

Le concept de résilience à l'épreuve du génie urbain

Bruno Barroca, Damien Serre et Diab Youssef

Volume 12, numéro 2, septembre 2012

URI : <https://id.erudit.org/iderudit/1022538ar>

[Aller au sommaire du numéro](#)

Éditeur(s)

Université du Québec à Montréal
Éditions en environnement VertigO

ISSN

1492-8442 (numérique)

[Découvrir la revue](#)

Citer cet article

Barroca, B., Serre, D. & Youssef, D. (2012). Le concept de résilience à l'épreuve du génie urbain. *VertigO*, 12(2).

Résumé de l'article

Chaque événement naturel appliqué sur des territoires urbains révèle la limite des stratégies actuelles de gestion des risques et montre l'importance prépondérante des réseaux techniques dans la gestion de la crise et de l'après-crise. Le génie urbain permet d'analyser, par une approche transversale, d'une part l'analyse des contraintes techniques qui amènent à la conception et à la gestion des réseaux, d'autre part l'inscription de ces réseaux dans les territoires et dans les usages. Ainsi, le réseau dépasse l'unique objet dédié au fonctionnement urbain et s'insère dans un ensemble d'éléments en relation dont le fonctionnement s'apparente à un système technique. Pour comprendre et analyser les risques urbains, de type naturel ou technologique, appliqués à des systèmes techniques, le concept de résilience permet de dépasser les ambitions de fiabilisation souvent sectorielles des réseaux techniques. La résilience est un concept récent dans les sciences du territoire. Ce concept s'applique généralement à des systèmes et aborde le risque par l'adaptation des enjeux, l'absorption de l'aléa, la récupération du territoire après la crise. Pour aborder la résilience, le génie urbain doit redéfinir sa façon d'aborder la relation entre le risque et les systèmes techniques et se doter d'un référentiel.

Cet article présente un modèle conceptuel de résilience pour les systèmes techniques qui repose sur l'identification de trois types de résilience complémentaires. La résilience fonctionnelle représente la capacité d'un système technique à se préserver de dommages importants tout en assurant au minimum le service nécessaire aux infrastructures critiques. Par la résilience fonctionnelle, les systèmes techniques cherchent de manière intrinsèque à augmenter leur propre résilience. La résilience corrélative caractérise la relation entre la demande de service et la capacité du système technique à y répondre. Diminuer la sollicitation faite à un système peut permettre de le maintenir en fonctionnement et de le protéger afin qu'il se rétablisse plus rapidement. Il s'agit d'adapter la demande à la capacité des systèmes techniques. Au-delà de la crise et de sa gestion, le retour à une situation « viable » est aussi un élément d'appréciation de la résilience. Des relations de solidarité entre les systèmes techniques et d'autres territoires peuvent aussi constituer un facteur de résilience des systèmes techniques. La résilience territoriale exprime cette capacité à mobiliser un territoire bien au-delà de l'espace impacté.



Bruno Barroca, Damien Serre et Diab Youssef

Le concept de résilience à l'épreuve du génie urbain

- 1 Depuis 2007, la moitié de la population mondiale vit en milieu urbain (UN-Habitat, 2007). Le taux de croissance équivaut à la construction d'une nouvelle ville d'un million d'habitants par semaine (www.floodresiliencengroup.org, 2009). Face à cela, les aléas naturels créent en ville des dégâts humains et matériels très importants, le coût financier des dégâts est en pleine croissance et différents systèmes assurantiels se transforment afin de maintenir leurs équilibres.
- 2 À une échelle plus locale, les retours d'expériences montrent que les réseaux techniques, selon leurs défaillances ou leur continuité de services, prennent une importance cruciale dans la gestion des risques urbains. De nombreux dysfonctionnements urbains sont liés aux dysfonctionnements des réseaux et à leur criticité (Serre, 2011). Dans ce contexte de risques urbains, les réseaux techniques doivent être analysés par l'approche transversale et bivalente portée par le génie urbain qui consiste d'une part à caractériser les contraintes techniques qui amènent à la conception et à la gestion des réseaux, d'autre part à analyser l'inscription de ces réseaux dans les territoires, dans les usages et les appropriations. À travers le génie urbain, le réseau dépasse l'objet isolé uniquement dédié au fonctionnement urbain, il se place comme actant¹ d'un territoire et prend une grande importance dans la gestion des risques locaux. Dans cette acceptation, le réseau technique devient un système technique, c'est-à-dire un ensemble structuré de fonctions techniques assurant un service destiné à répondre à un besoin. Le système technique est composé par des éléments techniques, organisationnels, des méthodes, des acteurs, et s'inscrit dans un territoire urbain. Actuellement, la gestion des risques en génie urbain et essentiellement vue à travers la fiabilité du réseau ce qui conduit à utiliser des méthodes issues de ce domaine. Le coût nécessaire à fiabiliser les réseaux techniques et les dysfonctionnements révélés lors de chaque événement naturel inhabituel montre les limites d'une stratégie qui isole les réseaux et ne considère pas les systèmes techniques dans leur ensemble. Ces événements exposent également l'importance des systèmes techniques dans la gestion des risques naturels en milieu urbain. De nouvelles stratégies de gestion du risque inondation en milieu urbain doivent être envisagées (Zevenbergen et al., 2011).
- 3 Nous faisons l'hypothèse que la résilience, définie comme la persistance des relations à l'intérieur d'un système, peut permettre de dépasser les méthodes actuelles et participer ainsi à une amélioration du management des risques en génie urbain. La mesure de la résilience correspond à l'évaluation de la capacité de ce système à absorber et intégrer les changements de ses composants (Holling, 1973). Les systèmes évoluant de manière permanente, ils ne sont pas caractérisés par un état d'équilibre, mais par une stabilité générale qui est celle du maintien de leur fonctionnement. Ainsi, lorsqu'une perturbation apparaît, soit le système est capable de l'intégrer avec un nombre de perturbations qui ne remet pas en cause sa viabilité, soit le système n'en est pas capable et il est alors détérioré à plus ou moins long terme par le changement de sa structure (Sanders, 1992). La résilience suggère une position proactive du système envers le risque, les caractéristiques internes du système urbain lui donnent les outils d'une analyse de risque tournée vers l'action et lui permettent de réagir face au risque (Pelling, 2003). Au-delà des objectifs de diminution des conséquences d'une perturbation, certains auteurs considèrent la perturbation du système comme une opportunité pour l'aménagement urbain (Pasche and Geisler, 2005). La capacité de réaction, mais également les capacités d'adaptation et d'absorption, apparaissent alors comme centrales pour qualifier un système de résilient et envisager le risque au sein de systèmes dynamiques (Serre, 2011).
- 4 Si des expériences et des méthodes appliquées à des systèmes techniques ont développé des démarches résilientes qui questionnent les stratégies habituelles de gestion des risques, ces démarches restent spécifiques et il n'existe pas actuellement de cadre commun permettant l'analyse des stratégies proposées. L'objet de cet article exploratoire est de concevoir un

modèle qui propose une conceptualisation commune permettant d'orienter l'analyse des stratégies de résilience et de construire un cadre de référence pour la médiation, l'échange, la description de ces stratégies. Les paramètres principaux sont identifiés à partir de la présentation d'expériences et de méthodes relatives à la gestion du risque inondation et qui s'inscrivent dans une démarche de résilience appliquée à des systèmes techniques urbains.

