



HAL
open science

Les réseaux techniques face aux inondations ou comment définir des indicateurs de performance de ces réseaux pour évaluer la résilience urbaine

Serge Lhomme, Damien Serre, Youssef Diab, Richard Laganier

► To cite this version:

Serge Lhomme, Damien Serre, Youssef Diab, Richard Laganier. Les réseaux techniques face aux inondations ou comment définir des indicateurs de performance de ces réseaux pour évaluer la résilience urbaine. Bulletin de l'Association de géographes français, 2010, pp.487-502. hal-00580025

HAL Id: hal-00580025

<https://hal.science/hal-00580025>

Submitted on 25 Mar 2011

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

***Les réseaux techniques face aux inondations
ou comment définir
des indicateurs de performance de ces réseaux
pour évaluer la résilience urbaine***

(URBAN NETWORKS AND FLOODS :
HOW TO DEFINE PERFORMANCE INDICATORS
TO EVALUATE URBAN RESILIENCY)

Serge LHOMME^{*}, Damien SERRE^{}, Youssef DIAB^{***}
& Richard LAGANIER^{****}**

RÉSUMÉ – *La résilience est un concept polysémique et pluridisciplinaire. Son introduction dans le domaine de la gestion des risques soulève un certain nombre de questions. Quelle définition donner à la résilience urbaine ? Comment placer ce concept par rapport aux concepts préexistants en gestion des risques ? Comment étudier la résilience urbaine ? Nous définissons la résilience urbaine comme la capacité d'une ville à absorber une perturbation et à récupérer ses fonctions à la suite de celle-ci. De plus, nous plaçons ce concept et celui de la vulnérabilité dans un même continuum. Puis, nous proposons d'étudier la performance des réseaux techniques urbains pour évaluer la résilience urbaine en s'appuyant sur une approche systémique de la ville face aux risques d'inondations.*

Mots-clés : *Résilience ; Vulnérabilité ; Approche systémique ; Réseaux techniques urbains*

ABSTRACT – *In France, as in the rest of Europe, river floods have been increasing in frequency and severity, there are more and more instances of rivers bursting their banks, aggravating the impact of the flooding of areas supposedly protected by flood defenses. These circumstances oblige to manage flood risk by integrating new concepts like urban resilience design. We define urban as the capacity of a city to absorb disturbance and to recover its functions after it. Moreover we use this concept in the*

* Université Paris-Est, Ecole des Ingénieurs de la Ville de Paris, 15 rue Fénelon, 75010, Paris & Université Paris Diderot-Paris 7, UMR PRODIG, serge.lhomme@eivp-paris.fr

** Université Paris-Est, Ecole des Ingénieurs de la Ville de Paris, 15 rue Fénelon, 75010, Paris, damien.serre@eivp-paris.fr

*** Université Paris-Est, Ecole des Ingénieurs de la Ville de Paris, 15 rue Fénelon, 75010, Paris, youssef.diab@eivp-paris.fr

**** Professeur à l'Université Paris Diderot-Paris 7, UMR PRODIG, case postale 7001, 75205 Paris Cedex 13, richard.laganier@paris7.jussieu.fr

continuity of vulnerability studies. Then we propose to study urban networks performance for assessing urban resilience. For this we use a systemic approach.

Key-words: *Resilience; Vulnerability; Systemic approach; Urban networks.*

En France, une commune sur trois est concernée par le risque inondation, pour un coût annuel estimé à environ 250 millions d'euros, soit la première cause d'indemnisation pour les assurances en matière de risques naturels. Or, d'après une étude de l'*European Environment Agency*, les coûts induits par les risques d'inondation vont augmenter de manière significative. En effet, le coût économique de ces risques devrait atteindre dans le monde la valeur de 100 milliards d'euros par an à la fin du siècle, dont environ 75 % de ces dommages seraient recensés en milieu urbain. On peut d'ailleurs déjà constater une certaine augmentation des fréquences et de la sévérité des inondations en Europe [Szöllösi-Nagy & Zevenbergen, 2005] entraînant des coûts supplémentaires pour les collectivités européennes, et ce malgré les investissements déjà réalisés pour les limiter. Pour s'adapter et ainsi réduire ces coûts, les politiques de gestion des risques doivent être repensées [Ashley et al., 2007]. Cependant, quatre facteurs compliquent cette gestion :

- la croissance urbaine [www.floodresiliencgroup.org] ;
- les possibles conséquences du réchauffement climatique [IPCC, 2007] ;
- les incertitudes concernant l'analyse des différents aléas ;
- des systèmes de protection vieillissants et le manque de moyens de maintenance.

De plus, les sociétés modernes sont devenues aujourd'hui très sensibles aux risques et leur perception a été sensiblement modifiée. C'est pourquoi, si la gestion des risques fut très centrée sur l'aléa, se limitant presque exclusivement à des solutions techniques de réduction de l'aléa, elle s'est progressivement orientée vers des politiques de réduction des vulnérabilités aux risques et encore plus récemment vers des politiques d'amélioration de la résilience. Afin d'en comprendre les évolutions les plus récentes, la notion de ville résiliente sera analysée, tout comme son insertion dans les modes de gestion des risques. Ce point de départ conduira à proposer une approche systémique de la ville résiliente et une analyse des défaillances de ses réseaux techniques face aux risques d'inondation. Dès lors, il sera possible de présenter un ensemble d'indicateurs de résilience de ces réseaux élaboré pour le suivi et l'amélioration de la résilience urbaine.

