



HAL
open science

La ville résiliente aux inondations Méthodes et outils d'évaluation

Damien Serre

► **To cite this version:**

Damien Serre. La ville résiliente aux inondations Méthodes et outils d'évaluation. Architecture, aménagement de l'espace. Université Paris-Est, 2011. tel-00777206

HAL Id: tel-00777206

<https://theses.hal.science/tel-00777206>

Submitted on 17 Jan 2013

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.



Université Paris - Est
MEMOIRE
présenté
En vue de l'obtention de

L'Habilitation à Diriger des Recherches

Spécialité : Génie Urbain

présentée et soutenue publiquement par

Damien SERRE

La ville résiliente aux inondations
Méthodes et outils d'évaluation

Flood resilient city
Assessment methods and tools

Jury Richard Ashley, Professeur, UNESCO IHE, Sheffield University, Rapporteur
 Youssef Diab, Professeur, Université Paris-Est, Directeur d'HDR
 Richard Laganier, Professeur, Université Paris 7, Rapporteur
 Jean Laterrasse, Professeur, Université Paris-Est, Rapporteur
 Marcel Miramond, Professeur, INSA de Lyon, président
 Laurent Peyras, HDR, Cemagref Aix en Provence, Examineur
 Chris Zevenbergen, Professeur, UNESCO IHE, Examineur

Décembre 2011

« L'homme transforme l'aléa naturel en catastrophe »

Salvano Briceño

Director of the Secretariat of the International Strategy for Disaster Reduction (UN/ISDR)
Le Monde, Article publié le 28 Août 2010

Remerciements

Je tiens à adresser mes remerciements d'abord à Richard Ashley, Richard Laganier et Jean Laterrasse pour avoir accepté de rapporter ce mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches. Je remercie également Marcel Miramond, Laurent Peyras et Chris Zevenbergen pour leur rôle d'examineur dans ce jury d'HDR.

Un grand merci à Youssef Diab, non seulement pour avoir accepté de diriger cette Habilitation, mais surtout pour m'avoir fait confiance depuis le début, pour m'avoir ouvert les portes de l'institution, puis guidé à travers les aléas jusqu'à l'atteinte de cet objectif. Finalement, on a plusieurs fois testé le concept de résilience : nos capacités d'adaptation et de rebond ne sont plus à démontrer.

Je remercie tout particulièrement les étudiants qui ont contribué à cette recherche. Je pense en particulier à celles et ceux ayant commencé par des stages, puis décidés de continuer dans le cadre d'un doctorat. Dans le désordre : Marie, Mireia, Serge, Angel. Avec le recul, vous êtes ma plus grande satisfaction de ces quatre années passées à l'EIVP. Je n'oublie pas Sonia, Laurence, Saul et William : vos stages ont aussi permis le développement de cette recherche, et enfin Marc Vuillet pour la poursuite au Cemagref de mes travaux de thèse.

Merci à l'équipe recherche de l'EIVP, chercheurs, jeunes chercheurs et soutien à la recherche, pour l'émulation, la motivation et la solidarité. Ces remerciements seraient incomplets si j'oubliais les partenaires académiques, industriels et institutionnels impliqués dans cette recherche : non seulement je ne les oublie pas, mais j'espère que nos collaborations se poursuivront dans le même esprit ces prochaines années.

Je ne peux qu'être reconnaissant à Widodo et Ernst Stijn pour la recherche, bien entendu, mais surtout pour tout le reste : ambiance, crises de rire, sports, apéros, et tous nos coups fourrés et nos « collaborations de fortune » ! Ce n'est que le début, le meilleur est à venir, en prenant garde de ne pas devenir des dikkeneks...

Julie, juste pour nous et notre place au soleil.