Développement urbain et risque inondation.

- 5 Comprendre le risque d'inondation en ville demande d'intégrer une multitude de facteurs aggravants comme le développement urbain, le changement climatique et l'ensemble des sources possibles d'inondations (Blanksby et al., 2009). La croissance urbaine s'établit généralement en périphérie des villes existantes et s'accompagne donc d'un étalement urbain. La ville occupe ainsi un espace de plus en plus important, cet espace pouvant être soumis à divers autres aléas naturels (séisme, avalanche, etc.). À l'échelle d'un territoire local, ce développement surajoute des aléas d'origine anthropique comme les aléas technologiques et amplifie les aléas dits naturels comme l'inondation. En effet, l'imperméabilisation des surfaces consécutive de l'urbanisation augmente le ruissellement et limite l'infiltration. Lors de précipitations intenses, il en résulte localement des inondations dites pluviales et globalement une augmentation des débits sur l'aval du bassin versant pouvant générer des inondations dites fluviales liées au débordement des cours d'eau. Le coût économique est déjà très important il devrait atteindre dans le monde la valeur de 100 Milliards d'Euros par an à la fin du siècle (EEA 2008). Près de 75 % des dommages seraient recensés en milieu urbain (COST22, 2008)². Les systèmes assurantiels se transforment afin de limiter la hausse³ face aux enjeux de la ville future la densité urbaine apparaît aujourd'hui comme le modèle de développement urbain durable permettant d'accéder à une plus grande efficacité énergétique, à une réduction des coûts environnementaux de la mobilité et à la préservation des espaces agricoles de périphérie. Si d'un côté l'étalement urbain est générateur de risques globaux (impact CO₂ important) et locaux (ruissellement), l'orientation vers une ville dense et compacte peut amener à investir des zones soumises à des aléas naturels, notamment les zones urbaines inondables⁴.
- 6 Cette urbanisation est accompagnée par un changement climatique qui génère des incertitudes concernant l'évaluation de l'aléa. Actuellement, les experts de l'IPCC⁵ (IPCC, 2007) proposent plusieurs scénarios d'évolution climatique. Mais, quel que soit le scénario, des conséquences sur la fréquence et la sévérité des précipitations sont attendues. Des épisodes de sécheresse plus intenses alterneront avec des précipitations plus fortes (Lamarre, 2008). Cette sécheresse devrait avoir une action directe sur l'inondation en réduisant l'infiltration des sols. Des précipitations plus intenses sur des sols moins perméables réduisent le temps de réponse du bassin versant et augmentent ainsi le risque inondation. D'autres sources d'inondations provenant de l'élévation du niveau marin sont à craindre. 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. Or, les incertitudes liées à la fiabilité des données et à leur disponibilité ne permettent pas actuellement de fiabiliser les résultats générés par les modèles mathématiques (Barroca, 2006). Comment gérer efficacement le risque, produire des modèles de prévision des crues et dimensionner des ouvrages de protection dans ce contexte ?
- 7 La situation économique, urbaine, climatique et de fragilité croissante de la société face aux risques naturels, exposent la nécessité de développer de nouvelles stratégies de gestion du risque inondation. Ces nouvelles stratégies devront permettre d'anticiper des scénarios d'inondation que les modèles probabilistes jugent actuellement comme extrêmes ou rares (Zevenbergen et al., 2011).

Importance des systèmes techniques urbains dans la gestion des risques.

- 8 Si le développement urbain doit privilégier la compacité, la dépendance croissante des villes aux systèmes techniques urbains implique des formes d'urbanisation particulières donnant lieu à l'apparition dans le champ de l'urbanisme du terme « réticulaire » (Dupuy, 1991). Spatialement la ville contemporaine ne présente plus une continuité fonctionnelle. La ville

s'appuie fortement sur les systèmes techniques urbains qui créent une organisation spatiale du territoire. La réalité invisible des connexions aux services urbains oriente, sans la contraindre totalement, le développement urbain de la ville visible. Les systèmes techniques peuvent être définis par le service rendu, l'organisation (aspects fonctionnels) et l'infrastructure qui représentent les aspects physiques, le matériel, les moyens nécessaires à la réalisation du service (Blancher, 1998). Ainsi, les transports en commun, les systèmes de distribution d'électricité, de gaz, de téléphonie, de fibre optique, de chauffage urbain, de gestion des déchets sont des systèmes techniques. Ces systèmes techniques sont généralement qualifiés de complexes du fait de leurs relations d'interdépendance (Toubin et al., 2012).

9 L'analyse des retours d'expériences de villes ayant subi des dommages lors d'inondations montre à la fois une dépendance du fonctionnement urbain à ses systèmes techniques et une diffusion des effets de l'inondation via ces mêmes systèmes. L'étude des systèmes techniques urbains sous contraintes montre qu'ils sont vulnérables intrinsèquement et amplificateurs de vulnérabilité du territoire lorsqu'ils ne peuvent pas assurer leur mission de service (Felts, 2005 ; Vigneron et al., 2006).

10 La ville fortement dépendante des systèmes techniques donne à ces systèmes techniques une grande importance dans la diffusion du risque. Pour améliorer la résilience des villes, les systèmes techniques ont déjà été identifiés comme stratégiques (Lhomme et al., 2010). Ils se comportent à la fois comme des propagateurs de dysfonctionnement par leur extension géographique et par leurs interdépendances alors qu'ils sont en même temps essentiels à la reconstruction (Felts, 2005). Ils constituent « le système nerveux » de la ville dans lequel la moindre défaillance peut avoir des conséquences en cascade sur le fonctionnement urbain (Robert et Morabito, 2009).

11 Pour caractériser les services les plus indispensables, il est fait appel à la notion de systèmes techniques dits vitaux, essentiels ou critiques (Robert et Morabito, 2009 ; Barthélémy et al., 2011).