1. Qu'est-ce qu'une ville résiliente ?

1.1 Le concept de résilience

La résilience au sens étymologique du terme « resilio, resilire » a plusieurs significations qui semblent avoir donné naissance à deux termes bien distincts. Une signification correspond au fait de renoncer, de se dédire [Gaffiot]. Un verbe découle de cette signification, le verbe résilier. Une deuxième signification correspond au fait de sauter en arrière ou de rebondir [Gaffiot]. En anglais, ce terme est traduit par « bouncing back » [Klein & al., 2003 ; Paton & Johnston, 2006].

Au-delà du sens étymologique, la résilience est désormais utilisée dans de nombreuses disciplines. Cependant, la première application du mot résilience dans les sciences provient de l'étude des matériaux [Dauphiné, 2007]. En effet, le terme a été introduit à la suite des travaux de Charpy – le mouton de Charpy. Le test consiste à rompre un matériau – un barreau entaillé, appelé parfois éprouvette – à l'aide d'un mouton-pendule. Pour un chercheur travaillant dans le domaine des risques naturels, le concept de résilience est ici lié au phénomène de rupture qui peut correspondre davantage à un phénomène de résistance. Le concept de résilience n'apporte alors rien de très novateur. D'ailleurs, on retrouve cette fine frontière entre cette vision du concept de résilience et la résistance dans les écrits sur cet essai. « *L'essai Charpy a pour but de déterminer la résistance aux chocs des matériaux. Il permet de mesurer leur résilience* » [Pineau]. Il y a alors confusion entre résilience et résistance. Cependant, les travaux de Charpy n'étudient pas les phénomènes liés à cette rupture. Or, les études de ces phénomènes, qui prennent la suite des travaux de Charpy, vont introduire la notion de ductilité. La ductilité s'oppose à la fragilité et correspond à la plus ou moins grande capacité d'un matériau à se déformer sans se rompre. Les matériaux ont ainsi une plus ou moins grande ductilité qui est fonction de leur capacité de déformation élastique (le matériau revenant à son état initial à la suite du choc, le module de Young) et plastique (le matériau ne revenant pas à son état initial à la suite du choc ou à une déformation subie). Ainsi, le concept de résilience, comme il est défini ici, est fonction des capacités élastique et plastique. Dans cet article, ce sont précisément les facteurs qu'introduisent ces capacités qui vont nous intéresser.

La deuxième discipline scientifique à avoir introduit la notion de résilience est l'écologie. L'écologie a fortement contribué à développer les recherches sur ce concept. Son étude est importante, car cette discipline s'est, depuis plusieurs années, intéressée aux travaux d'autres disciplines, comme les sciences humaines. Ainsi, il n'est plus question d'étudier les écosystèmes isolément, mais d'étudier ces écosystèmes en relation avec des systèmes sociaux. On parle alors de système socio-écologique ou d'écologie humaine. La résilience, en écologie, a été définie comme « *la mesure de la persistance d'un système et ses*

capacités à absorber des perturbations et à maintenir les mêmes relations entre les populations ou les différents états du système » [Holling, 1973]. Dès l'utilisation (ou intégration) de la résilience dans les sciences écologiques, il n'est pas question de retour à l'équilibre, correspondant à un retour à l'état initial qui caractérise la stabilité du système et qu'Holling oppose à la résilience. En fait, l'étude du retour à l'équilibre pour qualifier la résilience est née d'un autre courant de pensée, qualifié d'« engineering resilience », qui ne découle pas des travaux de Holling, mais de chercheurs jugeant ce concept comme non opérationnel et doutant de la définition donnée [Pimm, 1984]. Davantage dans la lignée des travaux de Holling, le courant nommé « ecological resilience » s'intéresse aux différents états d'équilibre des systèmes dynamiques que sont les écosystèmes.

Dans sa première définition Holling associe résilience et persistance. La résilience peut alors se calculer pour un écosystème en calculant une probabilité d'extinction d'une espèce. Cependant, un système qui persiste en dépit d'une perturbation, en changeant presque totalement sa structure qualitative, peut être considéré comme n'étant plus résilient [Holling, 1995]. Ainsi, un système, pour être considéré comme résilient, doit maintenir une certaine structure qualitative, qui lui permettra de continuer à fonctionner ou à répondre à une partie de ces fonctions. Dans le cas contraire, on préférera considérer qu'il y a eu bifurcation, ce qui peut être considéré comme ne faisant plus partie du caractère de résilience. Holling révisé donc sa définition : « la résilience correspond à la capacité d'un système à absorber des perturbations, ou à l'ampleur maximale d'une perturbation qui peut être absorbée par un système avant que celui-ci change sa structure en modifiant les variables et les processus qui contrôlent son comportement » [Holling, 1995].

	Etymologie	Ecosystème Holling(1973)	Ecosystème Pimm(1984)	Socio-Ecosystème Holling (2002)
Saut/retour en arrière (état initial)	X		X	
Rebond (absence retour en arrière)	X	X		X
Persistance		X	X	
Cycle adaptatif/ Adaptation				X

Tableau 1 – Evolution du concept de résilience (de l'étymologie à son application en écologie)

La résilience connaît alors un tournant avec la synthèse de travaux issus des sciences sociales. Une organisation de chercheurs nommée « résilience alliance » voit le jour [www.resalliance.org] et les concepts de cycles adaptatifs et

de *panarchy* sont élaborés [Holling & Gunderson, 2002]. La résilience s'affranchit presque totalement des concepts de retour à l'équilibre et tend à s'intéresser presque exclusivement aux capacités adaptatives des systèmes, associant adaptation et résilience (Tab. 1).