Table des matières

Contexte de la recherche et démarche scientifique	11
1. Croissance urbaine, changement climatique et risque inondation	11
2. La ville résiliente	15
3. Des ouvrages de protection contre les inondations à maintenir	21
4. Des réseaux techniques urbains sensibles	23
5. Démarche scientifique et objectifs poursuivis	27
6. Cadre de réalisation de la recherche.....	28
Partie 1 Méthodes d'évaluation de la résilience des systèmes techniques urbains face aux inondations	33
1. Le concept de résilience des systèmes techniques urbains	34
1.1. La résilience comme réponse au risque inondation en ville.....	34
1.2. Les systèmes techniques urbains : des infrastructures essentielles	35
2. Evaluer la capacité de résistance des systèmes techniques urbains	40
2.1. Objectifs scientifiques et principes	40
2.2. Comment évaluer la capacité de résistance des systèmes techniques urbains ?	40
2.2.1. Les méthodes pour modéliser le fonctionnement des systèmes complexes.....	40
2.2.2. Les modèles issus du raisonnement qualitatif	50
2.2.3. Proposition méthodologique pour l'évaluation de la capacité de résistance des systèmes techniques urbains.....	53
2.3. La capacité de résistance des digues	53
2.3.1. L'analyse fonctionnelle des digues	54
2.3.2. L'analyse des modes de défaillance des digues et de leurs effets	56
2.3.3. Modèle fonctionnel pour les scénarios de rupture des digues.....	57
2.3.4. Application aux mécanismes de rupture des digues.....	59
2.4. La capacité de résistance des réseaux techniques urbains.....	62
2.4.1. Les méthodes de la Sûreté de Fonctionnement appliquées à un réseau technique urbain particulier : la voirie	63
2.4.2. Les méthodes de la Sûreté de Fonctionnement appliquées au système de systèmes de réseaux urbains.....	69
2.4.3. Automatisation de la construction des scénarios.....	73
3. Evaluer la capacité d'absorption des réseaux techniques urbains.....	77
3.1. Objectifs scientifiques et principes	77
3.2. Comment évaluer la redondance d'un réseau ?.....	77
3.3. Développement de nouveaux indicateurs pour l'évaluation de la redondance	81
4. Evaluer la capacité de récupération des réseaux techniques urbains	85
4.1. Objectifs scientifiques et principes	85
4.2. Comment évaluer la capacité de récupération des réseaux techniques urbains ?	85
4.3. Quelques indicateurs pour l'évaluation de la capacité de récupération des réseaux techniques urbains	88
5. Bilan et perspectives.....	92
Partie 2 Conception de Systèmes d'Information à Référence Spatiale pour l'amélioration de la résilience urbaine face aux inondations	95
1. Le concept d'outil d'aide à la décision.....	95

1.1. SIRS/SIG et intégration d'indicateurs de décision.....	96
1.2. Des SIRS en partage sur le web	98
2. Un SIRS pour l'amélioration de la résistance des digues	100
2.1. Objectifs scientifiques et principes	100
2.2. Un SIRS Dignes initial pour la gestion des données.....	101
2.3. Un SIRS Dignes pour l'évaluation de la capacité de résistance	103
3. Un Web SIRS pour l'amélioration de la résilience des réseaux	110
3.1. Objectifs scientifiques et principes	110
3.2. Développement technique du Web SIRS pour l'évaluation des capacités de résistance, d'absorption et de récupération des réseaux techniques urbains.....	110
3.3. Vers un Web SIRS participatif pour la gouvernance des services urbains en réseaux	114
3.3.1. Contexte et objectifs.....	114
3.3.2. Vers une méthodologie d'aide à la de gouvernance des réseaux techniques urbains	115
3.3.3. Les premiers outils de sensibilisation des acteurs à la gouvernance des réseaux techniques urbains	119
4. Bilan et perspectives.....	126
Perspectives pour les prochaines années.....	129
1. Evaluer la résilience urbaine : un axe de recherche à poursuivre	130
1.1. Evaluation de la résilience multirisque : coordination scientifique du projet RESILIS	130
1.2. Amélioration de la connaissance des réseaux techniques urbains : co-direction de la thèse d'Angel Paterna-Hidalgo	132
2. Concevoir la ville résiliente : un axe de recherche à initier	134
2.1. Résilience et conception de la ville durable : co-direction de la thèse de Mireia Balsells Mondejar.....	134
2.2. Résilience urbaine et mixité des fonctions.....	137
3. Applications opérationnelles	138
Références bibliographiques	141
Annexes : CV Damien Serre.....	149
Intérêt scientifique.....	150
Référents.....	152
Prix et distinctions.....	152
Emplois et qualifications	153
Compétences	155
Enseignement	156
Projets de recherche	158
Encadrement d'étudiants	163
Publications	166
Responsabilités et activités collectives	172

Contexte de la recherche et démarche scientifique

1. Croissance urbaine, changement climatique et risque inondation

Plusieurs causes compliquent aujourd'hui la gestion du risque inondation 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)¹. 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 (Fig. 1) pose à elle seule les enjeux liés à la maîtrise du risque inondation en ville (APFM, 2008)².

