville à fonctionner alors que certains des composants du système urbain sont perturbés ;
- La capacité de la ville à se reconstruire (retrouver ses fonctions ou les adapter) à la suite de cette perturbation.

Comment rendre opérationnelle la stratégie de résilience du territoire ?

Des outils pour simuler et adapter

Pour établir le diagnostic d'un ouvrage de génie civil, tel qu'un réseau, évaluer son état et sa performance, ou encore analyser les risques (évaluer sa sûreté de fonctionnement), deux familles d'approches sont possibles (PEYRAS, 2009 ; ZWINGELSTEIN, 1995).

Les méthodes internes reposent sur la connaissance approfondie du système étudié (un ensemble de composants interconnectés dans l'industrie, un ouvrage de génie civil). À partir de modélisations, il est alors possible d'analyser les mécanismes de dégradation et de rupture, de prévoir le comportement futur. Selon le type de modèle décrivant le système, on distingue deux types de modélisation :

- la modélisation physique : repose sur la représentation physique des processus continus ou discrets de dégradation du système, en prenant en compte les équations régissant les phénomènes internes ; elle implique une connaissance approfondie du système et sa représentation sous la forme de modèles physiques et mathématiques, appuyés par la simulation numérique ;
- la modélisation fonctionnelle : les systèmes sont étudiés sous l'angle des fonctions qu'ils doivent remplir et pour lesquelles ils sont conçus ; elle 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.

Les méthodes externes s'appliquent dans des contextes où la modélisation des mécanismes (physiques ou fonctionnels) n'est techniquement pas possible ou pas adaptée au niveau de préoccupation, compte tenu de sa complexité ou de son coût. En fonction des informations disponibles, on distingue les méthodes basées sur l'analyse statistique et celles fondées sur l'expertise (PEYRAS, 2009 ; SERRE, 2005). Les méthodes externes sont les plus adaptées car les réseaux techniques urbains peuvent être définis comme des systèmes complexes. Par système complexe, on entend un système composé d'un grand nombre d'éléments qui interagissent entre eux de façon non linéaire (SIMON, 1991) et dans lequel les relations de cause à effet ne sont pas toujours établies scientifiquement et nécessitent une part d'intuitif. Les systèmes techniques urbains correspondent donc à des systèmes complexes puisque caractérisés par des processus physiques nombreux, redondants, progressifs et

faisant intervenir de nombreuses interactions avec le milieu extérieur. Les méthodes de la sûreté de fonctionnement ont été développées à l'origine pour étudier des systèmes industriels au fonctionnement complexe (nombre de composants très important, défaillances multiples et bouclées...) pour lesquels il est très difficile, voire impossible, de produire un modèle de fonctionnement par des approches physiques classiques (VILLEMEUR, 1988). Les méthodes de la sûreté de fonctionnement apparaissent alors bien adaptées pour la modélisation des mécanismes de défaillance des systèmes techniques urbains. Ainsi, plusieurs méthodes relevant de la sûreté de fonctionnement peuvent être successivement appliquées :

- l'analyse fonctionnelle où le système étudié est modélisé puis les fonctions accomplies par le système sont recherchées ;
- l'analyse des modes de défaillance et de leurs effets où est considéré systématiquement, l'un après l'autre, chaque composant du système (un mode de défaillance est la non-réalisation d'une fonction quelconque dans des conditions prévues : pas de fonction, perte ou dégradation d'une fonction, fonction intempestive et leurs effets). Contrairement aux études classiques d'analyse de risque en génie civil où, généralement, un seul type d'ouvrage est analysé, notre approche a l'originalité d'être déployée sur l'ensemble des réseaux techniques urbains pour tenir compte de leurs interactions (SERRE, 2011).