En s'émancipant notamment des principes de retour à l'équilibre, le terme de résilience a-t-il dévié de son sens étymologique premier ? En effet, ce terme s'est concentré sur les capacités de rebond, car c'est ce qui intéresse les chercheurs actuellement dans ce concept, toutes disciplines confondues. Ainsi, la notion de retour en arrière, présente dans les sens étymologiques du terme, disparaît car elle peut être dans la plupart des cas préjudiciable. Ainsi, la résilience tend à être synonyme d'adaptation, vision beaucoup plus large que les visions précédentes. Cependant, il semble qu'il n'y ait pas eu de bouleversement du terme malgré son application dans divers champs disciplinaires, mais une évolution tendant à différer du sens premier, en l'associant dans chaque discipline à des termes plus ou moins voisins (Fig. 1). La réelle question est alors de savoir si ce concept est enrichi par cette variété disciplinaire ou bien complexifié par celle-ci.

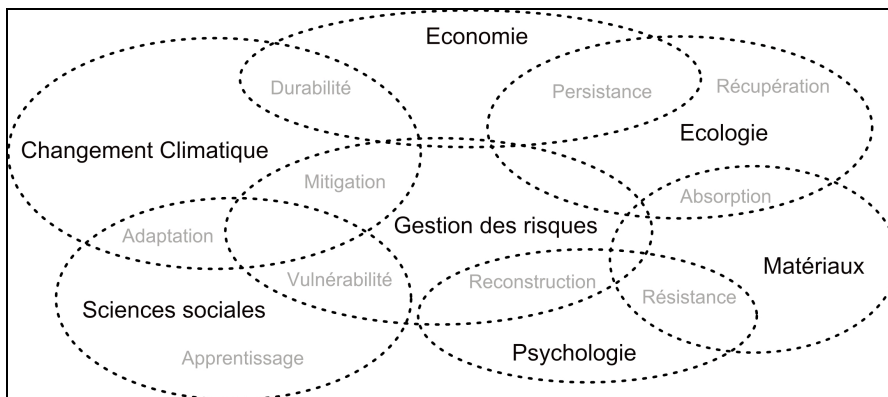


Figure 1 – Résilience et notions associées dans différentes disciplines – Arc en ciel ou nuage de sens ?

Pour nous, la résilience se différencie de l'adaptabilité, car nous lions progressivement le concept de résilience à des notions d'absorption et de récupération, correspondant davantage à des capacités de réponse face à une perturbation et de remise en service. En effet, nous définissons la résilience comme la capacité d'un système à absorber une perturbation et à récupérer ses fonctions à la suite de cette perturbation. Ainsi, en termes généraux, les capacités d'adaptation englobent les capacités de réponse. Ainsi, la résilience ne peut pas être définie comme la capacité à s'adapter à une perturbation, car l'adaptation semble avoir une signification plus large que les simples capacités de réponse. Cependant, il semble pertinent de reconnaître que l'adaptabilité est

nécessaire à la résilience, que ce soit dans le processus de résilience à la suite d'une perturbation, on parlera de résilience corrective, ou que ce soit concernant les qualités d'apprentissage nécessaires à l'adaptabilité et au processus de résilience, on parlera de résilience proactive.

1.2. La ville

La diversité des villes – tailles, formes, fonctions... – entraîne très vite une grande complexité des modèles sensés étudier le phénomène urbain – dynamiques urbaines, analyses spatiales... De plus, comme la ville est un objet à la fois économique et social, de nombreuses disciplines l'ont étudiée au travers de différentes méthodes et modèles qui ont fragmenté les connaissances acquises – économie, géographie, sociologie... Ainsi, en se complexifiant et en se fragmentant, ces théories et modèles n'ont pas favorisé une connaissance globale du phénomène urbain. Et pourtant, depuis les années 1970, la naissance du courant de pensée systémique, qui est né de la prise de conscience de la complexité du monde et des limites de la pensée classique pour étudier les systèmes complexes, a offert à l'étude du phénomène urbain des méthodes et des outils permettant des approches pluridisciplinaires afin d'étudier des systèmes complexes comme la ville.

Ce qui rend cette tentative de définition encore plus difficile, c'est que les sociétés évoluent. Par conséquent leur définition de la ville évolue aussi car, en réalité, la ville n'est pas identifiée uniquement par des éléments objectifs. La ville est également un espace perçu et vécu par ses habitants. La ville constitue donc un objet complexe en ce sens qu'elle est doublement partagée, par ceux qui la vivent – résidents, firmes, organisations... –, et par ceux qui la pensent – aménageurs, politiques, chercheurs... Ainsi, les villes se révèlent être la projection sur une fraction de l'espace, des conditions naturelles, des héritages de l'histoire, du jeu des forces économiques, des progrès techniques, du génie créateur des architectes, des contraintes administratives et du régime politique. En outre, la difficulté de saisir l'objet ville par une approche directe témoigne de sa complexité et suggère de la considérer comme un système complexe.

La ville n'est donc pas seulement une concentration d'habitations, de population ou d'entreprises. La ville est un ensemble d'interactions entre ses différents composants rendues possibles notamment par la structure de ses réseaux techniques. La ville est un carrefour où tous les composants se nouent, les réseaux permettant à la ville de remplir diverses fonctions : bancaire, commerciale, administrative, hospitalière, éducative... Par conséquent, ces fonctions urbaines peuvent être mises à mal lors d'une perturbation des réseaux qui la structurent. De plus, ces fonctions peuvent être perturbées alors même que la ville n'est pas directement et matériellement impactée par l'altération des espaces et des réseaux extra-urbains dont elle dépend.