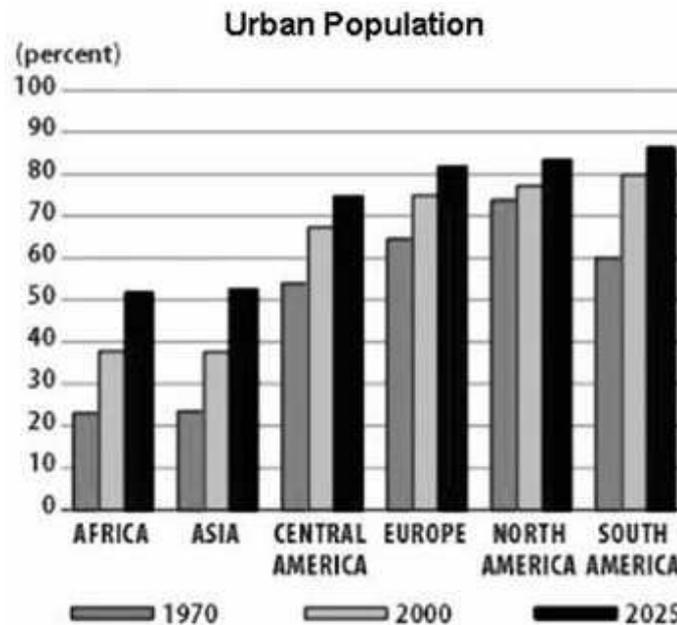


Figure 1. Croissance de la population urbaine (APFM, 2008)

Cette urbanisation rapide s'accompagne généralement d'un étalement urbain important (Fig. 2). Cet étalement urbain est à lui seul générateur de risque 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 pour la collecte et l'évacuation des eaux (Gourbesville, 2008).

¹ United Nations

² Associated Program on Flood Management

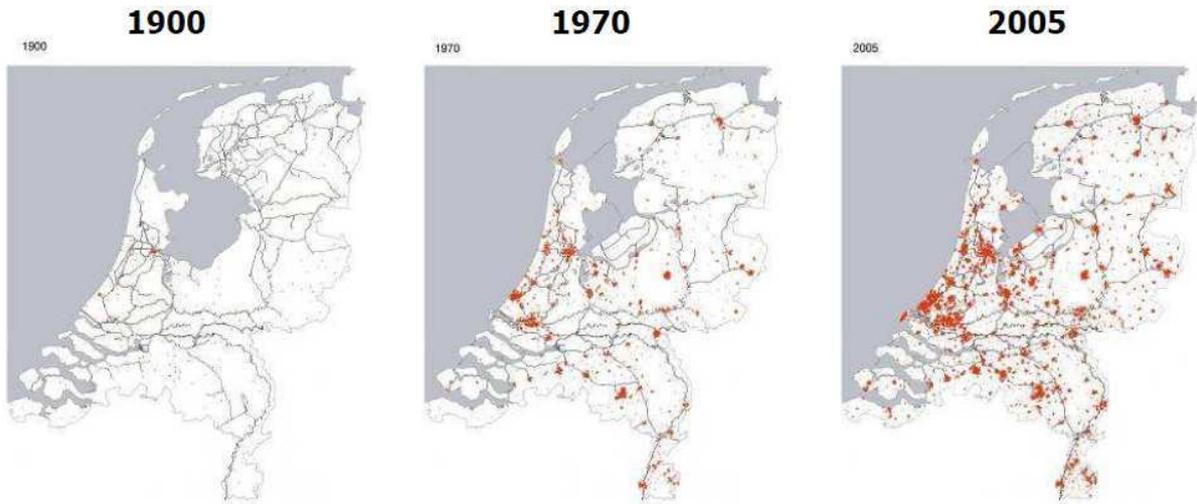


Figure 2. Processus d'urbanisation aux Pays Bas entre 1900 et 2005 (Kempenaar, 2010)

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'IPCC³ (Fig. 3).

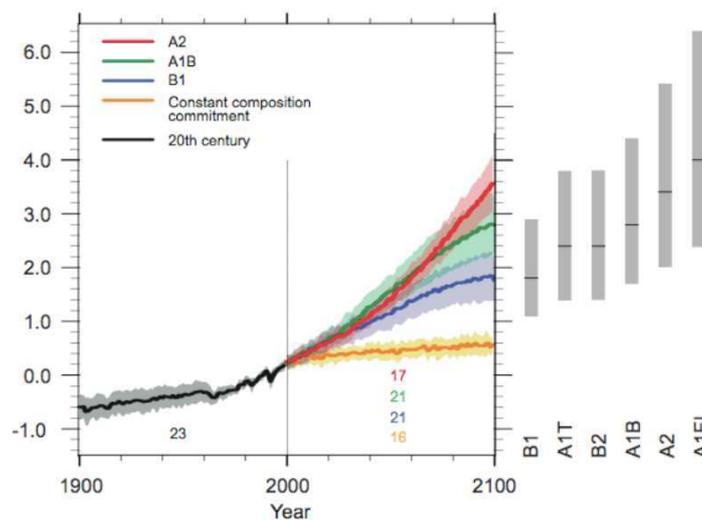


Figure 3. Évolution de la température moyenne de l'air au niveau du sol, selon différents scénarios (IPCC, 2007)