12 L'analyse du comportement des systèmes 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 assurant des 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 and McConnell, 2007) ;
- la notion d'interdépendance des systèmes : la plupart de ces infrastructures critiques interagissent. Or, ces interactions sont souvent complexes et méconnues, car elles dépassent les frontières 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). Différents travaux d'évaluation de la vulnérabilité des infrastructures critiques sont mobilisables (Petit, 2009). Les plus représentatifs sont certainement ceux de Benoit Robert (2009a, 2009 b). Ses travaux illustrent notamment, à partir de cas réels sur la ville de Montréal, les défaillances en chaîne produites par un arrêt momentané d'une partie d'un système technique (Robert and Hémon, 2012).

La résilience fonctionnelle comme capacité à maintenir le service des infrastructures critiques.

13 Pour le management des risques en génie urbain différentes méthodes permettant d'évaluer la fiabilité d'un système technique et d'une infrastructure critique ont été testées. Les méthodologies développées ont pour double objectif l'étude des interrelations de ces infrastructures fortement interdépendantes et les liens de dépendance avec le territoire. Il existe des méthodes d'analyse de risque physique, statistique (mathématique) par dire d'expert, ou encore issues de la Sûreté de Fonctionnement (UNIT, 2011). Comme les approches

physiques, la Sûreté de Fonctionnement est une méthode interne, c'est-à-dire qu'elle repose sur une connaissance profonde du fonctionnement du système étudié (Serre et al., 2008). La modélisation physique des processus continus ou discrets de dégradation du système repose sur la prise en compte d'équations régissant les phénomènes internes. La modélisation par la Sûreté de Fonctionnement repose sur le principe de la modélisation fonctionnelle, et 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 (Gervais et al., 2011).

14 L'utilisation de ces méthodes pour analyser des scénarios de défaillance et modéliser des processus d'interdépendance entre systèmes complexes donne des résultats pertinents. Cependant, ces méthodes s'appliquent généralement à des systèmes complexes, et non à des systèmes de systèmes complexes, c'est-à-dire des systèmes fortement interdépendants. Il est possible, en utilisant une combinaison de méthodes issues de la Sûreté de Fonctionnement, de modéliser des scénarios de défaillance pour des systèmes de systèmes complexes en analysant chaque système plus ou moins indépendamment les uns des autres (Lhomme et al., 2011). Dans un premier temps, le principe est de considérer les différentes infrastructures comme faisant partie d'un seul et même système. Une analyse fonctionnelle générale externe est alors produite. Ce n'est que dans un deuxième temps qu'une analyse fonctionnelle interne est réalisée pour chaque infrastructure critique et que les méthodes de sûreté de fonctionnement sont appliquées. À travers des travaux récents (Serre, 2011) cette méthode laisse entrevoir des perspectives intéressantes. Dans ces travaux, l'Analyse des Modes de Défaillance et de leurs Effets (AMDE) est choisie pour étudier les modes de défaillance, car elle permet une analyse exhaustive de ceux-ci. C'est une méthode inductive d'analyse des défaillances potentielles d'un système. Elle considère chacun des composants du système et analyse ses modes de défaillance. Elle repose sur le recensement systématique et l'évaluation des risques potentiels d'erreurs susceptibles de se produire à toutes les phases de réalisation d'un système. Depuis la fin des années 90, l'AMDE a été adaptée dans différents domaines du génie civil (Serre et al., 2007). Elle aboutit à l'élaboration d'un tableau, lequel, pour chaque composant, établit les causes et les effets de la perturbation du composant.

15 L'Analyse Fonctionnelle et l'AMDE ont été déployées sur l'ensemble des systèmes techniques urbains et à ce stade des approches spatiales montrent de possibles actions opérationnelles (Lhomme, 2010). Ces actions exposent une certaine idéologie du management des risques, et concernent la fiabilisation des infrastructures critiques. Cette fiabilisation peut amener à 3 leviers d'action : le maillage important du réseau, la résistance des composants et la capacité du système technique à trouver des modes de fonctionnement dégradé qui n'impliquent pas la défaillance totale du service qu'il assure. Assurer le service des infrastructures les plus importantes correspond à une forme de résilience qui sera nommée dite fonctionnelle. La mise en œuvre de la résilience fonctionnelle se réalise par des actions de fiabilisation, d'augmentation de la redondance et de gestion de stock en lien avec les risques. La fiabilisation implique une surprotection des ouvrages par rapport à la situation courante, pour les stocks les actions proposent généralement de garder et d'utiliser des ressources internes en créant des lieux de stockage temporaire ou permanent au plus près des lieux d'utilisation, enfin la redondance se rapporte à la qualité d'être en surnombre. Dans un réseau la redondance s'évalue par la capacité à trouver des chemins différents⁶ ou à utiliser plusieurs modes d'action pour un même service.

La résilience corrélative comme propension à adapter le besoin à la capacité de service.

16 Au-delà de la difficulté de fiabiliser des systèmes complexes, l'incertitude des prévisions couplée à la rareté des événements, peut impliquer des objectifs d'adaptation difficilement supportables du point de vue des investissements nécessaires. La difficulté à mobiliser des financements pour des événements rares et incertains se traduit généralement par une sous-adaptation qui entraîne des coûts importants en cas de crise. Pourtant, d'autres approches non issues de la Sûreté de Fonctionnement apparaissent et renouvellent la manière de penser la

gestion des risques pour des systèmes techniques. Ces approches partent de l'identification et l'analyse des stratégies d'adaptation au changement climatique. Différentes méthodes commencent à être utilisées dans la pratique pour soutenir une mise en œuvre axée sur la résilience. La plus intéressante, car elle dépasse le constat pour donner des orientations opérationnelles, est la méthode dite *Adaptation Tipping Points* –ATP - (Kwadijk et al., 2010). Cette méthode a été appliquée à l'étude de cas d'un système technique existant (assainissement pluvial) à Wielwijk dans la banlieue de Dordrecht (Pays-Bas) (Gersonius, 2012). Dans un premier temps, la méthode évalue les stratégies prévues de gestion des risques afin d'identifier si elles continueront d'être efficaces dans des conditions futures plus exigeantes. La méthode des *Adaptation Tipping Points* permet d'exprimer d'une part le moment où l'ampleur du changement climatique sera telle que les stratégies deviendront inopérantes et d'autre part le rôle et les fonctions du système considéré ainsi que le niveau de dégradation acceptable. À la sortie de cette étape sont identifiés les *Adaptation Tipping Points*. Si la performance du système technique devient inacceptable, alors il faut changer de stratégie et prendre des mesures d'adaptation. À ce moment, différentes options d'adaptation structurelle et non structurelle doivent être proposées et évaluées.

