



HAL
open science

Concevoir la résilience urbaine : un défi face à des complexités

Damien Serre

► **To cite this version:**

Damien Serre. Concevoir la résilience urbaine : un défi face à des complexités. EDP Sciences. Complexité et désordre Éléments de réflexion, , 2015, 9782759817771. halshs-01250351

HAL Id: halshs-01250351

<https://shs.hal.science/halshs-01250351>

Submitted on 4 Jan 2016

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.

Concevoir la résilience urbaine : un défi face à des complexités

Damien Serre

1, RESCUESolutions SAS, Bagnex, France, damien.serre@rescuesolutions.fr

2, HDR associé au Laboratoire Interdisciplinaire des Energies de Demain, URD 00001, Université Paris Diderot – Sorbonne Paris Cité

I - Introduction

Les villes, quelle que soit leur géographie, leur topographie et leurs évolutions dans l'espace, sont confrontées à des risques (naturels, technologiques et humains). Le développement des villes, anarchique ou selon une apparente maîtrise dans les pays les plus riches, a contribué en tant que tel à augmenter les niveaux de risques à la fois par la concentration des enjeux, l'aménagement non adapté dans des zones dangereuses, et à aggraver les effets par une augmentation locale des niveaux d'aléas, et de la vulnérabilité. En effet, la ville perturbe le cycle naturel de l'eau par exemple à cause de l'imperméabilisation des sols ou de formes urbaines inadaptées, ce qui est un facteur aggravant du point de vue du risque inondation, mais aussi de sécheresse. La vulnérabilité est accrue à cause de la concentration des biens et des personnes, mais aussi parce que les systèmes techniques urbains, réseaux en particuliers, diffusent le risque en ville dans des zones jugées invulnérables, d'une manière tellement complexe que les gestionnaires de ces infrastructures ont du mal à établir des règles de gestion adaptées aux interdépendances qui se sont créées entre ces systèmes. La décision d'un gestionnaire d'agir ou pas sur son réseau aura des conséquences plutôt inattendues sur les autres systèmes, dépendants ou interdépendants.

Dans le même temps, d'autres enjeux sont primordiaux pour les villes : les enjeux sociopoliticoéconomiques, fondamentaux mais qui s'inscrivent trop souvent dans des visions à court terme, prennent le pas sur des enjeux liés à la transition énergétique, à l'adaptation au changement climatique, et de manière encore plus accrue sur les questions liées aux risques, dont les conséquences ne serait-ce qu'économiques et directes, se chiffrent en Milliards d'Euros ou de Dollars lorsqu'un événement survient. Cela n'empêche pas, le plus souvent, de reconstruire à l'identique en s'exposant de nouveau... En plus de la complexité de la ville et de ses systèmes sociotechniques, s'ajoutent des choix politiques qui entretiennent et augmentent la complexité à concevoir et mettre en œuvre la ville résiliente.

Finalement, concevoir la ville résiliente ne nécessite pas uniquement de comprendre la ville comme un ou des systèmes, mais bien de développer des méthodes et des outils pour appréhender la complexité urbaine.

La première partie de cet article s'attache à présenter le contexte lié à la ville et aux risques : les problématiques liées au développement urbain d'une part, et au changement climatique générateur d'incertitudes seront rappelées. Ce contexte inscrit de fait la gestion des risques en ville dans une situation complexe où interagissent des systèmes qui s'influencent d'une manière très difficile à circonscrire.

La deuxième partie, quant à elle, se focalise sur les méthodes développées et en cours de développement pour tenter d'appréhender la résilience urbaine dans toute sa complexité : un modèle conceptuel de la résilience fondé sur trois capacités (modèle 3DS) est décrit. Les outils de la résilience sont abordés et un exemple est détaillé en annexe 1 : les premiers outils sur la base de modélisation et de SIG seront présentés.

II - La ville et le risque : concentration des enjeux et incertitudes

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

II.1 Un développement urbain fulgurant et un climat changeant

Plusieurs causes compliquent aujourd'hui la gestion des risques en ville. Depuis 2007, la moitié de la population mondiale vit en milieu urbain (UN-Habitat, 2007). Ce palier atteint, il est attendu à ce que la population totale vivant en ville double dans les 30 prochaines années (UN, 2006). Ce taux de croissance équivaut à la construction d'une nouvelle ville d'un million d'habitants par semaine (www.floodresiliencgroup.org, 2009). Cette croissance rapide pose à elle seule les enjeux liés à la maîtrise des risques en ville (APFM, 2008).

Cette urbanisation rapide s'accompagne généralement d'un étalement urbain important. Cet étalement urbain est à lui seul générateur de risques, puisque d'un côté cela aboutit à construire la ville dans des zones où les aléas sont plus forts, d'un autre côté les réseaux techniques urbains ne sont plus adaptés et sous dimensionnés (Gourbesville, 2008). De plus, cette urbanisation rapide est accompagnée par un changement climatique annoncé, dont les effets se font ressentir. Ce changement climatique génère un certain nombre d'incertitudes selon les scénarios d'élévation de la température proposés par les experts de l'IPCC¹.

Mais, quel que soit le scénario retenu, des conséquences sur la fréquence et la sévérité des précipitations sont attendues, tout comme pour la survenue de canicules et d'épisodes de sécheresse comme en 2003. C'est sur la base de ces données incertaines, incomplètes et imprécises que sont produits les modèles de prévision des aléas...

Dans ce contexte où le monde devient de plus en plus incertain, notamment à cause du changement climatique, il devient donc nécessaire de développer de nouvelles stratégies de gestion des risques pour anticiper des scénarios que les modèles probabilistes jugent comme extrêmes ou rares (Zevenbergen et al., 2011).

Aussi, le changement climatique, combiné à la concentration des biens et des personnes en milieu urbain, laisse présager des événements dévastateurs pour les années à venir. Par exemple, le risque d'inondation devrait augmenter de manière significative : le coût économique du risque d'inondation devrait atteindre dans le monde la valeur de 100 Milliards d'Euros par an à la fin du siècle (EEA, 2008). Environ 75% de ces dommages seraient recensés en milieu urbain. Pour les épisodes de canicules et de sécheresse, les villes, souvent peu végétalisées, et donc avec peu de refroidissement la nuit, subissent directement les effets néfastes de ces phénomènes d'îlots de chaleur.