Mais, quel que soit le scénario retenu, des conséquences sur la fréquence et la sévérité des précipitations sont attendues. De même, des épisodes de sécheresse plus intenses alterneront avec ces précipitations plus fortes (Lamarre, 2008). Cette sécheresse aura une action directe sur l'imperméabilisation des sols. Ainsi, des précipitations plus intenses sur des sols plus imperméables, augmenteront le risque inondation. De plus, d'autres sources d'inondations provenant de l'élévation du niveau marin sont à craindre. Également, d'autres incertitudes liées à la fiabilité des données, à leur acquisition, puis à leur exploitation, compliquent la gestion du risque inondation (Barroca, 2006). C'est sur la base de ces données incertaines,

³ International Panel on Climate Change

incomplètes et imprécises que sont produits les modèles de prévision des crues, de même que le dimensionnement des ouvrages de protection.

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 du risque inondation pour anticiper des scénarios d'inondation 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. Le risque d'inondation devrait augmenter de manière significative (Fig. 4) : 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)⁴. Environ 75% de ces dommages seraient recensés en milieu urbain (COST22, 2008).

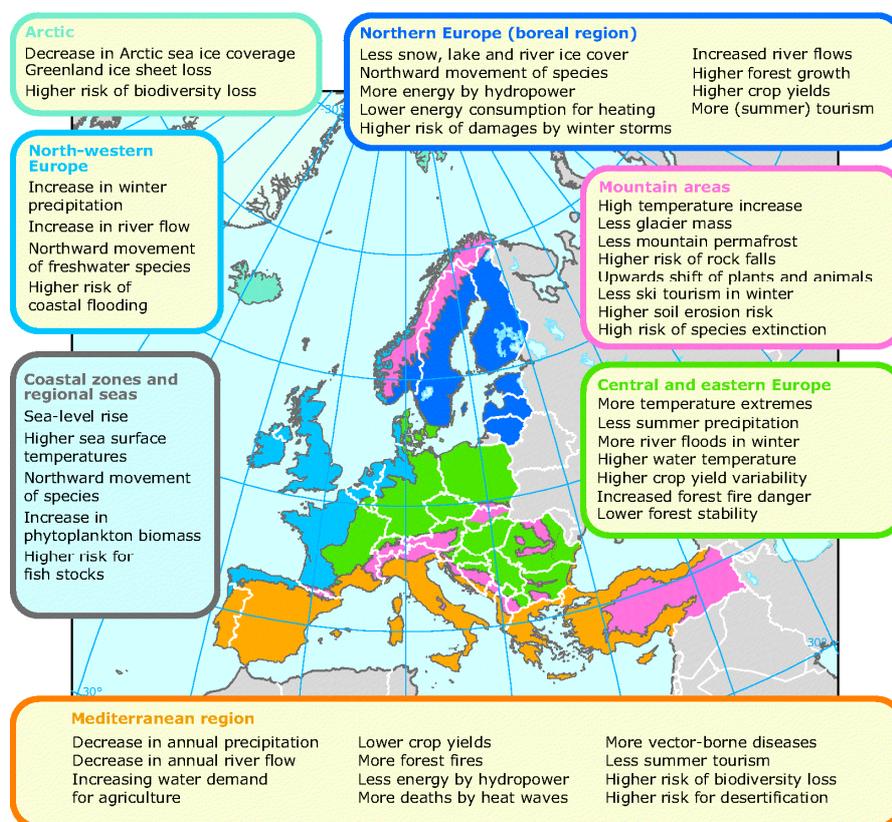


Figure 4. Effets attendus du changement climatique en termes de risque inondation en Europe (EEA, 2008)

En France, le risque inondation représente aujourd'hui 80 % du coût des dommages imputables aux risques naturels, soit une moyenne de 250 millions d'Euros par an, c'est 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, ce qui représente au total 4,5 millions de personnes occupant 20.000 km² de zones inondables.