1.3 La résilience urbaine

Si l'on suit Campanella, la résilience urbaine peut être définie comme « la capacité d'une ville à faire face à un événement destructeur tout en minimisant ces dommages » [Campanella, 2006]. Cette vision de la résilience en fait un concept générique de la gestion des risques. Cette définition met en relief l'aspect opérationnel de la résilience qui tendrait à diminuer les dommages provoqués par une perturbation. Dans son étude sur la résilience des villes, il constate que toutes les villes perdurent dans le temps et que rares sont les villes qui ont disparu. Ville et résilience seraient donc un pléonasme. En effet, les villes se sont généralement implantées dans des lieux où elles ont pu prospérer et où elles étaient généralement indispensables. L'exemple de la Nouvelle-Orléans est un bon exemple, puisque de nombreux journaux prédisaient la fin d'une ville qui était faite, par sa situation, pour être détruite et qu'il valait peut-être mieux ne pas la reconstruire. Or, aujourd'hui, les processus de reconstruction sont à l'œuvre. Pour Campanella, la population est le facteur principal de la reconstruction. Il omet cependant que certaines conditions vont influencer sur ce comportement, bien qu'il en fasse l'état au début de son étude. De plus, il y a confusion entre la notion de persistance et de résilience. Comme expliqué précédemment, le système doit conserver une même structure qualitative, le seul fait de persister n'est pas obligatoirement une preuve de résilience du système.

Quels sont les facteurs qui vont influencer sur cette reconstruction ? Pour la résilience urbaine, quelques études mettent en exergue l'importance de certains facteurs dans les processus de reconstruction :

- importance du voisinage [Wallace & Wallace, 2008] \ importance des réseaux locaux [Hernandez, 2009] ;
- importance de l'éducation [Hernandez, 2009] : la reconstruction est un processus complexe où il faut être capable de comprendre les formalités administratives ;
- importance des réseaux techniques et des services urbains [Hernandez, 2009 ; Campanella, 2006].

Dans les facteurs de résilience cités ci-dessus, aucune référence à une éventuelle résilience des bâtiments. On le comprend aisément car ces études font référence à des événements terriblement destructeurs nécessitant des reconstructions, faisant par là même du mot résilience un synonyme de reconstruction. De plus, évaluer la résilience d'une ville ne revient pas à évaluer simplement la résilience de ses constructions. En effet, la résilience est un concept bien plus complexe qui nécessite de s'intéresser aux interrelations entre les différents composants d'une ville et aux fonctions de celle-ci. Comme nous l'avons souligné plus haut une ville ne peut être considérée comme une concentration d'habitations. D'ailleurs, les différentes études sur la résilience font expressément référence aux notions de système – écosystèmes, systèmes

sociaux [Holling, 1973 ; Folke, 2006]. Une piste pour évaluer la résilience urbaine est alors de considérer la ville comme un système.

L'étude de la résilience des bâtiments apporte cependant des aspects nouveaux pour la gestion des risques : en se concentrant sur la limitation des dommages intérieurs ; en privilégiant les pièces principales hors d'eau, plutôt qu'au rez-de-chaussée ; en installant du mobilier facilement déplaçable en cas de crue ; en faisant rentrer l'eau à l'intérieur du bâtiment pour équilibrer les pressions s'exerçant sur la structure du bâtiment. A l'échelle du quartier, l'idée est de redonner sa place à l'eau, en permettant une inondation acceptable de certaines zones. Pour cela, les rues joueront le rôle de cours d'eau [Serre & al., 2010].

La résilience urbaine dans le domaine de la gestion des risques ne constitue pas un nouveau paradigme : la résilience se place pour l'instant dans un continuum avec les travaux sur l'évaluation et la réduction de la vulnérabilité. Ces deux termes se différencient essentiellement par des aspects subjectifs. Ainsi, la résilience apparaît être une notion positive et la vulnérabilité une notion négative. En effet, quand on évoque la résilience urbaine, la ville s'adapte et résiste. Par contre, quand on évoque la vulnérabilité urbaine, la ville est sujette aux risques. Cependant, ce qui différencie ces deux notions, nous semble davantage être un point de vue centré sur des notions d'endommagement pour la vulnérabilité et des notions de récupération fonctionnelle – rétablissement – pour la résilience (Fig. 2). Malgré un certain vide théorique – définition, évaluation... –, l'application du concept de résilience contribue déjà à apporter certaines solutions nouvelles pour la réduction des dommages provoqués par des événements majeurs et à améliorer la compréhension des mécanismes de reconstruction. Il s'agit d'évaluer la capacité à fonctionner malgré la perturbation de certains composants du système urbain, c'est-à-dire la capacité à fonctionner en mode dégradé, et les capacités de remise en service des composants perturbés.

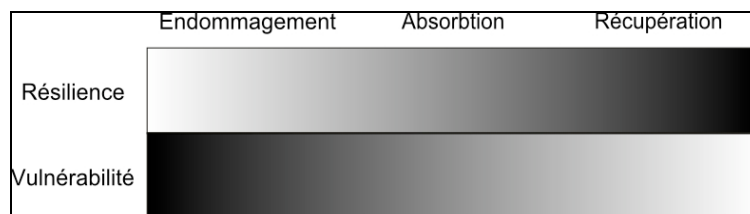


Figure 2 - Vulnérabilité et résilience - un continuum différencié par un point de vue centré sur des notions d'endommagement pour la vulnérabilité et des notions de récupération fonctionnelle pour la résilience

2. Analyse de la ville et de ses réseaux techniques face aux risques d'inondation

La ville peut être considérée comme un système et même comme un système à l'intérieur d'un système de villes [Berry, 1964]. D'ailleurs, une littérature importante confirme l'importance de ces méthodes pour étudier le phénomène urbain [Pumain & al., 1995 ; Sanders & al., 1992]. Ces travaux ont déjà donné naissance à des modèles complets, souvent liés à la dynamique urbaine, mais peu applicables à notre problématique. C'est pourquoi nous proposons une nouvelle approche.