Il résulte de ces phénomènes sociaux (étalement urbain, urbanisation dans des zones dangereuses et changement climatique avec pour origine la société industrielle) une vulnérabilité accrue non seulement aux événements extrêmes, mais aussi à des événements considérés comme courants par le passé. En conséquence, de nouvelles stratégies de gestion des risques en milieu urbain doivent être envisagées. Ces stratégies doivent intégrer cette multitude de facteurs aggravant comme le développement urbain et le changement climatique. Cette gestion intégrée doit intervenir à plusieurs échelles spatiales et temporelles. L'enjeu est

¹ International Panel on Climate Change

bien d'augmenter la résilience de la ville existante face aux risques, mais aussi de concevoir les nouveaux quartiers urbains ou les nouvelles villes en considérant tous ces enjeux : certains urbanistes prônent la transformation des aléas, vécus comme un événement négatif, en une opportunité urbaine. Il s'agit ici de concevoir la ville adaptée aux risques.

II.2 La complexité des systèmes techniques urbains amplifie et propage le risque en ville

La construction de la ville au 20^e siècle...

Le développement et la dépendance des villes aux réseaux techniques urbains impliquent une certaine forme d'urbanisation, qualifiée de « réticulaire » (Dupuy, 1991). Ainsi, l'organisation des réseaux n'est pas seulement celle d'un système technique, mais elle implique l'organisation d'un espace selon ses principes de fonctionnement. Cette forme d'urbanisation est à l'origine de la diffusion des risques en ville.

En effet, le développement des réseaux techniques s'intensifie dans le milieu du 19^e siècle sous l'impulsion d'Eugène Belgrand pour la gestion des eaux. Les réseaux deviennent rapidement des axes de développement et de connexité de plus en plus complexes sous forme de réseaux maillés interdépendants. Au 20^e siècle, les transports en commun, les réseaux de distribution d'électricité, de gaz, de téléphonie, de fibre optique, de chauffage urbain, de gestion des déchets... viennent complexifier la structure de ce maillage ainsi que les relations d'interdépendance.

...face aux défis du 21^e siècle.

Aujourd'hui, les réseaux techniques urbains sont très sensibles. Le fonctionnement de la ville dépend en grande partie du fonctionnement des réseaux. La moindre défaillance peut avoir des conséquences en cascade sur le fonctionnement urbain (Robert et al., 2009). De la même manière, à l'échelle planétaire, la défaillance des réseaux techniques d'une ville, peut avoir des conséquences partout dans le monde. Deux exemples illustrent cette sensibilité (Barthélémy et al., 2011) :

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

Les exemples sont nombreux dans le monde. Ce type de défaillance des réseaux techniques, - dits vitaux, essentiels ou critiques - (Barthélémy et al., 2011, Robert et al., 2009) et leurs effets, montre la sensibilité des réseaux à tous types d'aléas, de l'erreur humaine, aux attentats, jusqu'aux aléas technologiques et naturels.

Les réseaux techniques urbains doivent être rendus plus sûrs au cours du 21^e siècle pour éviter ce type de défaillances. Mais, du fait de l'enchevêtrement des réseaux, de leur extension tentaculaire et d'une extrême concentration de certains nœuds, augmenter la résilience des réseaux est très difficile, d'autant plus que l'interconnexion et l'interdépendance de l'ensemble de ces réseaux ont abouti à la création d'un macro-réseau, reliant le monde entier à partir d'une extrême concentration en ville (Barthélémy et al., 2011).

Les réseaux techniques et les risques...

Le changement climatique devrait aboutir à des situations de risques plus extrêmes et plus courantes dans les années à venir, ce qui causera à l'environnement urbain un certain nombre de dysfonctionnements aux niveaux physique (endommagement), socio-économique,

organisationnel, et fonctionnel (capacité de la ville à fonctionner en mode dégradé et à se reconstruire en s'adaptant).

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

L'analyse des retours d'expériences de villes ayant subi des dommages montrent à la fois une dépendance du fonctionnement urbain à ses réseaux techniques et une diffusion des effets des aléas via ces mêmes réseaux. Il ressort de diverses études sur les réseaux techniques urbains que ces réseaux sont à la fois vulnérables face aux risques et à la fois propagateurs de cette vulnérabilité à cause de leurs interdépendances et de leurs extensions (Felts, 2005); (Vigneron et al., 2006) (Tab. 1).

Risque	Réseau		Energie				Télécommunications			Transport			
	AEP	Eaux usées et eaux pluviales	Electricité aérien	Electricité enterré	Gaz	Chauffage urbain	Haut débit	Téléphonie fixe (aérien)	Téléphonie mobile	Routier	Ferré	Aérien	Maritime et fluvial
naturel	crues et submersions rapides												
	crues												
	remontées de nappes												
	augmentation du niveau de la mer												
	séisme												
	glissement de terrain												
	réchauffement climatique												
	incendie												
tempête	1												
technologique	explosion												
	pollution												
humain	terrorisme												
	sabotage												
	grève												
sanitaire	pollution												
	épidémie												

séisme: avec ou sans liquéfaction des sols
 1 en cas de remontée d'eau salée dans les réseaux (marée de tempête)

très vulnérable
 assez vulnérable
 peu vulnérable

Tableau 1. La vulnérabilité des réseaux techniques urbains face aux risques

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

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

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

- les interactions au sein d'une et une seule infrastructure critique (le réseau d'énergie, ou le réseau d'assainissement, ou le réseau routier...);
- les interactions entre les infrastructures critiques (McNally et al., 2007), ce qui aboutit à l'analyse du réseau de réseaux (le macro-réseau).

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

- 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 des composants urbains comme les infrastructures publiques qui assurent certaines fonctions urbaines.