⁴ European Environment Agency

Plus localement, une crue de la Seine de type 1910 (200 mm de précipitations pendant 3 jours pour des débits de la Seine de 2400 m³/s) causerait 12 milliards d'euros de dommages. De la même manière, une crue de la Loire de type 1856 causerait 6 milliards d'euros de dommages et 300 000 personnes seraient affectées. Comme le montrent des travaux récents, exposés dans le cadre de la 4^e Table ronde de l'Institut d'Aménagement et d'Urbanisme de la région Ile-de-France du 10 décembre 2009, « Aménager avec le fleuve : robustesse et risques d'inondations », mais aussi lors du colloque de mars 2010 de la Société Hydrotechnique de France « Risques inondation en Ile de France, 100 ans après les crues de 1910 », ou encore avec les travaux de l'IIBRBS (Institution Interdépartementale des Barrages-Réservoirs du Bassin de la Seine), la situation de la région Ile-de-France est particulièrement critique. Par ailleurs, l'attractivité et l'accroissement de la démographie de la région Ile-de-France ont abouti à autoriser la construction de logements, entreprises et de bâtiments publics dans des zones inondables (Tab. 1). Ainsi le Val-de-Marne est un des trois départements (avec le Var et les Alpes-Maritimes) qui se distinguent par un taux de construction élevé de logements dans les zones inondables (plus de 8 000 entre 1999 et 2006). Concernant les autres départements franciliens, les Hauts-de-Seine (plus de 6 500 logements construits entre 1999 et 2006 dans les périmètres inondables) et la Seine-et-Marne (plus de 2 500 logements construits entre 1999 et 2006 dans les périmètres inondables) densifient les zones inondables. Ces nouveaux logements viennent s'ajouter à l'urbanisation préexistante en zone inondable qui est déjà très importante dans cette région.

	Zones inondables	Zones non inondables
Surfaces (en milliers de km ²)	2,73	9,85
Nombre d'habitants en 1999 (en millions)	2,72	14,63
Nombre de logements en 1999 (en millions)	1,45	7,27
Nombre de logements en 2006 (en millions)	1,55	7,70
taux de croissance des logements entre 1999 et 2006	6,90 %	5,91 %

Tableau 1. Evolution des constructions en zones inondables en France (<http://www.developpement-durable.gouv.fr/-Prevention-des-risques-.html>)

Il résulte de ces phénomènes sociaux (étalement urbain, urbanisation en zone inondable 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 du risque inondation en milieu urbain doivent être envisagées (Zevenbergen *et al.*, 2011). Ces stratégies doivent intégrer cette multitude de facteurs aggravant comme le développement urbain, le changement climatique et l'ensemble des sources possible d'inondations en ville (Blanksby *et al.*, 2009), ce qui complique la gestion du risque inondation. Cette gestion intégrée doit intervenir à plusieurs échelles spatiales et temporelles. L'enjeu est bien d'augmenter la résilience de la ville existante face aux inondations, mais aussi de concevoir les nouveaux quartiers urbains ou les nouvelles villes en considérant tous ces enjeux : certains urbanistes prônent la transformation de l'inondation, vécue comme un événement négatif, en une opportunité urbaine (Fig. 5). Il s'agit ici de concevoir la ville adaptée au risque d'inondation, avec des quartiers flottants ou construits en élévation.



Figure 5. Life with water, Baca Architects for Dordrecht City

2. La ville résiliente

Genèse du concept de résilience urbaine

La catastrophe survenue à la Nouvelle-Orléans suite à l'ouragan Katrina en 2005 a provoqué une combinaison d'événements en chaîne (rupture de digues, problèmes liés à la gestion de la crise, à l'évacuation...). Cette catastrophe a suscité un certain nombre de publications concernant la résilience urbaine de la part des géographes (Campanella, 2006), (Cutter *et al.*, 2008), (Maret *et al.*, 2008, Hernandez, 2009).

La plupart de ces études utilisent le concept de résilience en rapport avec la notion de « recovery » (Campanella, 2006), (Hernandez, 2009). Ce mot a une signification difficile à saisir quand il est appliqué à l'urbain (Campanella, 2006). En effet, « recovery » n'est pas l'équivalent de « rebuilding ». Par conséquent, la résilience urbaine n'est pas simplement synonyme de reconstruction (Hernandez, 2009). Ainsi, pour Campanella, ce sont les habitants de la ville qui constituent sa résilience et non ses constructions.

Dans ces recherches, la résilience est alors souvent définie comme une capacité de rebond des sociétés (Campanella, 2006), (Hernandez, 2009), (Godschalk, 2003).