2.1. Le système-ville

La dynamique des systèmes urbains est fortement liée à l'activité économique [Vilmin, 2008]. En effet, l'activité économique, par la création d'emplois qu'elle engendre, attire la population au cœur du système. Dans un premier temps, cette population est venue des campagnes, c'est d'ailleurs cet exode rural, à partir de la révolution industrielle, qui illustre le mieux l'importance de l'activité économique concernant le dynamisme d'une ville. Aujourd'hui, cela s'illustre par l'attraction qu'une ville exerce sur les populations d'une autre ville, mais ce côté concurrentiel entre pôle d'emplois souligne alors l'importance d'autres composants urbains permettant d'accueillir les populations : ce sont les logements et les équipements qui en découlent. On obtient alors avec un système circulaire :



Figure 3 - Une vision simplifiée des dynamiques urbaines
NB : Les flèches symbolisent l'attraction d'un élément sur un autre

Cependant, il semble important de décomposer les équipements en deux composants distincts : (1) les systèmes techniques – les réseaux –, (2) les infrastructures publiques qui vont constituer le cœur de la ville, avec ses organes décisionnels locaux – mairie –, ses fonctions « régaliennes » – police, justice – et ses fonctions non marchandes – éducation, santé... Ces deux catégories se distinguent par leur nature : linéaire/ponctuel, technique/social, contenu/contenant. En outre, la logique linéaire de la modélisation ci-dessus – les événements se déroulant dans un sens précis et déterminé – est aujourd'hui obsolète. En effet, c'est l'imbrication des composants urbains et leurs interrelations autour de son centre décisionnel qui produit sa dynamique. Il est aussi nécessaire de représenter le support sur lequel se développe cette dynamique et y contribue directement : le milieu physique (Fig. 4).

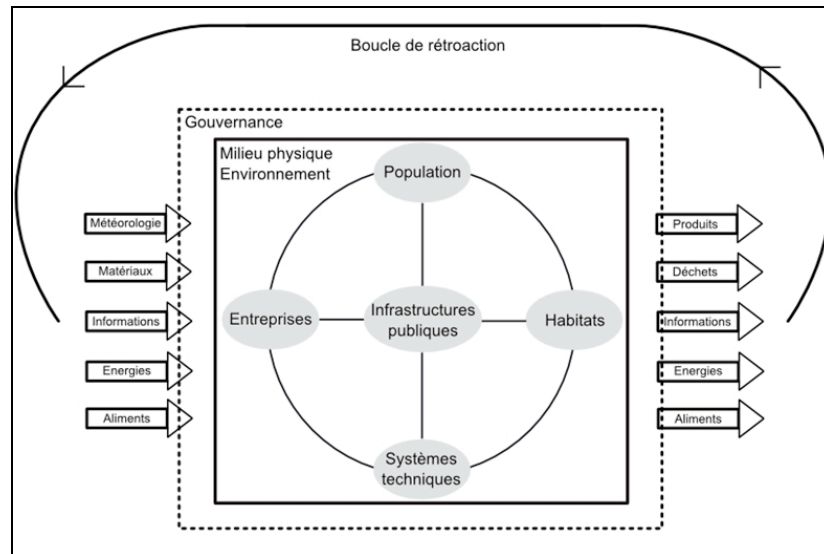


Figure 4 - Modélisation du système urbain

La ville est considérée comme un système ouvert. Il convient alors d'étudier les relations que la ville entretient avec son environnement. Par exemple, les relations villes – campagnes sont très importantes et permettent à la ville d'assurer sa survie. En effet, la ville reçoit en entrée une certaine quantité de matières premières et de denrées pour ses propres besoins, mais aussi pour en assurer le conditionnement et la production en produits finis qu'elle pourra échanger avec d'autres villes. Les échanges avec les autres villes constituent le deuxième type de relation avec l'environnement du système, et correspondent généralement à des échanges de biens manufacturés. L'une des principales productions de la ville, qui constitue d'ailleurs un enjeu majeur pour celle-ci, sont les déchets. Cette production va mettre en relief une caractéristique de l'analyse systémique : les rétroactions. En effet, les déchets peuvent être considérés comme des éléments en sortie du système, mais ils ne sont pas sans conséquences pour la ville et son environnement. Le dernier élément rentrant, qui est primordial quand on traite du risque inondation, c'est bien sûr la météorologie.

Enfin, se pose la question de la frontière du système. Or cette frontière est difficile à établir. De plus, l'influence d'organes décisionnels d'échelles supérieures – département, état... – complexifie la modélisation. Il semble alors important de représenter dans cette modélisation ces pouvoirs d'échelles supérieures, le terme choisi ici étant celui de gouvernance. Notre limite, dans notre cas, correspondrait aux limites administratives (Fig. 4).

2.2. La prise en compte des enjeux

La ville développe des interactions entre les personnes, les activités et les biens, mais si la densité d'occupation du sol induit par la ville – activités, habitats, infrastructures... – produit des richesses et des facilités, elle produit aussi de la vulnérabilité et par conséquent des risques. En considérant la ville comme un système, nous avons mis en relief les interrelations entre les différents composants urbains. Il est alors intéressant d'étudier ces interrelations à la suite d'une perturbation en partant du modèle urbain réalisé. Ainsi, à partir de l'étude des différents composants urbains et de leurs vulnérabilités face aux risques d'inondation, il est possible de modéliser le milieu urbain en période de crue. Il apparaît alors que, de par leurs contraintes d'implantations et leurs structures, les réseaux constituent non seulement « la porte d'entrée » de l'inondation en milieu urbain, mais aussi « la porte d'entrée » du risque compte tenu des effets dominos pouvant être induits par ces réseaux. Ensuite, l'inondation se propage à travers les réseaux, la voirie servant alors cette propagation à la suite de la surcharge du réseau d'eau pluviale, en suivant plusieurs scénarios possibles. On peut alors proposer une approche systémique de la ville face au processus d'inondation (Fig. 5).