Une fois les méthodes d'évaluation de la résilience urbaine mises en place, à partir de l'analyse des réseaux techniques urbains, il devient nécessaire de développer des outils d'aide à la décision pour les gestionnaires de réseaux et plus largement pour l'ensemble des acteurs urbains concernés plus ou moins directement par la gestion des risques. L'objectif est double. Il s'agit premièrement de disposer d'outils capables d'intégrer des indicateurs d'aide à la décision : les possibilités de couplage entre des systèmes d'information à référence spatiale (SIRS) et les indicateurs de résilience doivent être étudiées. Deuxièmement, ces outils doivent pouvoir être partagés par de multiples acteurs intéressés par l'amélioration de la résilience urbaine : partager des SIRS à l'aide de technologies client/ serveur via le web semble être une option intéressante dans ce cas.

L'utilisation des systèmes d'information géographique (SIG) pour la gestion des risques s'est répandue chez l'ensemble des acteurs des risques pour deux raisons principales. Premièrement, les SIG se sont démocratisés, car ils sont désormais technologiquement et économiquement accessibles à la plupart des acteurs des risques. Deuxièmement, les risques sont reconnus comme étant un phénomène spatial, l'espace constituant même sa composante intrinsèque. « L'espace sur lequel s'exercent les menaces n'est pas neutre, il constitue la composante intrinsèque du risque » (VEYRET, 2003). Ainsi, les progrès de la recherche thématique, qui mettent en exergue la composante spatiale des risques, et le développement des outils SIG ont en commun d'aboutir à une utilisation croissante des outils SIG et à une amélioration des connaissances sur les risques territorialisés.

Parallèlement à ces développements, le cadre théorique de la gestion des risques tout comme les outils SIG n'ont cessé d'évoluer. Tout d'abord centrée sur l'étude et la lutte contre l'aléa, cette thématique de recherche a introduit de nouveaux concepts comme celui de vulnérabilité, puis, plus récemment, celui de résilience. Cette évolution s'est aussi accompagnée de la reconnaissance des interactions entre les territoires et les aléas. Dans le même temps, les outils SIG ont aussi évolué. Leur vocation première demeure : elle vise à « rassembler, au sein d'un outil unique, des données diverses mais localisées dans le même espace géographique, relatives à la fois à la Terre et à l'homme, à leurs interactions et à leurs évolutions respectives » (DENEGRE & SALGE, 2004). De plus, le développement des applications 3D, web, temps réels, ou encore plus généralement le développement des outils informatiques et des bases de données, contribuent à améliorer « la collecte, la gestion, la manipulation, l'analyse, la modélisation et l'affichage de données à référence spatiale afin de résoudre des problèmes complexes d'aménagement et de gestion » (DENEGRE & SALGE, 2004).

Des outils pour décider où et comment augmenter la résilience des infrastructures

Quelques applications permettent d'illustrer comment améliorer la résilience des réseaux techniques. Certaines approches permettent d'améliorer la résilience des ouvrages de protection contre les inondations en renforçant leur résistance. Il s'agit d'évaluer par les méthodes de sûreté de fonctionnement la fragilité des ouvrages en prenant en compte plusieurs critères (type de matériau composant la digue, trous d'animals fousseurs, racines dans le corps de la digue...) et localiser les sections les plus fragiles (Serre, 2005). Le repérage des tronçons de digues les plus fragiles permettent alors d'engager les travaux prioritaires pour améliorer leur résistance et éviter les ruptures de digues et leurs effets induits.

D'autres approches techniques visent à améliorer la résilience des réseaux techniques urbains. Il s'agit par exemple de concevoir des réseaux techniques urbains permettant la circulation des flux nécessaires au fonctionnement de la ville même en situation de crise. C'est le cas par exemple du projet de ville flottante à Rotterdam conçu par la société DeltaSync (de GRAAF *et al.*, 2011) où les réseaux sont rassemblés dans un module flottant. Ainsi, même en cas de crue, les réseaux continuent d'assurer leurs fonctions. On peut également ajouter des fonctionnalités aux réseaux techniques existants pour limiter la propagation des risques en villes. Il en est ainsi d'un projet de conception de chaussées permettant l'écoulement des eaux de pluies au sein de sa structure testée dans la ville de Dublin dans le cadre du projet *FloodResilientCity*.