Ville résiliente et risques

Plus généralement, concernant les risques, les définitions de la résilience font majoritairement référence à cette notion de « recovery » (Klein *et al.*, 2003), (Mayunga, 2007). La résilience implique donc des dommages, puisque que ce concept correspond à une capacité de récupération consécutive à ces dommages.

La vision tendant à opposer résilience et vulnérabilité est alors remise en cause. En effet, le concept de résilience repose implicitement sur l'impossibilité de réduire les dommages à zéro. Par conséquent, il repose sur l'impossibilité de réduire les vulnérabilités à zéro. En fait, réduire à zéro les vulnérabilités reviendrait à annihiler tout processus de résilience.

Ainsi, le concept de résilience est vu comme un concept positif, contrairement au concept de vulnérabilité. Mais, l'aspect positif du concept résilience nécessite la survenue d'un événement négatif pour se manifester. Mais, le concept positif de résilience peut être remis en cause puisque des dommages doivent survenir pour que la résilience se produise. Cependant, le recours au concept de résilience se justifie pour la gestion des risques en milieu urbain, puisque, malgré les progrès techniques, il est désormais reconnu qu'aucune ville n'est à l'abri de la survenue d'événements catastrophiques (Godschalk, 2003)

Pourtant, certaines études concernant la résilience urbaine admettent directement que la résilience est « désirable » pour la ville, notamment car cette « propriété » ou cet « attribut » du système permet d'en réduire sa vulnérabilité (Pelling, 2003).

Pour cela, les chercheurs peuvent s'appuyer sur un corpus essentiellement issu d'études gouvernementales (UN/ISDR, 2002). L'objectif sous-jacent de ces recherches est notamment de donner une interprétation compréhensive du concept, dans le but *in fine* de proposer des solutions permettant d'améliorer la résilience urbaine aux acteurs de la gestion des risques.

Dans ce contexte, la résilience est un concept opérationnel considéré comme le l'opposé de la vulnérabilité (Folke *et al.*, 2002). Or, dans le même temps, pour ces mêmes chercheurs, la résilience est un facteur permettant de diminuer la vulnérabilité (Folke *et al.*, 2002). Il existe alors une potentialité de raisonnement tautologique (Klein *et al.*, 2003). En effet, comme la résilience est le l'opposé de la vulnérabilité, alors pour augmenter la résilience il faut diminuer la vulnérabilité, or comme pour diminuer la vulnérabilité il faut augmenter la résilience, pour augmenter la résilience il faut augmenter la résilience...

Dans la pratique, le concept de résilience en gestion des risques dépasse largement la notion de « recovery ». En effet, la résilience comme outil de gestion des risques est déjà mise en pratique par des agences gouvernementales (sécurité civile canadienne et néo-zélandaise) (Britton *et al.*, 2000).

Ainsi, certains chercheurs mettent en avant le concept de résilience pour des politiques plus durables de gestion des risques (Pasche *et al.*, 2005). Pour cela, ils peuvent s'appuyer sur le changement de paradigme de la gestion des risques effectué par plusieurs pays européens, concernant, par exemple, le risque inondation. La résilience est alors présentée comme une politique de gestion intégrée des risques. Il s'agit de ne plus uniquement lutter contre l'aléa, mais de vivre avec celui-ci afin d'en réduire les impacts négatifs au minimum (Pasche *et al.*, 2005).

Opérationnellement, il est alors pertinent de trouver des méthodes pour améliorer la résilience des bâtiments (Garvin, 2005). Dans ce cadre l'aménagement intérieur du bâtiment devient alors aussi important que sa structure (Garvin, 2005), (Manojlovic *et al.*, 2008). Aujourd'hui, l'application du concept de résilience se traduit essentiellement dans la conception de bâtiments dit résilients, c'est-à-dire construits de manière à subir le moins de dommages possibles (Fig. 6).



Figure 6. Exemple de bâtiments qualifiés de résilients à l'inondation, Francfort, 2009 (crédit personnel)

La résilience urbaine peut alors faire l'objet de deux lectures :

- soit la résilience urbaine est synonyme d'une gestion intégrée des risques urbains, généralement opposée au concept de vulnérabilité ;
- soit la résilience urbaine est synonyme d'une capacité de récupération et de rebond qui nécessite des impacts pour s'exprimer, sans opposition au concept de vulnérabilité.

Ces deux lectures nécessitent de préciser les différentes échelles spatiales ou temporelles d'utilisation du concept de résilience. L'opposition entre vulnérabilité et résilience permet de définir le concept de résilience par analogie. Malgré cette opposition, nous verrons que nous positionnons la résilience comme englobant la vulnérabilité (Lhomme *et al.*, 2010).