En vue de l'amélioration de la résilience des villes, les réseaux techniques ont déjà été identifiés comme points d'entrée des défaillances (Lhomme et al., 2010), et constituent donc les systèmes sur lesquels se focaliseront les mesures techniques et de gestion. En effet, les réseaux se comportent à la fois comme des propagateurs de la défaillance de par leur extension géographique et par leurs interdépendances, et sont en même temps essentiels à la reconstruction (Felts, 2005). Les réseaux sont ainsi le système nerveux de la ville dans lequel la moindre défaillance peut entraîner des conséquences importantes sur l'ensemble du système urbain.

Evaluer la résilience des réseaux techniques urbains apparaît donc comme une phase importante pour augmenter la résilience des villes, pour orienter les réponses à mettre en place pour diminuer les effets des aléas en ville (améliorations des réseaux, recommandations d'évacuation, priorisation des interventions...). Il s'agira d'évaluer une capacité de ces réseaux à fonctionner en mode dégradé, c'est-à-dire pendant l'aléa, et leur capacité à être remis en service, pour améliorer l'efficacité de la ville à récupérer ses fonctions dépendantes de ses réseaux.

III – Concevoir la résilience urbaine : quelles méthodes pour appréhender la complexité ?

Ci-dessus une méthode d'évaluation de la résilience urbaine a été proposée. Elle permet notamment d'identifier les dysfonctionnements possibles des réseaux techniques et ainsi la diffusion des effets des risques en milieu urbain. Afin de pouvoir exploiter la méthode, la mise à disposition d'outils d'aide à la décision en faveur de la résilience urbaine devient donc nécessaire.

III.1 Analyser et évaluer la résilience urbaine

Les réseaux techniques urbains propagent les risques en ville par des dysfonctionnements en chaîne. Pour évaluer la résilience urbaine face aux risques il est essentiel de tenir compte de ces interactions entre réseaux.

La ville peut être considérée comme un système composé de plusieurs sous-systèmes (Berry, 1964). Une littérature conséquente confirme l'importance de l'analyse systémique pour étudier le phénomène urbain (Pumain et al., 1995), (Sanders, 1992). Ces travaux ont déjà donné naissance à des modèles complets, souvent liés à la dynamique urbaine, mais peu applicables à la question des risques. C'est pourquoi une nouvelle approche est proposée. 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 est mis en relief par l'attraction qu'une ville exerce sur les populations d'une autre ville, mais ce côté concurrentiel entre pôles 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 se retrouve alors avec un système circulaire (Fig. 1) :

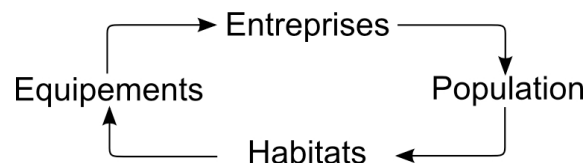


Figure 1. Une vision simplifiée des dynamiques urbaines - Les flèches symbolisent l'attraction d'un élément sur un autre

Cependant, il semble important de décomposer les équipements en deux objets distincts :

- les systèmes techniques – les réseaux – ;
- 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. 2).

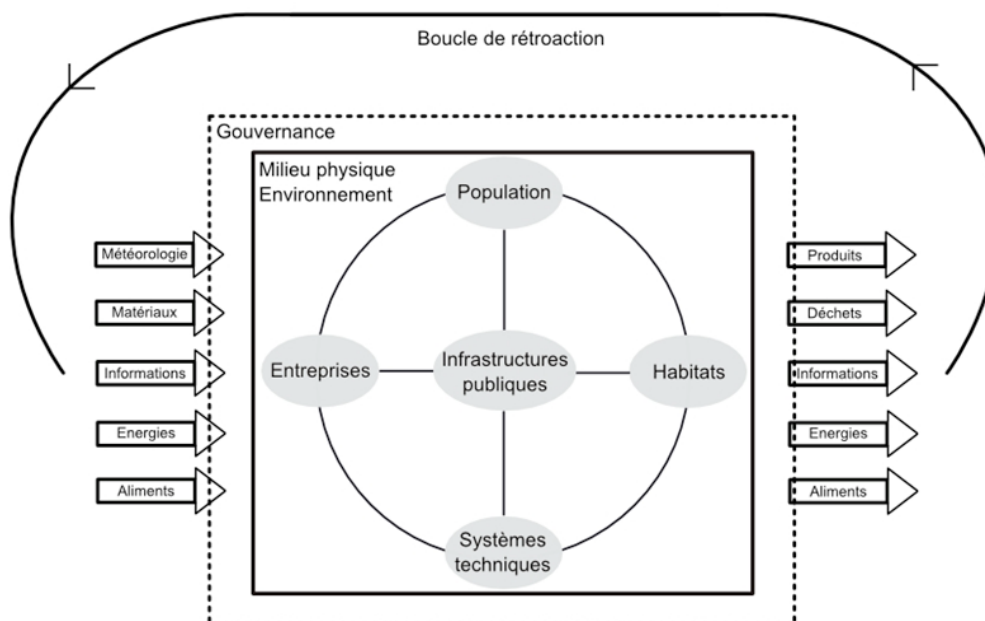


Figure 2. Modélisation du système urbain

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, primordial quand on traite des risques, est bien sûr la météorologie, liée par exemple au risque inondation, ou sécheresse... 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. 2).

La ville développe des interactions entre les personnes, les activités et les biens, mais si la densité d'occupation du sol induite 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, il est possible de modéliser le milieu urbain en période de crise. Il apparaît alors que, de par leurs contraintes d'implantations et leurs structures, les réseaux constituent non seulement « la porte d'entrée » de l'aléa en milieu urbain, mais aussi « la porte d'entrée » du risque compte tenu des effets dominos pouvant être induits par ces réseaux. Ensuite, le risque se propage à travers les

réseaux en suivant plusieurs scénarios possibles. On peut alors proposer une approche systémique de la ville face aux risques (Fig. 3).