Par ailleurs, des méthodes et outils innovants sont en encore en cours de développement pour améliorer la résilience des réseaux techniques urbains. Ils visent, en s'appuyant sur un Web SIRS, l'évaluation de la résilience d'un point de vue organisationnel en prenant en compte les trois capacités (résistance, absorption, récupération) et donc leur résilience technico-fonctionnelle (TOUBIN *et al.*, 2014). A ce titre, une approche collaborative a été mise au point afin de répondre aux enjeux de la problématique. Le manque de démarche globale et d'adhésion des acteurs au concept de résilience et aux solutions à mettre en œuvre est ainsi comblé par un travail conjoint d'augmentation de la connaissance et de partage d'un diagnostic commun des points faibles des réseaux techniques urbains. Le premier enjeu est l'acceptation des méthodes d'évaluation de la résilience avec notamment une bonne compréhension de la méthode scientifique. Une meilleure appropriation des outils d'évaluation de la résilience peut être favorisée par des jeux de rôles utilisant le modèle développé. Ainsi, la démarche permet à la fois la manipulation des outils et l'échange de rôles pour améliorer la compréhension des objectifs et contraintes de chaque partie prenante.

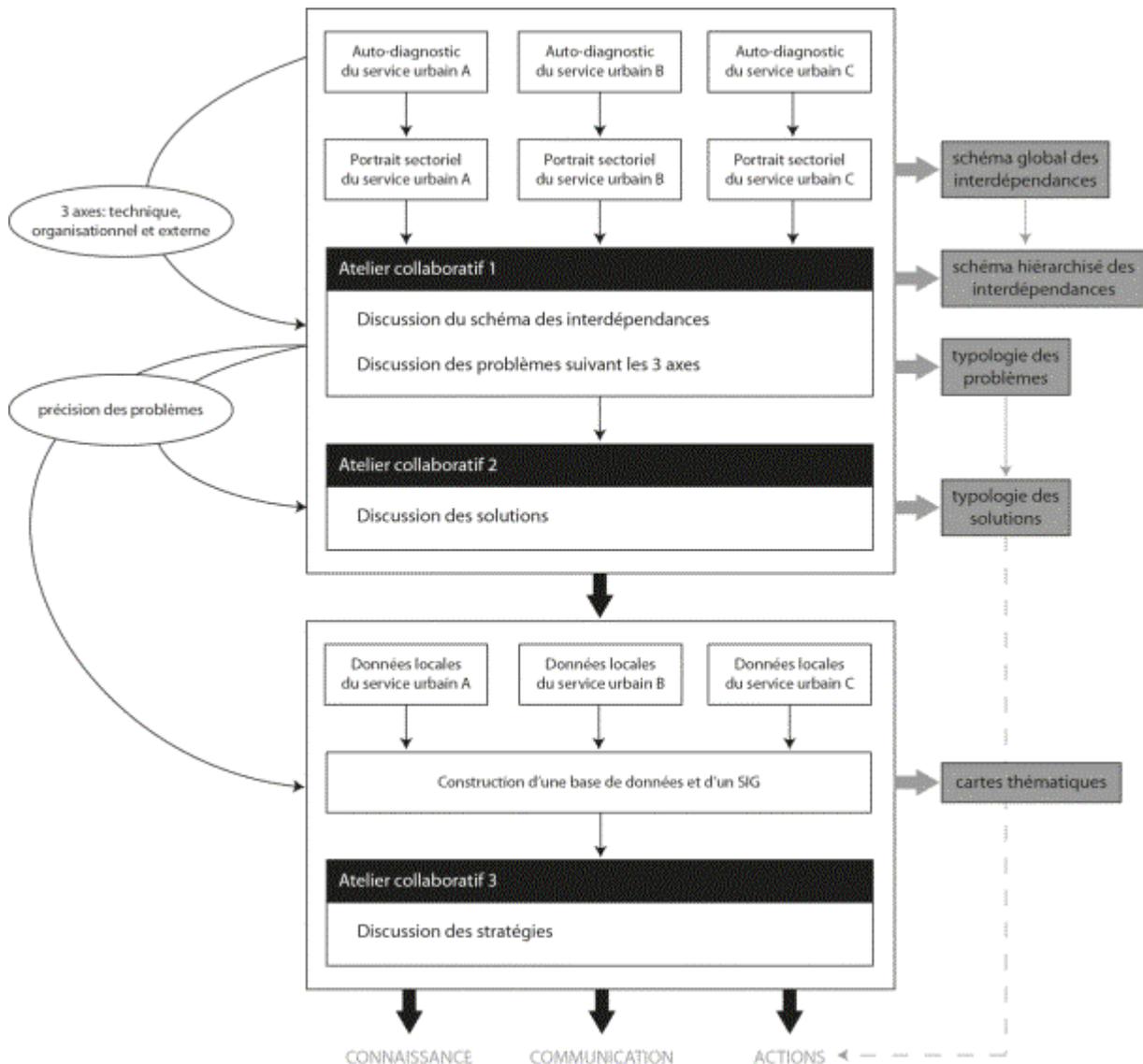


Figure 3 : Méthode collaborative d'évaluation de la résilience des réseaux techniques urbains en période de crise hydrologique (TOUBIN *et al.*, 2014).