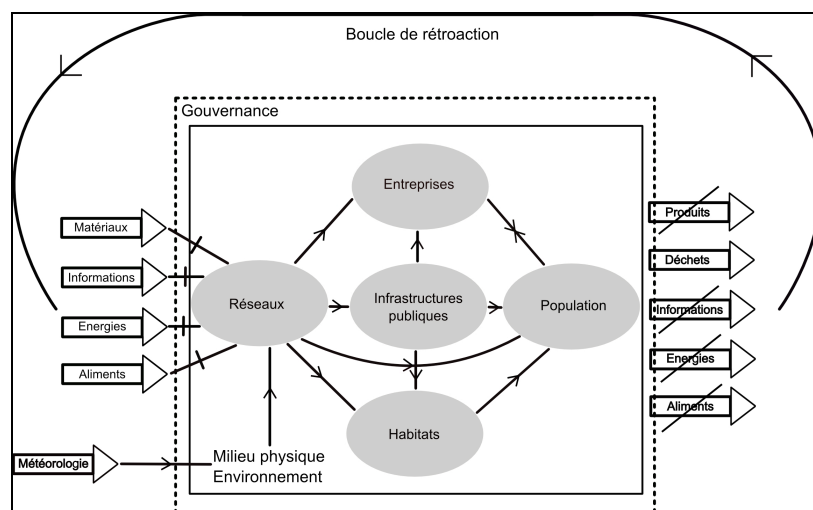


Figure 5 - Les réseaux techniques et la propagation du risque inondation dans la ville (Figure 2).

Par exemple, on peut concevoir que 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 de tous les composants urbains, comme des infrastructures publiques qui assurent certaines fonctions urbaines.

2.3 Les réseaux techniques et l'analyse de risque

Pour construire une ville résiliente, il ne suffit donc pas de construire des bâtiments résilients. Il semble, dans un premier temps, davantage nécessaire d'avoir des réseaux techniques résilients. C'est pourquoi l'étude de la performance de ces réseaux est un point crucial. Pour cela, nous appliquons aux systèmes réseaux des méthodes systémiques d'analyse de risques issues des méthodes de sûreté de fonctionnement. La sûreté de fonctionnement est la science des défaillances [Zwingelstein, 1995] par exemple. Ces méthodes ont été à l'origine développées pour étudier des systèmes industriels aux fonctionnements complexes pour lesquels il est très difficile, voire impossible, de produire un modèle de fonctionnement par des approches physiques classiques. Or, comme nous l'avons vu, le milieu urbain constitue bien un système complexe. Ces méthodes paraissent donc applicables.

L'analyse des modes de défaillances et de leurs effets (AMDE) est une méthode inductive d'analyse des défaillances potentielles d'un système, qui considère chacun des composants du système et analyse ses modes de défaillances [Serre & al., 2008]. Ces analyses permettent alors de mieux comprendre comment ces systèmes fonctionnent avant, pendant et après l'inondation. L'avantage est qu'on peut, à partir de cette compréhension, établir des scénarios de défaillances.

3. L'élaboration d'indicateurs de performance des réseaux techniques urbains

Il existe deux modes d'endommagement principaux qui impliquent d'une part les infrastructures, d'autre part les usages. Il s'agit par exemple de distinguer le réseau support et le réseau service [Reghezza & Gleyse, 2007]. Les distinctions infrastructure/usage et support/service décrivent deux aspects d'un système technique, l'aspect matériel et fonctionnel. En termes de risque, on parlera de risque fonctionnel ou de risque matériel. Il existe aussi un troisième niveau de risque qui a émergé récemment, le risque structurel [Reghezza & Gleyse, 2007].

3.1 Trois niveaux de risque, donc trois indicateurs de résilience des réseaux ?

Il semble possible de distinguer le risque matériel et le risque fonctionnel. Pour un réseau, le risque matériel correspondra alors aux possibles dégradations d'un aléa sur l'infrastructure du réseau, tandis que le risque

fonctionnel correspondra à la possible dégradation du service rendu. Comme les valeurs matérielles sont facilement évaluables, l'évaluation du risque matériel d'un système en termes économique est possible. Par contre, il en va autrement pour le risque fonctionnel qui est difficilement évaluable. Par exemple, d'un point de vue économique, il est en effet difficile d'évaluer la désorganisation des services offerts aux usagers et les coûts indirects qui lui sont liés. En tenant compte des problématiques liées à la distinction de ces deux niveaux de risque, on peut intégrer les niveaux matériels et fonctionnels à l'aide d'un niveau structurel [Reghezza & Gleyse, 2007]. Ainsi des indicateurs de vulnérabilité structurelle des réseaux ont été déterminés [Gleyse, 2005]. Dans cette perspective le niveau structurel, qui étudie la trame du réseau, constitue un niveau intermédiaire, car c'est la configuration du réseau, dont certains composants peuvent être endommagés, qui déterminera la détérioration du service offert par ces endommagements.

Le risque est donc composé d'un triptyque de niveau matériel, structurel et fonctionnel. Le processus de résilience tendrait alors à limiter les conséquences d'un événement majeur sur ces trois aspects du risque (Fig. 6). Deux solutions sont alors possibles pour réduire ces conséquences : au moins un des trois niveaux constituant le risque ou bien réduire l'aléa afin de ne pas altérer les niveaux matériel, structurel et fonctionnel du système urbain.