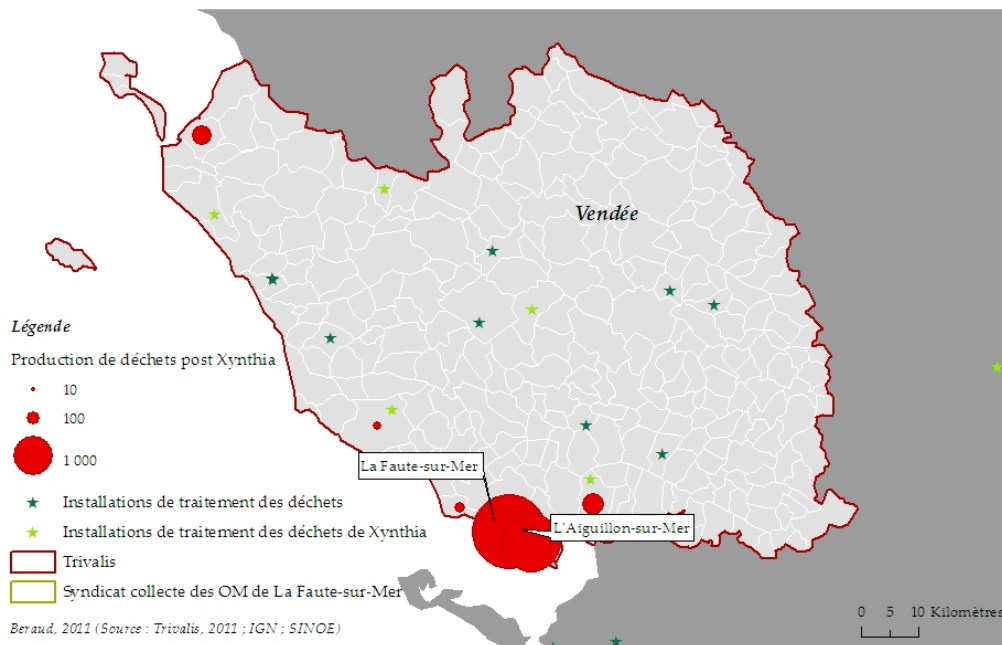
- 17 L'engagement avec toutes les parties prenantes est alors nécessaire pour sélectionner une stratégie adaptative réaliste et acceptable. La mise en œuvre de cette stratégie doit modifier la nature et le calendrier des ATP critiques. Si les stratégies efficaces sont trop coûteuses ou ne sont pas acceptables pour la société et pour l'environnement, il convient de retravailler sur le niveau de risque acceptable afin de le faire évoluer.
- 18 La partie itérative nécessaire à la mise en place de solutions réalistes et partagées exprime une inversion de l'approche classique de gestion des risques. En effet, la partie la plus innovante de cette méthode de l'ATP ne réside pas tant dans l'établissement d'un lien entre les conditions limites du système technique, l'évolution d'un aléa et les dépendances d'usage de ce système technique, que dans l'évolution du niveau d'acceptabilité. Par l'ATP s'exprime la recherche de la liaison entre le risque de baisse ou d'arrêt d'un service porté par un système technique et l'acceptabilité de cette baisse. Il y a la reconnaissance que le service et l'usage forment un ensemble, dont les parties se correspondent mutuellement. Aucune de ces parties ne peut changer sans que les autres changent aussi : la résilience du système technique est possible lorsque la corrélation entre service et usage reste acceptable à tous les temps du risque.

La résilience territoriale comme disposition à mobiliser un territoire d'absorption

- 19 Au-delà de l'adaptation de l'infrastructure (représentée par la résilience fonctionnelle) et de l'adaptation du besoin à la capacité de service (représentée par la résilience corrélative), chaque perturbation est également révélatrice des vulnérabilités et des capacités de l'organisation territoriale à y faire face. En génie urbain, aucune méthode n'existe pour exprimer la résilience d'un système technique en fonction de l'organisation territoriale. L'étude de la bibliographie spécifique à la géographie des risques ne nous a pas permis de trouver un cadre théorique pour définir précisément cette résilience. Cependant, la plupart de ces études utilisent la résilience en rapport avec la notion d'absorption ou la notion de « recovery »⁷ (Campanella, 2006 ; Hernandez, 2009). Cette capacité de l'organisation territoriale à favoriser la récupération consécutive à des dommages s'exprime aussi pour les systèmes techniques. Différents cas pourraient être présentés, mais l'expérience de la tempête Xynthia frappant la France le 27 février 2010 révèle clairement ce type de résilience de l'organisation territoriale pour la gestion des déchets.
- 20 Xynthia fut causée par une dépression météorologique avec des vents violents de l'ordre de 160 km/h qui ont frappé l'Europe entre le 26 février et le 1^{er} mars 2010. Cet événement concomitant à une marée haute (coefficient 102) engendra des inondations, notamment dans divers espaces littoraux français situés en Charente-Maritime, en Vendée et dans les Côtes-d'Armor. Le bilan humain fut lourd, 65 morts en Europe, dont 53 en France. Les côtes françaises subirent des dommages importants avec un cout estimé à 457 M€ de dépenses publiques et 690 M€ pour les assurances (Migaud et Bertrand, 2012).

21 Au cours de cet événement, l'équivalent de douze années de production de déchets⁸ fut produit en une nuit pour les communes de La Faute-sur-Mer et L'Aiguillon-sur-Mer. Les communes chargées de la collecte des ordures ménagères et le syndicat départemental de traitement des ordures ménagères (Trivalis) durent faire face à cette production nouvelle et d'ampleur exceptionnelle, tout en essayant de maintenir une gestion des déchets « normaux ». Des moyens en rapport à la situation furent mis en place montrant ainsi que l'organisation du territoire et des acteurs de la gestion des déchets pouvaient réagir et s'adapter au nouveau gisement. Cette capacité de réaction peut s'expliquer par la conjonction de plusieurs facteurs qui sont essentiellement en lien avec l'organisation territoriale de la gestion des déchets et à la capacité de mobilisation de soutien externe à la filière. D'une part, le territoire d'action du syndicat départemental de traitement Trivalis est également celui de la Vendée. Seules les communes de La Faute-sur-Mer et de L'Aiguillon-sur-Mer ont été durement impactées par la tempête (Error: Reference source not found).