Cette première étape se déroule lors d'ateliers rassemblant les scientifiques maîtrisant les méthodes d'analyse de la résilience des réseaux, des agents des services techniques de la ville et des gestionnaires des réseaux (Fig. 3). Pour accroître encore la connaissance, pour préparer la mise en œuvre de solution répondant aux problèmes identifiés précédemment, ou pour compléter la démarche par des outils collaboratifs à distance et asynchrones, on utilise des cartes d'argumentation. Chaque acteur peut y localiser des informations et des commentaires accessibles par tous les autres membres. Ils peuvent alors les compléter, répondre aux commentaires et construire ainsi un discours argumenté sur les points noirs, les interdépendances (Fig. 4) et les éventuelles mesures envisagées. L'outil développé pour évaluer la résilience des réseaux se veut accessible aux inexperts ou tout du moins permet des modélisations supportant le dialogue et la discussion entre les différents services et gestionnaires. Ce travail d'analyse de la résilience des réseaux nécessite un fort investissement de la part des gestionnaires de réseaux, notamment en ce qui concerne les données nécessaires à la modélisation. Il apparaît donc indispensable de sensibiliser les acteurs à l'intérêt d'une telle collaboration. Il est proposé un apprentissage mutuel des liens d'interdépendance existants au sein du territoire entre les systèmes.