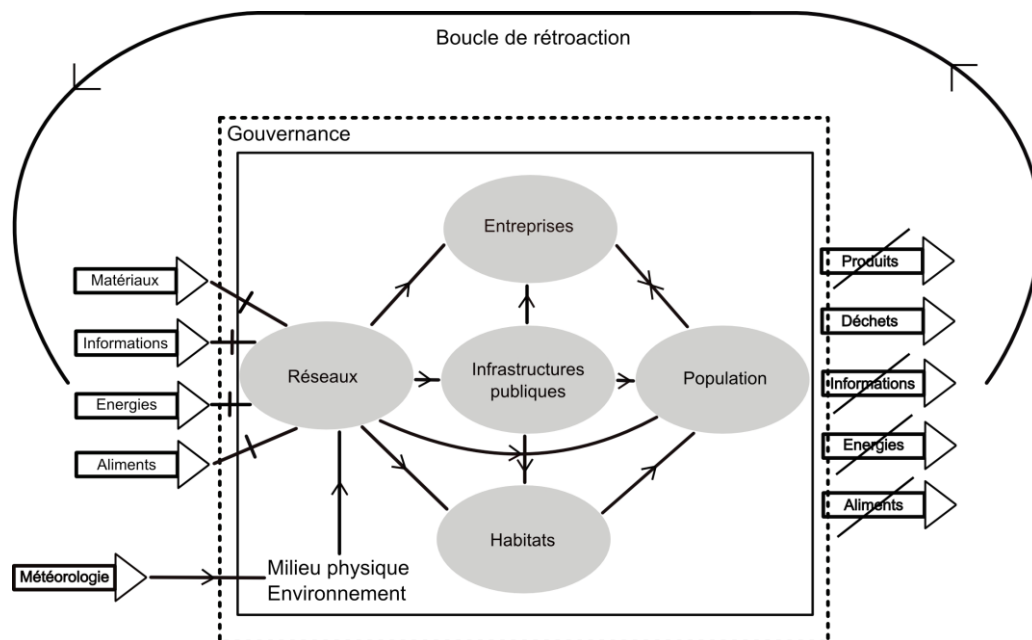


Figure 3 : Les réseaux techniques et la propagation du risque inondation dans la ville

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. Développer une méthode d'évaluation de la résilience de ces réseaux devient donc fondamentale. Une approche systémique est proposée pour étudier la résilience des réseaux techniques urbains et la résilience urbaine (Lhomme et al., 2013). A ce titre, trois capacités sont primordiales pour étudier la résilience des réseaux techniques et un modèle conceptuel a été développé (modèle 3DS – Spatial Decision Support System) (Serre et al., 2013) (Fig. 4) :

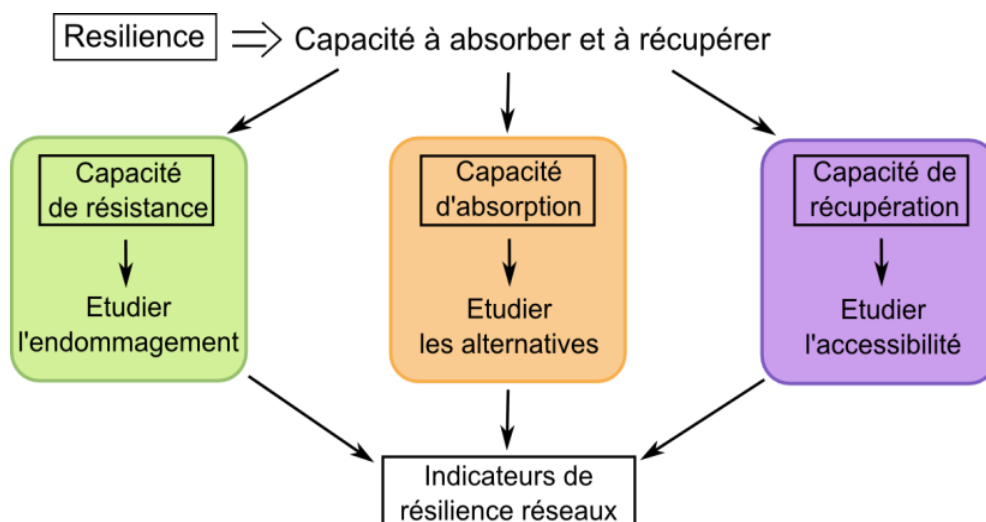


Figure 4. Les capacités à étudier pour la résilience des réseaux – le modèle 3DS (Lhomme et al., 2010)

i) La capacité de résistance face à la perturbation

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

ii) La capacité d'absorption face à la perturbation

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

iii) La capacité de récupération

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

III.2 Simuler et partager pour décider en faveur de la ville résiliente

Une fois les méthodes d'évaluation de la résilience urbaine mise en place, à partir de l'analyse des réseaux techniques urbains, il devient nécessaire de développer des outils d'aide à la décision pour les gestionnaires de réseaux et plus largement pour l'ensemble des acteurs urbains concernés plus ou moins directement par la gestion des risques. En termes d'outils d'aide à la décision pour la résilience urbaine, l'objectif est double. Il s'agit premièrement de disposer d'outils capables d'intégrer des indicateurs d'aide à la décision : les possibilités de couplage entre des Systèmes d'Information à Référence Spatiale (SIRS) et les indicateurs de résilience doivent être étudiées. Deuxièmement, ces outils doivent pouvoir être partagés par de multiples acteurs intéressés par l'amélioration de la résilience urbaine : partager des SIRS à l'aide de technologies client/serveur via le web semble être une option intéressante dans ce cas. Le lecteur intéressé peut consulter l'annexe 1 donnant un exemple d'outils d'aide à la décision en faveur de la résilience urbaine.

IV – Conclusion

La recherche menée jusqu'alors a visé l'évaluation de la résilience urbaine face au risque d'inondation en premier lieu. Le choix méthodologique privilégié a reposé sur une approche technico-fonctionnelle de la résilience. Une approche technique puisque ce sont les systèmes techniques urbains qui ont été étudiés, une approche fonctionnelle car nous sommes intéressés à la manière dont ces systèmes pouvaient, selon leurs capacités de résistance, d'absorption et de récupération, augmenter le risque inondation en milieu urbain et diffuser le risque au sein de la ville.