Figure 1. Conséquences de la tempête Xynthia sur le système vendéen de gestion des déchets (Beraud et al. 2012)



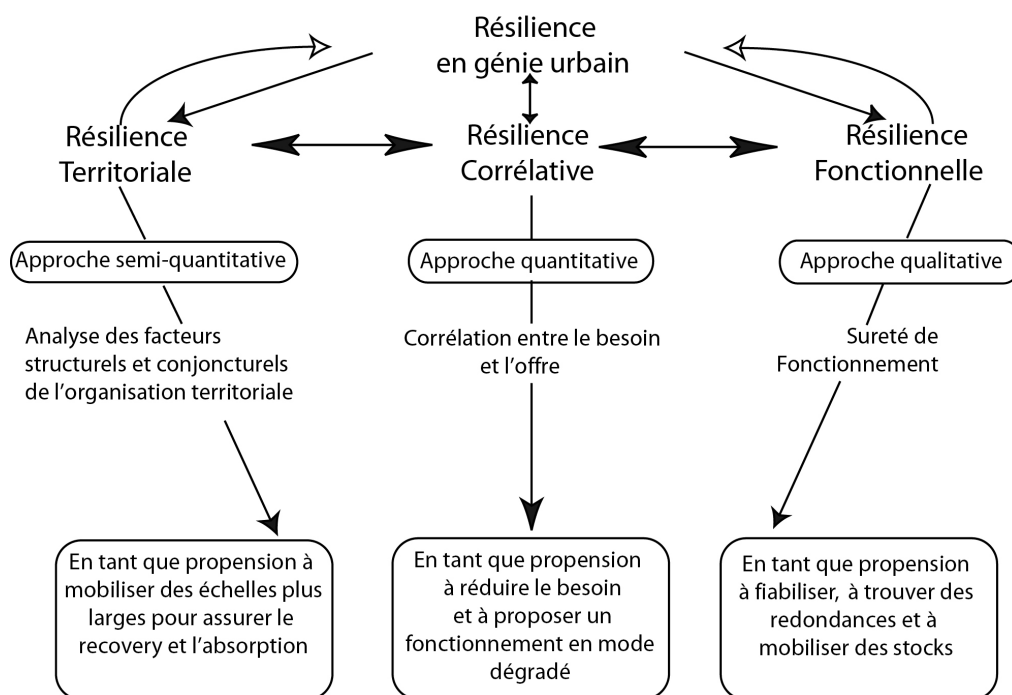
22 Ainsi l'importance des moyens que Trivalis pouvait mobiliser à l'échelle du département intensifia fortement la gestion des déchets et limita leur impact sur ces communes. Cette disponibilité des agents et matériels de Trivalis a permis d'autre part à ce territoire de bénéficier d'un encadrement rendant efficace la solidarité d'acteurs locaux (entrepreneurs, agriculteurs, etc.) et des communes voisines. Enfin, il faut noter que peu d'infrastructures de gestion (traitement notamment) furent impactées. Néanmoins, si le système de gestion des déchets a été capable de se relever rapidement des inondations générées par la tempête Xynthia, il n'est pas assuré qu'il en serait de même si une inondation se produisait sur un territoire plus vaste⁹. Si le nombre de communes sinistrées avait été plus important, les moyens auraient été davantage dispersés et certainement moins efficaces. La gestion de cet événement a été facilitée par le fait que les dysfonctionnements n'ont concerné qu'une zone relativement réduite du territoire d'action du syndicat de traitement des ordures ménagères. Sa capacité de réaction et d'adaptation n'en a été que plus aisée. C'est la forte capacité de mobilisation et de coordination au niveau d'un territoire plus vaste de l'ensemble des parties prenantes qui a généré la résilience territoriale du système de gestion des déchets pour ces communes.

23 La résilience territoriale exprime la capacité pour des conditions locales ou territoires locaux à mobiliser des conditions générales ou territoires plus larges. Ce lien de solidarité entre les échelles est aussi un facteur important de résilience qui s'exprime généralement dans les dimensions d'absorption et de récupération de la résilience.

Construire un modèle conceptuel de résilience appliqué au génie urbain.

24 La résilience, concept emprunté à d'autres disciplines (Lhomme et al., 2010), inscrit le management des risques dans une approche dynamique, portée vers l'adaptation. Ce concept peut marquer une rupture dans la gestion des risques en génie urbain. En effet, la gestion actuelle s'appuie essentiellement sur une vision statique relevant généralement de la Sureté de Fonctionnement alors qu'il est nécessaire désormais d'évoluer vers de l'intégration d'éléments comme l'organisation territoriale et l'intégration de l'acceptabilité des dysfonctionnements. Ainsi, les différentes recherches que nous avons menées majoritairement sur le thème de la résilience de la ville face au risque inondation montrent que pour le génie urbain, le concept de résilience associe trois critères complémentaires : la résilience fonctionnelle, la résilience corrélative et la résilience territoriale. Cette connaissance issue d'analyse de méthodes et d'expériences diverses se représente schématiquement sous la forme d'un modèle conceptuel (Figure 2. Modèle conceptuel de résilience appliqué au génie urbain).

Figure 2. Modèle conceptuel de résilience appliqué au génie urbain



25 Un modèle est une abstraction qui simplifie le système réel étudié (Coquillard et Hill, 1997). Le modèle conceptuel construit la représentation de la démarche de résilience en génie urbain d'un point de vue général. Cette dernière est issue du travail des auteurs de cet article et résume la structure synthétique d'une connaissance construite à partir de nombreuses sources souvent liées à un risque particulier, celui de l'inondation en milieu urbain.

26 Le modèle conceptuel proposé ici comprend à la fois le système technique étudié, la dépendance urbaine à ce système, et l'organisation territoriale. Il renseigne sur les méthodes ou principes permettant de parvenir à un résultat et fournit donc un cadre conceptuel pour la mise en place d'une stratégie de résilience. Il ne définit pas les technologies ou les actions nécessaires à la mise en œuvre de la stratégie établie, car celles-ci sont contextuelles et évolutives, mais il permet de représenter la structure synthétique de la résilience en génie urbain.

27 Un tel modèle a plusieurs finalités :

- il vise à véhiculer une conceptualisation commune à travers laquelle il est possible de concevoir des références pour la médiation, l'échange, la description ;
- il peut aider à construire un cadre d'analyse de la pertinence des règles existantes ;
- il contribue à orienter des stratégies de résilience.

28 Ce modèle, construit à partir de l'étude de la résilience des systèmes techniques en milieu urbain, le rend spécifique au génie urbain. Même si les termes de résilience fonctionnelle et de résilience territoriale peuvent apparaître dans d'autres domaines, l'utilisation de ce modèle conceptuel en dehors du génie urbain ne peut se faire sans des études spécifiques qui montreraient sa validité et sa pertinence. Sa portée en génie urbain peut cependant dépasser le risque particulier qu'est l'inondation. La construction du modèle conceptuel et l'analyse de la résilience des systèmes techniques réalisés dans cet article ne se fondent pas sur le mode de dégradation spécifique de l'inondation. Les éléments exposés ci-dessus restent valides pour des risques qui s'appliquent à des espaces importants provoquant une agression sur des portions importantes d'un réseau tels que séismes, tempêtes, mouvements de terrain, avalanches, risques technologiques, etc. Ce modèle nécessiterait d'être confronté à d'autres types de risques comme sécheresse prolongée, feux de forêt, terrorisme, invasion d'insectes, transport de matière dangereuse, épidémie, etc.