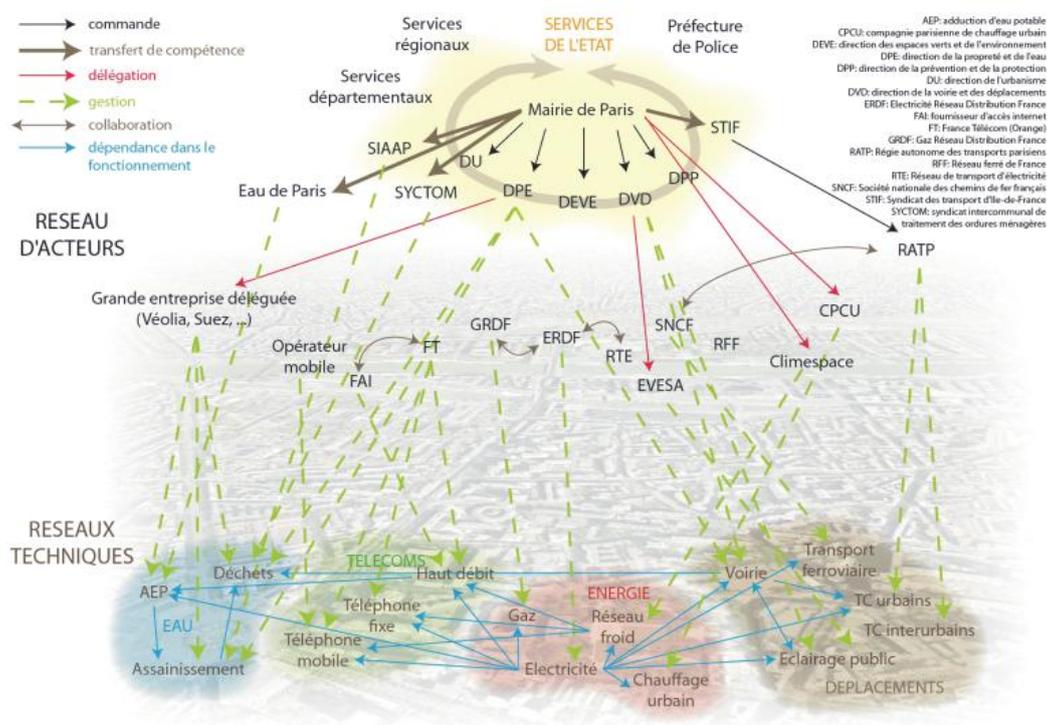


Figure 4. Cartographie de l'interdépendance des acteurs et des réseaux techniques (TOUBIN *et al.*, 2014).

Un autodiagnostic simple à réaliser par le gestionnaire doit d'abord identifier les ressources utiles au fonctionnement du service et mettre ainsi en avant la dépendance du système à d'autres systèmes. De la même manière, l'identification des utilisateurs dépendant des ressources produites par le système doit sensibiliser le gestionnaire à l'importance de la continuité de son service. La mise en commun des diagnostics sectoriels met enfin en avant la complexité des interactions entre systèmes ainsi que des éventuelles distorsions dans les perceptions de chacun : par la caractérisation de la criticité des ressources, on identifie des liens négligés ou sous-estimés. Cette première étape de confrontation des interdépendances en présence de tous les acteurs de la ville et des réseaux doit être un préalable à une analyse plus poussée, à mener toujours en collaboration entre les acteurs qui doivent s'en approprier la démarche. L'ensemble des acteurs concernés est rassemblé autour d'une analyse scientifique objective qui ne laisse plus la place aux jeux d'acteurs et de pouvoirs mais favorise une vision à long terme et des stratégies de développement urbain durable pour une mise en action de la résilience des territoires (SERRE *et al.*, 2014).

CONCLUSION

Le choix méthodologique privilégié pour proposer des stratégies de résilience urbaine a reposé sur une approche technico-fonctionnelle de la résilience. Une approche technique puisque ce sont les systèmes techniques urbains qui ont été étudiés, une approche fonctionnelle car ces systèmes, selon leurs capacités de résistance, d'absorption et de récupération, peuvent augmenter les effets des catastrophes en milieu urbain et diffuser le risque au sein de la ville.

En plus de cette entrée technico-fonctionnelle, une approche transdisciplinaire, au service de la ville et de ses décideurs, a été développée, s'intéressant aux stratégies des acteurs de la gestion des risques, à diverses échelles. Ainsi, des outils d'aide à la décision ont été produits. Cette production d'outils a été rendue possible par l'utilisation de méthodes provenant de diverses sciences. Outre l'urbanisme, l'aménagement du territoire et la géographie, transdisciplinaires par nature, des méthodes provenant de la géographie des risques, des sciences de l'aide à la décision et des sciences de l'information géographique ont été mobilisées pour initier des plans d'action en faveur de la résilience des territoires. A titre d'exemple, ces approches ont été expérimentées ou sont en cours d'exploitation au sein d'un certain nombre de territoires comme le Val de Loire, Dublin, Bradford, Dordrecht, Trondheim, Hambourg, Mayence, Paris, Cahors et la Nouvelle-Orléans.