Malgré cette entrée technico-fonctionnelle, une approche transdisciplinaire, au service de la ville et de ses décideurs, a été développée. Ainsi, des outils d'aide à la décision ont été produits. Cette production d'outils a été rendue possible par l'utilisation de méthodes provenant de diverses sciences. Des méthodes provenant de la géographie des risques, des sciences de l'aide à la décision et des sciences de l'information géographique ont été mobilisées.

Les premiers résultats en termes d'évaluation de la résilience urbaine face aux risques d'inondation sont encourageants, d'autres angles d'analyses doivent être étudiés pour proposer une évaluation holistique de la résilience urbaine. Les résultats préliminaires de la thèse de Marie Toubin dédiée à la mise en place d'outils d'aide à la gouvernance des risques constituent une première étape en ce sens. De la même manière, chercher à évaluer la résilience des villes ne peut se limiter au risque inondation. En effet, se concentrer sur un seul type d'aléa pourrait aboutir à des contradictions fortes concernant des questions de conception et de maintenance des réseaux, d'aménagement urbain, et de gouvernance des risques. De plus, il est nécessaire de mieux comprendre les enjeux liés à chacun des réseaux techniques urbains : il est important d'accroître nos connaissances sur ces réseaux, aussi bien d'un point de vue technique que d'un point de vue managérial. Enfin, compléter les outils d'aide à la décision produits par ces connaissances nouvelles constituera une avancée significative à la fois pour l'évaluation de la résilience urbaine face à différents types de risques, et pour l'aide à la décision dans ce domaine.

Ainsi, les pistes de recherche énoncées ci-dessus sont en cours aujourd'hui et doivent être poursuivies. Les objectifs de ces recherches sont :

- l'amélioration de la gouvernance des risques par une approche technico-organisationnelle ;
- l'évaluation de la résilience urbaine selon divers types de risques, pour une amélioration holistique de la résilience des villes et de la gouvernance urbaine ;
- l'amélioration de la connaissance des réseaux techniques urbains en termes de fonctionnement et de gestion.

Finalement, analyser, évaluer et concevoir la résilience des villes face aux risques nécessite une appréhension de la complexité multi système, multirisque et multi échelle. Les approches transdisciplinaires et à l'interface des disciplines sont obligatoires pour traiter ce type de sujet et apporter des réponses utiles à tous les acteurs de la ville concernés par les risques, c'est-à-dire tout le monde !

V – Bibliographie

APFM. 2008. Urban Flood Risk Management - A Tool for Integrated Flood Management. Associated Program on Flood Management.

ASCE. 2009. Guiding Principles for the Nation's Critical Infrastructure. 42 p.

Berry, B. J. L. (1964) Cities as systems within systems of cities. *Regional Science Association*, vol. 13, pp. 147-163.

- Boin, A. & A. McConnell (2007) Preparing for Critical Infrastructure Breakdowns: The Limits of Crisis Management and the Need for Resilience. *Journal of Contingencies and Crisis Management*, 10.
- Denègre, J. & F. Salgé. 2004. *Les systèmes d'information géographique*. Que sais-je ?, PUF.
- Dupuy, G. 1991. *L'urbanisme des réseaux : théories et méthodes*. Géographie Paris: Armand Colin, collection U.
- Felts, L. 2005. Vulnérabilité des réseaux urbains et gestion de crise. 78 p.: CERTU.
- 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, 284-289.
- Lhomme S., Serre D., Diab Y., Laganier R., 2013, L'importance de la redondance comme facteur de résilience des réseaux techniques urbains. Contribution à l'élaboration d'un indicateur spatial de redondance, *European Journal of GIS and Spatial Analysis*, (Sous presse).
- McNally, R. K., S.-W. Lee, S. Yavagal & W.-N. Xiang (2007) Learning the critical infrastructure interdependencies through an ontology-based information system. *Environment and Planning B: Planning and Design*, vol. 34, pp. 1103-1124.
- Pumain, D., L. Sanders & T. Saint-Julien. 1995. *Villes et auto-organisation* Economica.
- Robert, B. & L. Morabito. 2009a. *Réduire la vulnérabilité des infrastructures essentielles*. Lavoisier.
- Sanders, L. 1992. *Système de villes et synergétique*. Economica, Anthropos.
- Serre D., Barroca B., Laganier R. 2013, *Resilience and Urban Risk Management*, CRC Press Balkema, Taylor & Francis Group, ISBN 978-0-415-62147-2.
- Thierion, V. 2010. Contribution à l'amélioration de l'expertise en situation de crise par l'utilisation de l'informatique distribuée. Application aux crues à cinétique rapide. Thèse de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris.
- Toubin M., Lhomme S., Diab Y., **Serre D.**, Laganier R., 2012, La Résilience urbaine : un nouveau concept opérationnel vecteur de durabilité urbaine ?, *Développement durable et territoires* [En ligne], Vol. 3, n°1 | Mai 2012, mis en ligne le 11 juin 2012, URL : <http://developpementdurable.revues.org/9208>.
- Turner, A. 2006. *Introduction to Neogeography*. London.
- UN-Habitat. 2007. Sustainable urbanization: local actions for urban poverty reduction, emphasis on finance and planning. In *21st Session of the Governance Council*, 482. Nairobi, Kenya: UN Habitat.
- UN. 2006. World population prospects: The 2005 revision. United Nation Population Division, Department of Economic and Social Affairs, United Nations, New York.
- Veyret, Y. 2003. *Les risques*. Paris: SEDES.

- Vignerot, S., F. Dégardin, B. Guézo & A. Oustric. 2006. Réduire la vulnérabilité des réseaux urbains aux inondations. In *Risques naturels majeurs*, eds. CERTU, C. d. l'Est & C. Sud-Ouest, 112 p.: Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable.
- Vilmin, T. 2008. Aménagement urbain en France. Une approche systémique. CERTU.
- Zevenbergen, C., A. Cashman, N. Evelpidou, E. Pasche, S. L. Garvin & R. Ashley. 2011. *Urban Flood Management*. London, UK: Taylor and Francis Group.