Résilience urbaine, transdisciplinarité, temporalité

L'étude du cadre théorique de la géographie des risques ne nous a pas permis de trouver un cadre théorique pour complètement définir la résilience. Ainsi, pour définir la résilience urbaine dans un contexte de risque, il semble plus pertinent de s'appuyer sur un corpus pluridisciplinaire (psychologie, physique, écologie, génie urbain, génie civil...) (Lhomme *et al.*, 2010). En effet, malgré la polysémie du concept, deux notions centrales peuvent être retenues dans le cadre de nos recherches.

La première notion est celle de « recovery », la deuxième notion est celle d'absorption, très utilisée en écologie (Holling, 1973), (Carpenter *et al.*, 2001), (Gunderson *et al.*, 2002), (Walker *et al.*, 2002).

Pour nos recherches, la résilience est alors définie comme « la capacité d'un système à absorber une perturbation et à récupérer ses fonctions à la suite de cette perturbation ». Appliquée à la ville, la définition peut être transposée ainsi : « c'est d'une part la capacité d'une ville à fonctionner alors que certains des composants du système urbain sont perturbés, d'autre part la capacité de la ville à se reconstruire (retrouver ses fonctions ou les adapter) à la suite de cette perturbation » (Lhomme *et al.*, 2010).

De plus, il apparaît dans cette recherche transdisciplinaire que les systèmes résilients sont des systèmes capables de s'adapter à une perturbation (Dovers *et al.*, 1992), (Gunderson *et al.*, 2002), (Fiksel, 2003). La résilience n'est donc plus simplement un concept lié au temps de la crise et de l'après crise (comme le suggère la définition retenue), mais un concept issu d'un processus d'apprentissage (Gunderson *et al.*, 2002), (Brand *et al.*, 2007), (Davidson-Hunt *et al.*, 2003), où la perturbation n'est que le révélateur de capacités sous-jacentes du système.

La résilience est un concept à partir duquel il est possible de diminuer les conséquences d'une perturbation (Mileti, 1999), (Pelling, 2003), et même de considérer cette perturbation du système comme une opportunité pour l'aménagement urbain (Pasche *et al.*, 2005).

Cette approche permet ainsi d'étudier la résilience en dehors du prisme de la vulnérabilité et de se positionner par rapport aux deux lectures de la résilience urbaine.

A partir de cette approche transdisciplinaire nous proposons une schématisation conceptuelle de la résilience (Fig. 7).