BIBLIOGRAPHIE

- ASCE, 2009, Guiding Principles for the Nation's Critical Infrastructure, *American Society of Civil Engineers*, 36p.
- BALSELLS M., BARROCA B., AMDAL J., BECUE V. & SERRE D., 2014, « Application of the DS3 model to the stormwater sewerage system at the neighborhood level », *Water Science and Technology*, 10 p.
- BARROCA B., SERRE D. & RENOIR P., 2014, Le défi écologique, levier de transformation de l'urbanisme commercial pp 205-211 *In* Du Far West à la ville, l'urbanisme commercial en questions (sous la direction de GARCEZ C. et MANGIN D.) éditions Parenthèses, Collection : Grands territoires, 256 p.
- BOIN A. & MCCONNELL A., 2007, Preparing for Critical Infrastructure Breakdowns: The Limits of Crisis Management and the Need for Resilience, *Journal of Contingencies and Crisis Management*, 15, 1 : 50-59.
- de GRAAF R.E., DAHM R.J., ICKE J., GOETGELUK R.W., JANSEN S.J.T. & VAN de VEN F.H.M., 2011, Perspectives on innovation : a survey of the Dutch urban water sector. *Urban Water Journal*, 8, 1 : 1-12
- DENEGRE J. & SALGE F., 2004, Les systèmes d'information géographique. *Que sais-je ?*, PUF, 128p,
- DUPUY G., 1991, L'urbanisme des réseaux : théories et méthodes, Paris, Armand Colin, coll. « Géographie », 198p.
- FELTS L., 2005, Vulnérabilité des réseaux urbains et gestion de crise. *CERTU*, 78 p.
- GOURBESVILLE P., 2008, « Challenges for integrated water resources management », *Physics and Chemistry of the Earth, Integrated Water Resources Management in a Changing World*, 33 : 284-289.
- MCNALLY R. K. & LEE S.-W., 2007, « Learning the critical infrastructure interdependencies through an ontology-based information system », *Environment and Planning B: Planning and Design*, 34 : 1103-1124.
- PEYRAS L., 2009, Evaluation de la performance et des risques des ouvrages hydrauliques de génie civil, Habilitation à Diriger des Recherches. Clermont Ferrand, Université Blaise Pascal. 152 p.
- ROBERT B. & MORABITO L., 2009, Réduire la vulnérabilité des infrastructures essentielles, Paris, Tec et Doc-Lavoisier, 62 p.
- SERRE D., 2005, Evaluation de la performance des digues de protection contre les inondations. Marne-la-Vallée, 366 p.
- SERRE D., 2011, La ville résiliente aux inondations. Méthodes et outils d'évaluation, Mémoire d'Habilitation à Diriger les Recherches, Université Paris-Est, 174 p.
- SERRE D., BARROCA B. & LAGANIER R., 2013a, Resilience and Urban Risk Management, CRC Press Balkema, Taylor & Francis Group, 179 p.
- SERRE D., BARROCA B. & LAGANIER R., 2013b, Natural hazard resilient cities, *Natural Hazards and Earth System Sciences (NHES)*, an Open Access Journal of the European Geosciences Union, Co-Editors of this Special Issue 2675-2678.
- SERRE D., BARROCA B. & DUCHEMIN E., 2014, City Resilience, *S.A.P.I.E.N.S Journal (Surveys And Perspectives Integrating Environment & Society)*,
Co-Editors of this Special Issue. <https://journals.openedition.org/sapiens/1515>
- SIMON H. A., 1991, Sciences des systèmes Sciences de l'artificiel. Paris, Dunod.
- TOUBIN, M., LAGANIER, R., DIAB, Y. & SERRE D., 2014, "Improving the Conditions for Urban Resilience through Collaborative Learning of Parisian Urban Services." *J. Urban Plann. Dev.* 10.1061/(ASCE)UP.1943-5444.0000229, 05014021.
- VEYRET Y., 2003, Les risques. Paris, SEDES, 256 p.

VILLEMEUR A., 1988, Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels. Fiabilité - Facteurs humains - Informatisation. Editions Eyrolles, 822 p.

ZEVENBERGEN C. et CASHMAN A., 2011, Urban Flood Management, Londres, CRC Press/Balkema Taylor and Francis Group, 340 p.

ZWINGELSTEIN G., 1995, Diagnostic des défaillances. Théorie et pratique pour les systèmes industriels. Paris, Hermès Editions, 601 p.