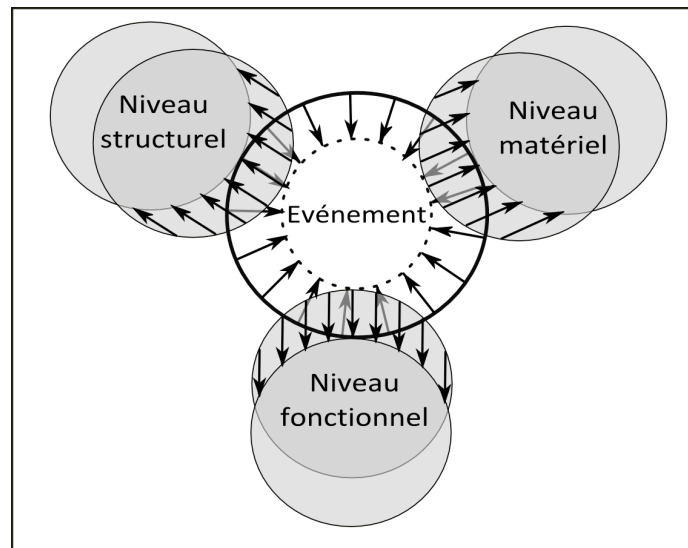


Figure 6 - Les processus de résilience

Pour l'évaluation de la résilience, il faut donc prendre en compte l'ensemble de ces trois niveaux. On peut alors créer trois indicateurs et les agréger. C'est

pour l'instant l'option proposée. Cependant, cette méthodologie est susceptible d'évoluer car l'agrégation d'indicateurs est souvent périlleuse et problématique. Ainsi, dans un premier temps trois indicateurs ont été créés : des indicateurs de résilience matérielle, structurelle et fonctionnelle. L'agrégation de ces trois indicateurs donne un indicateur de performance du réseau. Plus précisément dans notre cas, il s'agira d'un indicateur de résilience, puisqu'ici les trois indicateurs étudient le fonctionnement du réseau en mode dégradé et les capacités de remise en service de ces réseaux. Pour préciser la terminologie proposée :

- l'indicateur de performance matérielle fait référence aux dommages matériels subis par un réseau – par exemple, un pourcentage d'endommagement ;

- l'indicateur de performance structurelle fait référence aux possibilités structurelles qu'offre le réseau pour permettre le fonctionnement de tout ou partie du réseau – par exemple, un calcul de la redondance du réseau, c'est-à-dire une mesure des alternatives offertes par le réseau à la perturbation d'un de ces composants ;

- enfin, l'indicateur de performance fonctionnelle fait référence aux possibilités de remise en service des composants endommagés afin que le réseau puisse pleinement assurer ses fonctions – par exemple, un calcul d'accessibilité des ressources par rapport aux endommagements possibles.

3.2 D'un indicateur de résilience des réseaux à un indicateur de résilience de la ville

Un indicateur de résilience des réseaux peut être défini à l'échelle de la ville, du quartier ou d'un îlot. L'enjeu est avant tout de déterminer des seuils de résilience jugés plus ou moins acceptables. Ainsi, si ces seuils ne sont pas respectés en certaines zones géographiques – îlot ou quartier –, il sera possible de mettre en relief les zones non résilientes d'une ville du point de vue de ses réseaux. Pour étudier la résilience d'une ville et donc tenir compte d'autres composants urbains – autres que les réseaux –, on ne pourra se contenter de cette approche. La proposition que nous faisons ici est d'étudier la répartition des enjeux majeurs par rapport à ces zones non résilientes (Fig. 7).

C'est une technique déjà utilisée pour étudier la vulnérabilité d'un système territorial à partir de la vulnérabilité d'accessibilité des lieux [Demoraes, 2009]. Adaptée, elle permet ici d'élaborer un indicateur de résilience d'une ville. Ainsi, si les enjeux majeurs sont nombreux en des zones de faible résilience des réseaux, alors la zone est jugée comme non résiliente. Par conséquent, s'il y a beaucoup de zones non résilientes, alors la ville est jugée non résiliente.

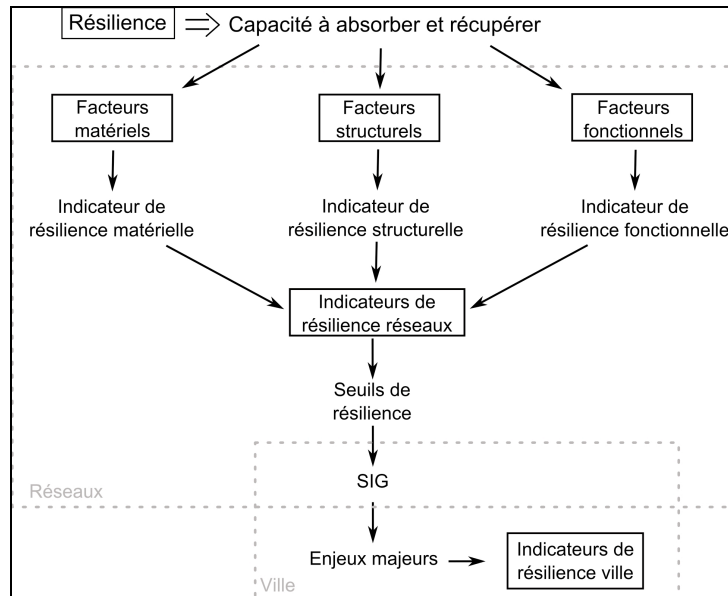


Figure 7 - Un indicateur possible de résilience urbaine

Conclusion

La ville constitue un ensemble de composants en interactions. Pour étudier sa résilience nous privilégions une approche systémique, plutôt qu'une approche évaluant la seule résilience de ses bâtiments. Ainsi, en se concentrant sur les interrelations à l'aide du modèle systémique développé, il est souligné l'importance des réseaux techniques dans le processus d'inondation avant, pendant et après la crue. Cette vision systémique permet notamment de dépasser les frontières classiques du risque, limitant le risque aux seules zones inondables. L'application de méthodes d'analyse de risque permet alors de déterminer des scénarios de défaillance, lesquels, une fois simulés, permettent d'évaluer la performance d'un réseau avant de pouvoir évaluer la résilience d'une ville. Les indicateurs de résilience structurelle, fonctionnelle et matérielle ne sont pas encore arrêtés, et le système d'agrégation reste à définir avant les premières applications à des villes réelles et la production d'un système d'information géographique permettant cette évaluation.