Conclusion

29 Il est difficile aujourd'hui de travailler sur l'application du concept de résilience en aménagement urbain, car il se traduit essentiellement dans la conception de bâtiments dits résilients. Lorsqu'une approche dite « résiliente » s'applique aux systèmes techniques elle est généralement très restrictive et se traduit par de la fiabilisation, et par la mise en place d'objectifs de continuité de service. Une des causes de l'appauvrissement du concept de résilience appliqué aux systèmes techniques est certainement liée à la gouvernance qui isole le développement et la gestion de chacun des systèmes techniques. Le génie urbain considère au contraire les relations unissant les systèmes techniques avec la morphologie urbaine et les acteurs. La résilience prend alors une autre dimension et devient simultanément :

- synonyme de fiabilisation des infrastructures critiques, généralement opposée au concept de vulnérabilité ;
- synonyme d'une gestion intégrée des ressources et des capacités d'adaptation mobilisables pendant la crise pour pallier aux dysfonctionnements des services habituels ;
- synonyme de la capacité à adapter le besoin de service à la possibilité des systèmes techniques à le satisfaire ;
- synonyme de récupération et de rebond suite à l'événement.

30 Pour remplir ces objectifs, la résilience doit alors intervenir à travers des mesures appliquées à plusieurs échelles spatiales et temporelles (Serre et al, 2012). L'enjeu est de préparer la ville existante face aux risques et de concevoir les nouveaux quartiers et le développement urbain en l'adaptant aux risques futurs. Se préparer au risque et rechercher la résilience sans l'aide d'un modèle conceptuel est faisable : les nombreux acteurs de la gestion des risques le prouvent quotidiennement. Toutefois se préparer au risque ne signifie pas seulement la mise en œuvre de mesures de prévention, il faut pouvoir analyser quels seront les actes les plus appropriés et savoir quelle attitude adopter dans un contexte de crise et de post-crise. Le modèle conceptuel aide à structurer les réflexions des acteurs et à cibler ou orienter les actions prioritaires. Il ne détermine pas de solutions standard, la diversité des critères affichés dans le modèle, la pluralité et la mixité des réponses possibles s'accordent avec l'objectif donné de respecter le contexte technique, urbain, territorial. Ce modèle conceptuel s'intègre dans le changement de paradigme de la gestion des risques qui prône de ne plus uniquement lutter contre l'aléa, mais plutôt de vivre avec celui-ci en réduisant les impacts négatifs (Pasche et Geisler, 2005). Il décrit une conception de la résilience en génie urbain et peut ainsi contribuer à en définir sa pratique.

31 Pour la mise en œuvre des actions, la rénovation et le renouvellement des bâtiments et espaces publics doivent donner une occasion de reconsidérer l'existant et de construire des stratégies de résilience. Une partie des stratégies peut être réalisée en synergie avec les cycles de maintenance des systèmes techniques, de modification et de renouvellement urbain (Zevenbergen C., 2007 ; Veerbeek et al, 2010). La résilience a un coût, cependant si l'adaptation s'intègre dans des dynamiques urbaines, des études montrent qu'il paraît alors extrêmement réduit à moyen terme (Van de Ven et al, 2011).

Bibliographie

- ASCE, 2009, Guiding Principles for the Nation's Critical Infrastructure : 42 p.
- Barroca, B., 2006, Risque et vulnérabilités territoriales - Les inondations en milieu urbain, Marne-la-Vallée. Doctorat en génie urbain : 340 p.
- Barthélémy, M., R. Setola, et al., 2011, "Réseaux vitaux : attention fragile." *Science et Vie* Juillet 2011 : 82-95.
- Beraud H., B. Barroca et G. Hubert, 2012, Assessing the resilience of urban technical networks : from theory to application & to waste management, 12p., in In Serre D., Barroca B., Laganier R. Resilience and Urban Risk Management, CRC Press Balkema, Taylor & Francis Group, ISBN 978-0-415-62147-2, 250 p., 12p.
- Blancher, P., 1998, Risques et réseaux techniques urbains. Lyon, Certu, Coll. Débats : Environnement.
- Blanksby, J., R. Ashley, et al., 2009, A user focused portal for awareness raising and knowledge dissemination for flood risk management. International Conference on Urban Flood Management, Road map towards a flood resilient urban environment Session. UNESCO, Paris : 8.
- Boin, A. et A. McConnell, 2007, "Preparing for Critical Infrastructure Breakdowns : The Limits of CrisisManagement and the Need for Resilience." *Journal of Contingencies and Crisis Management* : 10.
- Campanella, T., 2006, "Urban Resilience and the Recovery of New Orleans." *Journal of the American Planning Association* 72(2) : 141-146.
- Coquillard P. et D.R.C Hill., 1997, Modélisation et Simulation d'Ecosystèmes : des modèles déterministes aux simulations à événements discrets. Collection « Recherche en Ecologie », 273 pages, Masson Ed., Paris.
- COST22, 2008, Prof. Richard Ashley, Dr. Andreas Vassilopoulos, Prof. Erik Pasche, Prof. Chris Zevenbergen, UNESCO : Advances in Urban Flood Management.
- Dupuy, G., 1991, L'urbanisme des réseaux : théories et méthodes. Géographie Paris, Armand Colin, collection U.
- EEA, 2008, Impacts of Europe's changing climate - 2008 indicator-based assessment European Environment Agency.
- Felts, L., 2005, Vulnérabilité des réseaux urbains et gestion de crise, CERTU : 78 p.
- Gersonius, B., 2012, The resilience approach to climate adaptation applied for flood risk, Thèse de doctorat de Delft University of Technology, CRC Press/Balkema, ISBN 978-0-415-62485-5, 22 May 2012, 170 pages.
- Gervais, R., L. Peyras et al., 2011, "Condition evaluation of water retaining structures by a functional approach : comparative practices in France and Canada." *European Journal of Environmental and Civil Engineering* Volume 15(No. 3/2011) : pp. 335-356.
- Gourbesville, P., 2008, "Challenges for integrated water resources management." *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C Integrated Water Resources Management in a Changing World* Volume 33(Issue 5) : 284-289.
- Hernandez, J., 2009, "The Long Way Home : une catastrophe qui se prolonge à La Nouvelle- Orléans , trois ans après le passage de l'ouragan Katrina." *L'Espace géographique* 38(2) : pp. 124-138.
- Holling, C. S., 1973, "Resilience and stability of ecological systems." *Annual review of ecology and systematics* vol. 4 : 1-23.
- IPCC, 2007, Summary for Policymakers, 4th Assessment Report.
- Kwadijk, J. C. J., M. Haasnoot, J.P.M. Mulder, M. Hoogvliet, A. Jeuken, R.A.A., Van Der Krogt, N.G.C. Van Oostrom, H.A. Schelfhout, E.H. Van Velzen et H. Van Waveren, 2010, Using adaptation tipping points to prepare for climate change and sea level rise : a case study in the Netherlands. *Climate Change*, 1, 729-740.
- Lamarre, D., 2008, Climat et risques, changements d'approches, Lavoisier.
- Lhomme, S., D. Serre, 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 des géographes français* : pp. 487-502.
- Lhomme, S., D. Serre, Y. Diab et R. Laganier, 2011, A methodology to produce interdependent networks disturbance scenarios. Proceedings of the International Conference on Vulnerability and Risk Analysis