ANNEXE 1

L'utilisation des SIG pour la gestion des risques s'est répandue chez l'ensemble des acteurs des risques pour deux raisons principales. Premièrement, les SIG se sont démocratisés, car ils sont désormais technologiquement et économiquement accessibles à la plupart des acteurs des risques. Deuxièmement, les risques sont reconnus comme étant un phénomène spatial, l'espace constituant même sa composante intrinsèque. « L'espace sur lequel s'exercent les menaces n'est pas neutre, il constitue la composante intrinsèque du risque » (Veyret, 2003). Ainsi, les progrès de la recherche thématique, qui mettent en exergue la composante spatiale des risques, et le développement des outils SIG ont en commun d'aboutir à une utilisation croissante des outils SIG et à une amélioration des connaissances sur les risques territorialisés. Parallèlement à ces développements, le cadre théorique de la gestion des risques tout comme les outils SIG n'ont cessé d'évoluer. Tout d'abord centré sur l'étude et la lutte contre l'aléa, cette thématique de recherche a introduit de nouveaux concepts comme celui de vulnérabilité, puis plus récemment celui de résilience. Cette évolution s'est aussi accompagnée de la reconnaissance des interactions entre les territoires et les aléas. Dans le même temps, les outils SIG ont aussi évolué. Leur vocation première qui vise à « rassembler, au sein d'un outil unique, des données diverses mais localisées dans le même espace géographique, relatives à la fois à la Terre et à l'homme, à leurs interactions et à leurs évolutions respectives » (Denègre et al., 2004) demeure. Cependant, le développement des applications 3D, web, temps réels, ou encore plus généralement le développement des outils informatiques et des bases de données, contribuent à améliorer « la collecte, la gestion, la manipulation, l'analyse, la modélisation et l'affichage de données à référence spatiale afin de résoudre des problèmes complexes d'aménagement et de gestion » (Denègre et al., 2004).

Afin de pouvoir partager les informations générées par ces systèmes, les outils web SIG méritent d'être proposés à l'ensemble des acteurs des risques. En effet, en tant qu'outil de télécommunication, le web a deux particularités principales :

- premièrement, il permet à un acteur d'atteindre un grand nombre de personnes et de pouvoir collaborer avec ceux-ci dans un projet commun ;
- deuxièmement, ce réseau permet la communication et le partage de données entre différents acteurs. Ce sont ces deux particularités qui vont principalement contribuer à développer les applications web SIG.

Ainsi, « l'avènement progressif des réseaux informatiques offre de nouvelles potentialités technologiques à de nombreux domaines scientifiques, telle que la géomatique. En effet, la gestion et le partage de l'information géographique, essentielle à la caractérisation des phénomènes naturels ayant lieu à la surface de la Terre, a pu être améliorée par le recours à des solutions tirant profit d'Internet et du Web » (Thierion, 2010). Le développement de

l'information géographique sur internet est lié au développement d'applications cartographiques sur le web. Le succès de ces applications cartographiques est principalement dû à l'avènement des Maps API (Maps Application Programming Interfaces) telles que Google Map, Yahoo Map, Virtual Earth, NASA World Wind... Ainsi, ces API permettent l'affichage de cartes dans des pages web avec des outils de zoom, un déplacement interactif sur celle-ci, des fonds de cartes... Ce type d'applications cartographiques fait partie de ce qu'il est courant d'appeler la néogéographie (Turner, 2006). Ainsi, le « webmapping » correspond à des applications cartographiques dont la visualisation et l'affichage de plusieurs couches de données géographiques est la principale motivation, afin de pouvoir les diffuser voir de les partager. Cette expression ne contient pas le terme de SIG, car les fonctionnalités offertes par l'interface utilisateur ne sont pas celles d'un SIG et l'application ne repose pas non plus sur une infrastructure SIG classique (SGBD/serveur cartographique).

La deuxième approche correspond à une application dont une nouvelle fois la diffusion et l'affichage de données géographiques est la principale motivation. Cependant, dans ce cas, les données sont issues d'un SIG existant. Cette approche repose alors sur une infrastructure client/serveur à laquelle est adjoint un serveur web. Les fonctionnalités de l'interface client ne sont pas celles d'un SIG, mais son infrastructure repose sur un SIG. L'utilisation du terme SIG se justifie alors. On nommera alors cette deuxième approche : « internet SIG ».

Ces deux premières approches se distinguent d'autres applications web, offrant des possibilités d'analyse et d'archivage de données appartenant à l'utilisateur, directement depuis l'interface client. On nommera cette approche « Web SIG ». En effet, cette troisième approche ne se limite pas à un affichage cartographique de données géographiques, mais se rapproche des fonctionnalités des SIG existant, en exploitant autant que possible les capacités de programmation offertes par le web (html/php/javascript...) (Fig. 5).

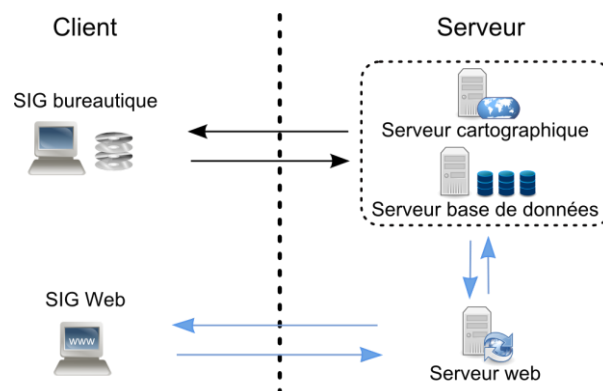


Figure 5. Architecture client serveur dans le cadre du développement d'un Web SIG ou d'un Internet SIG

En synthèse, les différences entre ce qui est considéré ici comme un web SIG et un SIG tendent à disparaître car les interfaces disponibles depuis les navigateurs deviennent de plus en plus complètes et les fonctionnalités se différencient de moins en moins. Utiliser les technologies du web et des SIG pour concevoir un SIRS accessible en partage pour l'amélioration de la résilience urbaine apparaît comme une réponse possible à l'objectif d'optimisation et de partage de la décision en faveur de la résilience urbaine. Compte-tenu des innovations technologiques dans le domaine des Web SIG, l'élaboration d'un Web SIRS pour l'évaluation de la résilience urbaine des réseaux techniques en vue d'un partage des informations entre les gestionnaires des réseaux a été entreprise. Les principales fonctions de l'outil sont présentées ci-dessous.