Références bibliographiques

- ASHLEY, R., BLANKSBY, J., CHAPMAN, J. & ZHOU J. J., 2007 – « Towards Integrated Approaches to Reduced Flood Risk in Urban Areas », in R. Ashley, S. Garvin, E. Pasche, A. Vassilopoulos, C. Zevenbergen, *Advances in Urban Flood Management*, pp. 415- 432.
- BERRY, B.J.L., 1964 – « Cities as systems within systems of cities », *Papers of the Regional Science Association*, vol. 13, n° 1, pp. 147-163.

- CAMPANELLA, T. J., 2006 – « Urban Resilience and the Recovery of New Orleans », in American Planning Association. *Journal of the American Planning Association*, Spring 2006, ProQuest Direct Complete, vol. 72, n° 2, pp. 141-146.
- DAUPHINE A. & PROVITTOLO D., 2007, « La résilience : un concept pour la gestion des risques », *Annales de Géographie*, n° 654, pp. 115-125.
- DEMORAES, F., 2007 – « De l'intérêt d'une étude sur la vulnérabilité des réseaux routiers et de transport pour la compréhension des vulnérabilités territoriales – Le cas du District Métropolitain de Quito (Équateur) », *Cybergeo – European Journal of Geography* <http://www.cybergeo.eu/index22101.html>
- Flood resilience Group, FRG Overview, www.floodresiliencgroup.org/
- FOLKE C., 2006 – « Resilience: The emergence of a perspective for social–ecological systems analyses », *Global Environmental Change*, vol.16, n°3, pp. 253–267.
- GLEYSE, J.-F., 2005 – *La vulnérabilité structurelle des réseaux de transport dans un contexte de risques*, Thèse de doctorat en Analyse Théorique et Epistémologique en Science Géographique, Université Paris VII- Denis Diderot, 848 p.
- GLEYSE, J.-F. & REGHEZZA, M., 2007 – « La vulnérabilité structurelle comme outil de compréhension des mécanismes d'endommagement », *Géocarrefour*, vol. 82, n° 1-2, pp. 17-26.
- GUNDERSON, L.H., HOLLING, C.S., 2002 – *Panarchy: Understanding Transformations in Human and Natural Systems*, Washington DC, Island Press, 508 p.
- 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*, vol. 38, n° 2, pp. 124-138.
- HOLLING, C.S., 1973 – « Resilience and stability of ecological systems », *Annual Review of Ecology and Systematics*, vol. 4, n° 1, pp. 1–23.
- HOLLING, C.S., SCHINDLER, D.W., WALKER, B.W. & ROUGHGARDEN, J., 1995 – « Biodiversity in the functioning of ecosystems: An ecological synthesis », in C. Perrings, K.G. Maler, C. Folke, C.S. Holling & B.O. Jansson, *Biodiversity Conservation*, Dordrecht, Kluwer
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2007 – *Climate change 2007: The IPCC fourth assessment Report, Summary for Policymakers*, www.grida.no/climate
- KLEIN, R.J.T., NICHOLLS, R.J., THOMALLA, F., 2003 – « Resilience to natural hazards: how useful is this concept? » *Environmental Hazards*, vol. 5, n° 1-2, pp. 35–45.
- PATON, D., JOHNSTON, D., 2006 – *Disaster Resilience: An Integrated Approach*, in Springfield, IL, Charles C. Thomas Publishers, 321 p.
- PIMM, S.L., 1984 – « The complexity and stability of ecosystems », *Nature* 307 (26), pp. 321–326.
- PUMAIN, D., SANDERS, L. & SAINT-JULIEN, T., 1995 – *Villes et auto-organisation*, Paris, Economica, 191 p.
- SANDERS, L., 1992 – *Système de villes et synergie*, Paris, Economica (coll. « Villes – Anthropos »), 274 p.
- SERRE, D., PEYRAS, L., TOURMENT, R., DIAB, Y., 2008 – « Levee performance assessment: development of a GIS tool to support planning maintenance actions », *Journal of Infrastructure System*, ASCE, vol. 14, n° 3, pp. 201-213.
- SZÖLLÖSI-NAGY, A. & ZEVENBERGEN, C., 2004 – *Urban flood management, Introduction*, First International Expert Meeting on Urban Flood Management, Rotterdam, A. A. Balkema Publishers, 160 p.
- SERRE, D., BARROCA, B., DIAB, Y., 2010 – « Urban flood mitigation: sustainable options », *Sustainable City 2010*, 14 - 16 April, La Coruña, Spain, 12 p.
- VILMIN, T., 2008 – *L'aménagement urbain en France. Une approche systémique*, CERTU, 250 p.
- WALLACE, D., WALLACE, R., 2008 – « Urban systems during disasters: factors for resilience », *Ecology and Society* 13(1): 18. [online] URL: <http://www.ecologyandsociety.org/vol13/iss1/art18/>
- ZWINGELSTEIN, G., 1995 – *Diagnostic des défaillances*, Paris, Hermes, 601 p.