- and Management, American Society of Civil Engineers, University of Maryland, Hyattsville, MD, USA, pp. 724-731. In *Vulnerability, Uncertainty and Risk*, Ayyub B., ASCE, ISBN 978-0-7844-1170-4.
- Lhomme, S., 2012, Les réseaux techniques comme vecteur de la propagation des inondations en ville ; une contribution théorique et pratique à l'analyse de la résilience urbaine, thèse de doctorat, Université Paris Diderot.
- Migaud, D. et J.-M. Bertrand, 2012, Les enseignements des inondations de 2010 sur le littoral atlantique (Xynthia) et dans le Var, Rapport de la Cour des comptes sur les inondations de 2010 ; Cour des comptes, juillet 2012, 299 p.
- Pasche, E. et T. R. Geisler, 2005, *New strategies of damage reduction in urban areas prone to flood. Urban flood management*. London, Taylor and Francis Group : pp 101-117.
- Pelling, M., 2003, *The vulnerability of cities. Natural disasters and social resilience*. London, Earthscan.
- Petit, F., 2009, Concepts d'analyse de la vulnérabilité des infrastructures essentielles - Prise en compte de la cybernétique. Génie Civil. Montréal, Ecole Polytechnique de Montréal. PhD : 267.
- Robert, B. et L. Morabito, 2009a, Réduire la vulnérabilité des infrastructures essentielles. Lavoisier.
- Robert, B., W. Pinel, J.-Y. Pairet, B. Rey et C. Coeugnard, 2009b, Résilience organisationnelle - Concepts et méthodologie d'évaluation. 48 p. Université Polytechnique de Montréal : Centre Risque & Performance.
- Robert, B. et L. Morabito, 2009, Réduire la vulnérabilité des infrastructures essentielles, Lavoisier.
- Robert, B. et Y. Hémon, 2012, Organizational Resilience : A Multidisciplinary Sociotechnical Challenge 6p., In Serre D., Barroca B., Laganier R. *Resilience and Urban Risk Management*, CRC Press Balkema, Taylor & Francis Group, ISBN 978-0-415-62147-2, 250 p.
- Robin des Bois, 2010, Les déchets de la tempête Xynthia : 110. C'est une blague ? [En ligne] : URL : http://www.robindesbois.org/dossiers/XYNTHIA_Robin_des_Bois_30sept10.pdf
- Sanders, L., 1992, *Système de villes et synergétique*. Paris, Economica, Coll. Villes.
- Serre, D., L. Peyras, C. Curt, D. Boissier et Y. Diab, 2007, Evaluation des ouvrages hydrauliques de génie civil, *Revue Canadienne de Géotechnique, Canadian Geotechnical Journal*, n° 44, pp. 1298-1313.
- Serre, D., L. Peyras, R. Tourment et Y. Diab, 2008, Levee performance assessment : development of a GIS tool to support planning maintenance actions, *Journal of Infrastructure Systems, ASCE*, vol. 14, Issue 3, pp. 201-213.
- Serre, D., 2011, *La ville résiliente aux inondations – Méthodes et outils d'évaluation*. Mémoire d'Habilitation à Diriger les Recherches, Université Paris-Est, 173 p.
- Serre, D., B. Barroca et R. Laganier R., 2012, *Resilience and Urban Risk Management*, CRC Press Balkema, Taylor & Francis Group, ISBN 978-0-415-62147-2, 250 p.
- Toubin, M., D. Serre, Y. Diab et Laganier, 2012, An auto-diagnosis to highlight interdependencies between urban systems, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 12, 2219–2224, 2012, www.nat-hazards-earth-syst-sci.net/12/2219/2012/, doi :10.5194/nhess-12-2219-2012, 6 p.
- UN-Habitat, 2007, *Sustainable urbanization : local actions for urban poverty reduction, emphasis on finance and planning*. 21st Session of the Governance Council. Nairobi, Kenya, UN Habitat : 482.
- UNIT, 2011, *Les méthodes d'analyse de risques. Cyberrisques*.
- Veerbeek, W., R. Ashley, C. Zevenbergen, B. Gersonius et J. Rijke, 2010, *Building Adaptive Capacity For Flood Proofing In Urban Areas Through Synergistic Interventions*. First International Conference on Sustainable Urbanization (ICSU 2010). Hong Kong, China, 15-17 December.
- Ven, F. van de, Van, E. Nieuwkerk, K. Stone, C. Zevenbergen, W. Veerbeek, J. Rijke et S. Van Herk S., 2011, *Building the Netherlands climate proof. Urban areas*, 1201082-000-VEB-0003, Delft/Utrecht : Deltares/UNESCO-IHE.
- Vigneron, S., F. Dégardin et al., 2006, Réduire la vulnérabilité des réseaux urbains aux inondations. Risques naturels majeurs. CERTU, C. d. l'Est and C. Sud-Ouest, Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable : 112 p.
- Zevenbergen, C., 2007, *Adapting to Change : Towards Flood Resilient Cities*, UNESCO-IHE, Delft. ISBN : 978-90-73445-18-5.
- Zevenbergen, C., A. Cashman et al., 2011, *Urban Flood Management*. London, UK, Taylor and Francis Group.

Notes

1 La notion d'actant a été exposée dans différents travaux de sociologie, il est repris ici afin de signifier la volonté d'intégrer les acteurs (humains) et les systèmes techniques dans une même analyse.

2 Actuellement, en France, le risque d'inondation représente 80 % du coût des dommages imputables aux risques naturels, soit une moyenne de 250 millions d'Euros par an. Cela constitue la contribution la plus importante de la caisse centrale de réassurance (<http://www.developpement-durable.gouv.fr/Prevention-des-risques-.html>). Une commune sur trois est concernée dont quelques 300 grandes agglomérations. Au total 4,5 millions de personnes habitent dans 20.000 km² de zones inondables.