La conception du Web SIRS repose sur trois modules :

- une base de données stockant les données nécessaires aux calculs ainsi que les résultats obtenus ;
- un logiciel de statistique pour les calculs avancés (comme les méthodes de classification) ;
- une interface utilisateur permettant l'exploitation et l'affichage des données.

Plus précisément, cet outil est composé de PostgreSQL comme base de données, avec son extension Postgis pour les données spatiales et pgRouting pour les calculs d'itinéraire (Fig. 6).

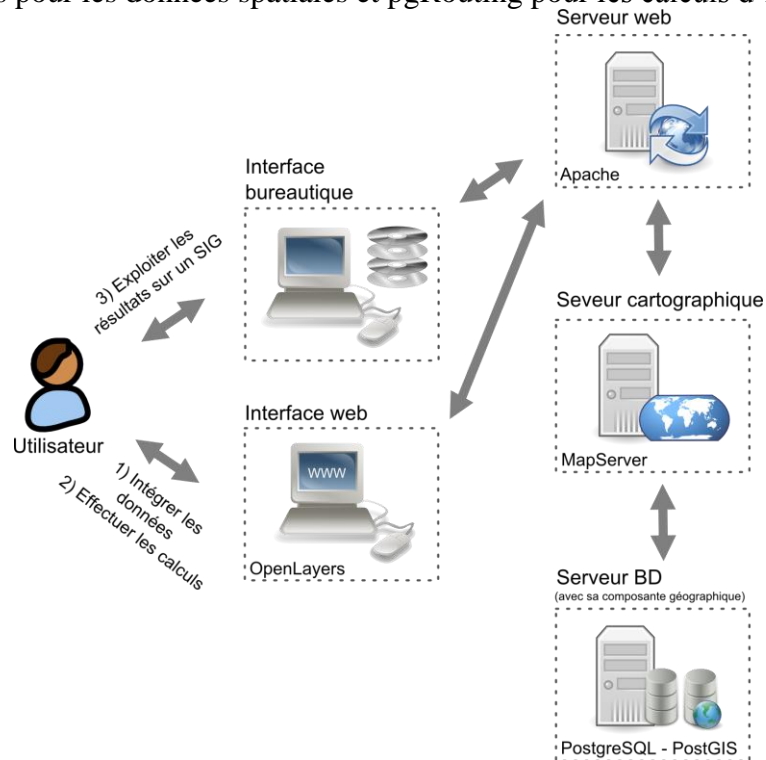


Figure 6. L'intérêt du service WMS/WFS

Le logiciel R est utilisé pour d'éventuels traitements spatiaux plus complexes que ceux permis par Postgis. Pour cela, une relation entre la base de données et le logiciel libre R a été effectuée à l'aide de PL/R qui est une extension de PostgreSQL. L'application web est fondée sur une architecture client/serveur composée d'un serveur Apache et du serveur cartographique Mapserver. Le client cartographique choisi est OpenLayers. Toute l'application est programmée à l'aide des langages PHP, HTML et Javascript, car ces langages sont natifs à tous les navigateurs web. L'application repose sur un service WMS/WFS.

L'outil permet d'étudier les trois capacités nécessaires pour évaluer la résilience des réseaux (résistance, absorption, récupération). Pour cela, il est possible d'avoir accès à l'étude de ces capacités à l'aide de trois menus situés à droite de la carte. A gauche de ce menu se trouve l'espace réservé à l'affichage cartographique (Fig. 7). Cette carte constitue l'élément central de ce prototype.

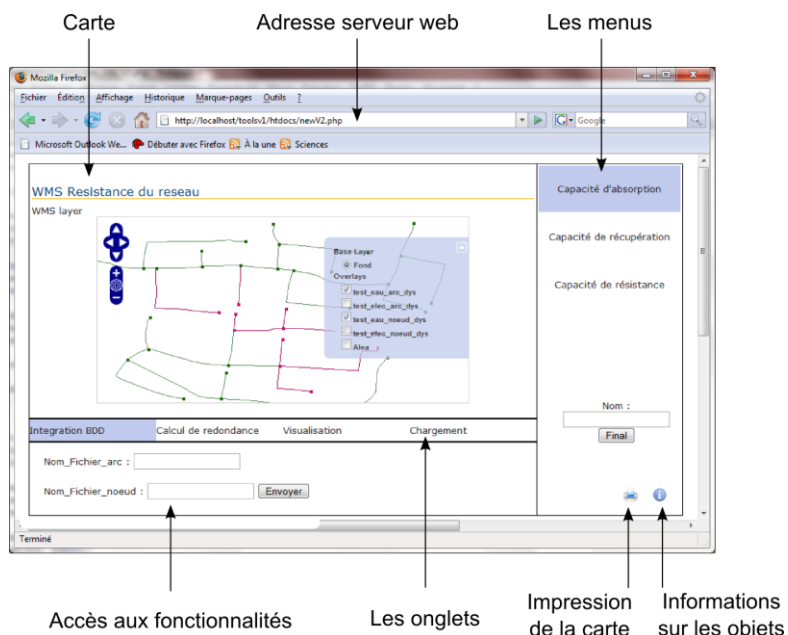


Figure 7. Description du Web SIRS

Pour l'étude de chaque de capacité, des onglets apparaissent au bas de la carte. Ces onglets représentent les différentes fonctionnalités permettant l'étude de la capacité sélectionnée (Fig. 13). Ainsi, ces fonctionnalités permettent l'intégration et l'archivage des données nécessaires aux calculs, l'analyse de ces données avec l'implémentation d'indicateurs choisis, et la visualisation des données géographiques. Cet affichage concerne aussi bien les données en entrée que les résultats. Il est aussi possible de consulter les informations correspondant aux objets affichés (les attributs relatifs à l'objet géographique sélectionné) à l'aide du bouton information situé en bas à droite de l'outil. De même, il est possible de créer une carte directement imprimable. Il est possible d'étudier un exemple précis à l'aide du calcul de la capacité d'absorption des réseaux pour comprendre le fonctionnement de l'outil. Ainsi, après avoir intégré les données caractéristiques d'un réseau, c'est-à-dire pour cet indicateur un graphe (des arcs et des sommets), le calcul de l'indicateur de redondance permettant d'évaluer les capacités d'absorption d'un réseau peut être lancé (Fig. 8).