3 En France, un projet de loi a pour but de réformer le régime d'indemnisation des catastrophes naturelles (CATNAT). Ce projet a été adopté par le Conseil de ministres du 2 avril 2012, et devra être examiné lors de la prochaine législature. Il prévoit de moduler, en fonction du niveau d'exposition et des mesures de prévention prises par les assurés, les primes d'assurances pour les collectivités locales et les entreprises. Le système assurantiel français gardait jusqu'alors un niveau de cotisation indépendant de la situation des biens face aux risques naturels. Le projet de loi est consultable sur : <http://www.senat.fr/leg/pjl11-491.html>

4 En France, malgré une réglementation très contraignante sur l'implantation des enjeux en zone inondable, la pression foncière a abouti à y augmenter les constructions de logements, de bureau, entreprises... Par exemple, le département du Val-de-Marne limitrophe de Paris à un taux de construction élevé de logements dans les zones inondables (plus de 8 000 logements créés entre 1999 et 2006).

5 International Panel on Climate Change

6 Différents indicateurs de redondance des réseaux peuvent exister, certains étant développés dans le but d'évaluer la vulnérabilité des systèmes techniques face au risque inondation (Lhomme, 2012).

7 Cela peut avoir une signification difficile à saisir quand il est appliqué à l'urbain (voir : Campanella 2006), il faut alors bien distinguer recovery signifiant la capacité à récupérer de rebuilding terme qui se limite à la reconstruction.

8 Soit environ 7 000 tonnes de déchets sur les deux communes (Robin des Bois (2010). Les déchets de la tempête Xynthia : 110).

9 À noter que dans la situation exceptionnelle des inondations causées par Katrina en 2005 à la Nouvelle-Orléans, en 2012, les déchets post-catastrophes restent en partie visibles sous la forme d'amas dans la ville.

Pour citer cet article

Référence électronique

Bruno Barroca, Damien Serre et Diab Youssef, « Le concept de résilience à l'épreuve du génie urbain », *VertigO - la revue électronique en sciences de l'environnement* [En ligne], Volume 12 Numéro 2 | septembre 2012, mis en ligne le 20 septembre 2012, consulté le 07 juin 2013. URL : <http://vertigo.revues.org/12469> ; DOI : 10.4000/vertigo.12469

À propos des auteurs

Bruno Barroca

Université Paris-Est Marne-la-Vallée, Département Génie Urbain – 77420 Champs-sur-Marne,
Courriel : bruno.barroca@univ-mlv.fr

Damien Serre

Université Paris-Est, École des Ingénieurs de la Ville de Paris – 75010 Paris, courriel :
damien.serre@eivp-paris.fr

Diab Youssef

Université Paris-Est Marne-la-Vallée, Département Génie Urbain – 77420 Champs-sur-Marne,
Courriel : youssef.diab@univ-mlv.fr ;

Droits d'auteur

© Tous droits réservés

Résumés

Chaque événement naturel appliqué sur des territoires urbains révèle la limite des stratégies actuelles de gestion des risques et montre l'importance prépondérante des réseaux techniques dans la gestion de la crise et de l'après-crise. Le génie urbain permet d'analyser, par une approche transversale, d'une part l'analyse des contraintes techniques qui amènent à la conception et à la gestion des réseaux, d'autre part l'inscription de ces réseaux dans les territoires et dans les usages. Ainsi, le réseau dépasse l'unique objet dédié au fonctionnement urbain et s'insère dans un ensemble d'éléments en relation dont le fonctionnement s'apparente à un système technique. Pour comprendre et analyser les risques urbains, de type naturel ou technologique, appliqués à des systèmes techniques, le concept de résilience permet de dépasser les ambitions de fiabilisation souvent sectorielles des réseaux techniques. La résilience est un concept récent dans les sciences du territoire. Ce concept s'applique généralement à des systèmes et aborde le risque par l'adaptation des enjeux, l'absorption de l'aléa, la récupération du territoire après la crise. Pour aborder la résilience, le génie urbain doit redéfinir sa façon d'aborder la relation entre le risque et les systèmes techniques et se doter d'un référentiel.

Cet article présente un modèle conceptuel de résilience pour les systèmes techniques qui repose sur l'identification de trois types de résilience complémentaires. La résilience fonctionnelle représente la capacité d'un système technique à se préserver de dommages importants tout en assurant au minimum le service nécessaire aux infrastructures critiques. Par la résilience fonctionnelle, les systèmes techniques cherchent de manière intrinsèque à augmenter leur propre résilience. La résilience corrélative caractérise la relation entre la demande de service et la capacité du système technique à y répondre. Diminuer la sollicitation faite à un système peut permettre de le maintenir en fonctionnement et de le protéger afin qu'il se rétablisse plus rapidement. Il s'agit d'adapter la demande à la capacité des systèmes techniques. Au-delà de la crise et de sa gestion, le retour à une situation « viable » est aussi un élément d'appréciation de la résilience. Des relations de solidarité entre les systèmes techniques et d'autres territoires peuvent aussi constituer un facteur de résilience des systèmes techniques. La résilience territoriale exprime cette capacité à mobiliser un territoire bien au-delà de l'espace impacté.

Every natural event impacting urban territories reveals the limits of present risk management strategies and shows the prominent role played by technical networks in crisis and post-crisis management. By means of a transversal approach, urban engineering can be used for analysing technical constraints that lead to the way networks are designed and managed, on the one hand, and to including these networks into territories and habits, on the other. In this way, a network goes beyond being just an object devoted to helping urban activities operate and it becomes a part of a set of inter-related elements, whose operation is similar to that of a technical system. For understanding and analysing urban risks of a natural or technological nature applied to technical systems, using the resilience concept enables us to go beyond technical networks' reliability objectives, which are often sector-based. Resilience is a recent concept in territorial sciences. The concept is generally applied to systems and deals with risks by the adapting issues at stake, absorbing hazards and the making the territory recover after the crisis. To be able to tackle resilience, urban engineering must redefine the way in which it handles the relations between risks and technical systems and endow itself with a reference tool.

This article presents a conceptual model of resilience for technical systems based on identifying three complementary types of resilience. Functional resilience represents a technical system's capacity to protect itself from important damage and at least provide the service needed for critical infrastructures to operate at the same time. Through functional resilience, technical systems intrinsically endeavour to increase their own resilience. Correlative resilience characterises the relation between service requirements and the technical system's capacity to fulfil these requirements. Reducing the demand made on a system may

enable it to be kept in operation and be protected so that it can recover more rapidly. This means adapting demand to technical systems' capacity. Over and above the crisis and its management, the return to a "viable" situation is also an element for assessing resilience. Interdependence relations between technical systems and other territories may also form a resilience factor in technical systems. Territorial resilience expresses the capacity to mobilize a territory outside the area impacted.

Entrées d'index

Mots-clés : résilience, modèle conceptuel, génie urbain, réseaux, inondation, urbain, Ville, systèmes techniques

Keywords : resilience, conceptual model, urban engineering, networks, inondation, urban, city, technical systems