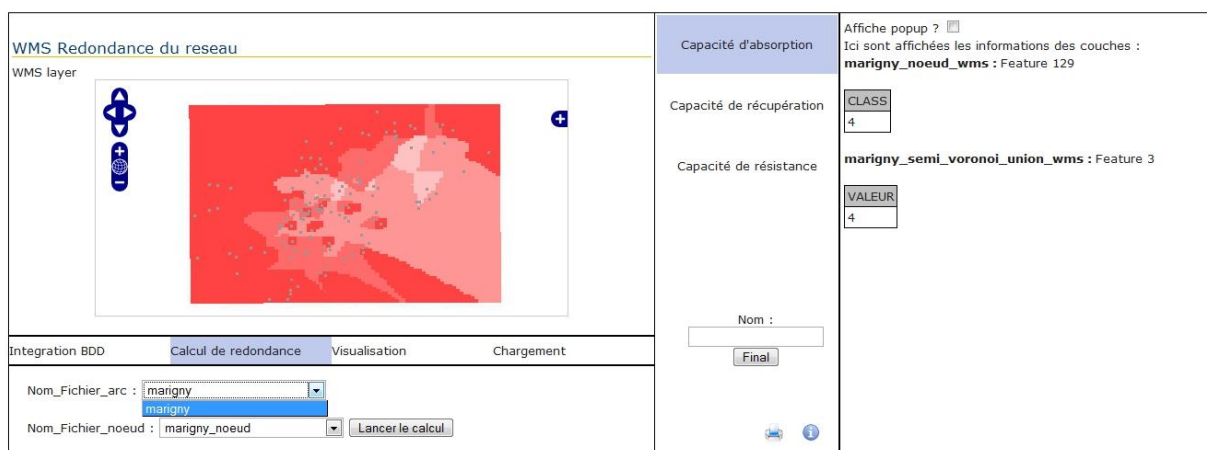


Figure 8. Interface montrant l'onglet calcul de redondance où l'on sélectionne le réseau que l'on souhaite évaluer et le panneau d'informations

Une fois le calcul réalisé, l’affichage d’une cartographie des résultats (requête GetMap) est alors proposée (Fig. 8). L’utilisateur peut alors interagir avec la carte pour afficher les informations liées aux couches affichées, à l’aide d’un simple clic sur la carte (requête GetFeatureInfo). Un panneau latéral affiche les informations relatives à l’objet cliqué (Fig. 8). L’impression des éléments affichés sur la carte est également permise par l’outil (Fig. 9). Un cartouche est constitué pour y générer automatiquement la légende correspondante et une boîte de dialogue s’ouvre permettant de donner un titre à la carte.

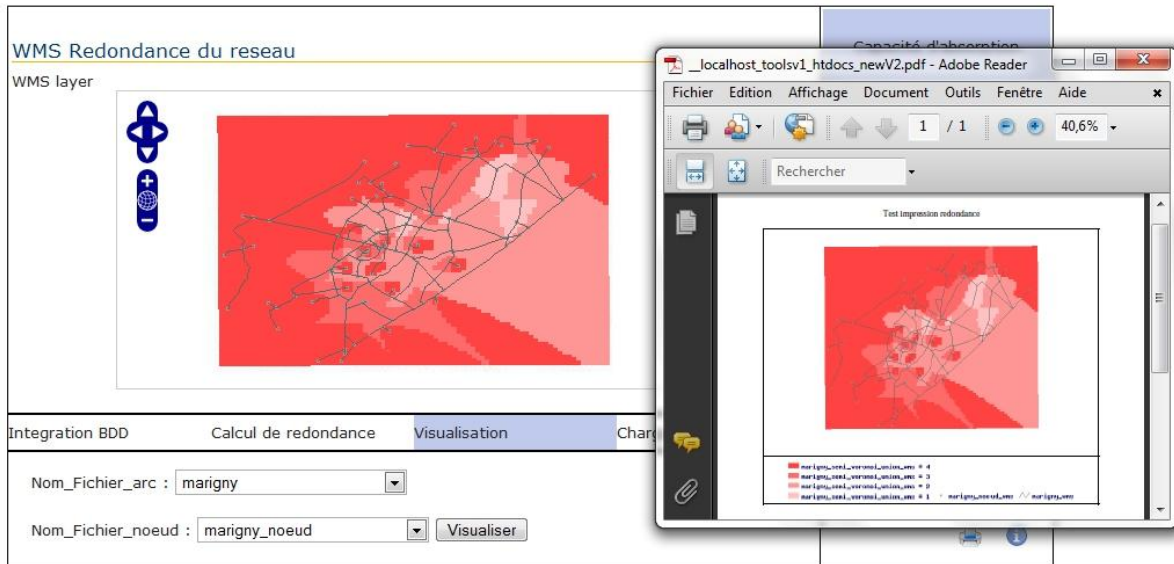


Figure 9. Interface montrant sa fonctionnalité d’impression cartographique

En synthèse, le Web SIRS développé permet l’évaluation de la résilience des réseaux techniques urbains selon les trois capacités. Ainsi, l’outil permet l’exploitation des méthodes présentées. Le Web SIRS fonctionne d’un point de vue technique et doit être maintenant testé sur des villes réelles. Il permet au final une évaluation de la résilience technico-fonctionnelle des réseaux techniques urbains. D’autres méthodes et outils sont en encore en cours de développement. Ils visent, à la fois en s’appuyant sur ce Web SIRS, l’évaluation de la résilience d’un point de vue organisationnel (Toubin et al., 2012).