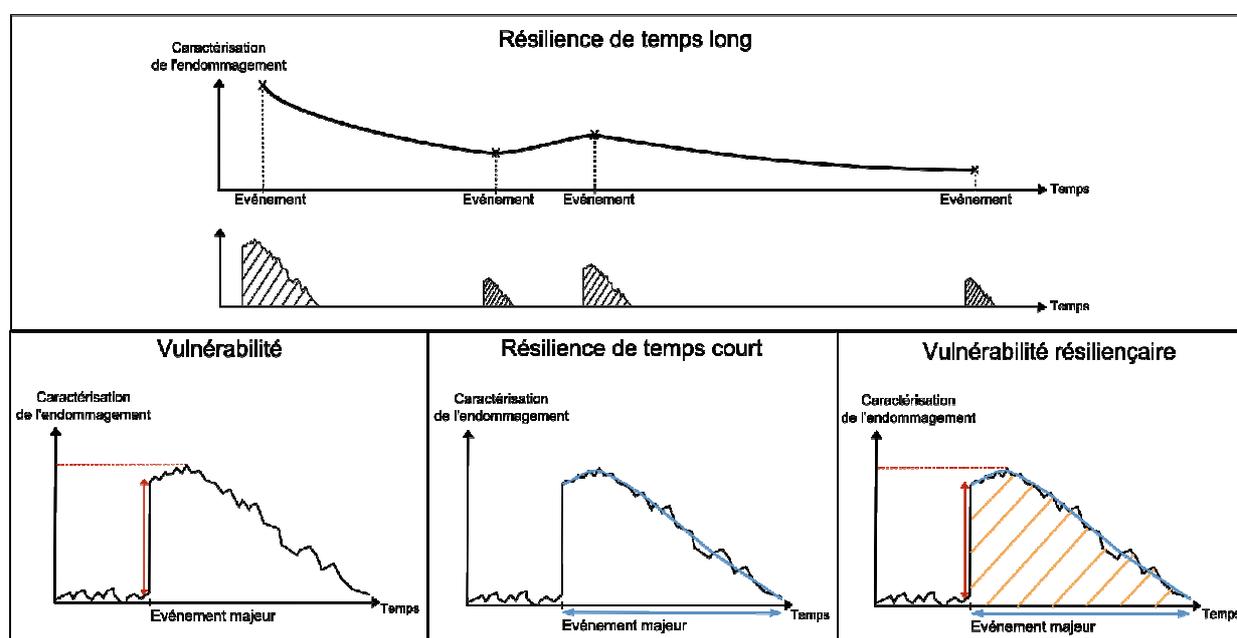


Figure 7. Résilience, processus de résilience, vulnérabilité

La résilience s'exprime alors par différents processus sur différentes phases et différents états d'un système.

Ainsi, un premier processus correspond à la résilience d'un système suite à une perturbation (résilience de temps court). Ce processus découle directement de la définition retenue. D'autre part, il existe une résilience (résilience de temps long) qui tient compte de l'apprentissage et de l'adaptation du système face aux risques, qui se construit en période « normale » (Fig. 7).

La résilience de temps court se caractérise principalement par une réponse du système consécutive à une perturbation ayant provoquée des endommagements. Les endommagements impliquent ici la perturbation du fonctionnement du système. Ainsi, la résilience est la capacité d'un système à assurer en partie son fonctionnement durant le temps des endommagements (temps représenté par la double flèche bleue) et à retrouver un fonctionnement « normal » à la suite de ces endommagements (capacité représentée par la courbe bleue).

La résilience se différencie dans ce contexte de la vulnérabilité, puisque la vulnérabilité est un concept qui se focalise plus particulièrement sur la mesure de l'endommagement, définissant la fragilité intrinsèque du système. C'est pourquoi, la vulnérabilité peut être évaluée par l'amplitude de ces endommagements, c'est à dire par les impacts directs (représentés sur le schéma par la double flèche rouge), ou bien par le niveau maximum de ces endommagements (représentés sur le schéma par la ligne rouge en pointillé) correspondant à une prise en compte partielle des dommages indirects.

Cependant, ces deux concepts étant placés dans une même continuité, il apparait clairement que ces deux concepts se superposent. Il est difficile de les étudier distinctement et de manière indépendante.

Par exemple, la réaction préventive d'un système face à une perturbation éminente peut avoir contribué à diminuer les impacts directs. Le recours au concept de vulnérabilité résilienciaire (Provitolo, 2009) permet alors de caractériser l'ensemble des mécanismes dont résultent les conséquences globales de la perturbation sur le système (les impacts directs, les impacts indirects, la réaction du système, la remise en service...). L'aire, représentée en orange sur le schéma, permet alors d'évaluer l'impact global de la perturbation correspondant à la vulnérabilité résilienciaire du système. Cette évaluation tient alors compte de la vulnérabilité et de la résilience du système. L'exemple d'une mesure synthétique du concept de vulnérabilité résilienciaire serait, dans ce cadre théorique, le coût économique total de la perturbation.

Cette réaction du système à une perturbation, synonyme de résilience de temps court, ne doit pas néanmoins aboutir à un retour à l'état initial, synonyme de stabilité et non pas de résilience. C'est pourquoi, la résilience de temps long se focalise sur la trajectoire du système face à plusieurs perturbations. En effet, dans le cas théorique d'une répétition d'aléas (d'événements sur le schéma) de même amplitude sur un système dont les caractéristiques restent inchangées dans le temps, les impacts globaux de ces aléas seraient identiques. Il n'y aurait donc aucune adaptation, ni aucun apprentissage du système (la courbe noire serait alors une ligne horizontale), ce qui dans le paradigme actuel de la gestion des risques est difficilement concevable.

La résilience de temps long correspond alors à une stratégie visant à diminuer les impacts globaux liés aux risques. Cela est notamment possible car la résilience de temps court ne correspond pas à un retour à l'état initial.

Afin de correctement appréhender le concept de résilience dans un contexte de risque, le concept de résilience nécessite de bien distinguer ces deux échelles de temps (auxquelles le concept va s'appliquer), car c'est cette distinction qui donne une cohérence globale au concept.

La ville résiliente aux inondations

Le concept de ville résiliente aux inondations est fait d'un mélange des définitions proposées ci-dessus. D'une manière générale, la ville résiliente aux inondations s'envisage à la fois sur le temps long et sur le temps court :

- sur le temps long, car l'objectif est l'adaptation de la ville à l'inondation en prenant en considération des processus à long terme, tels que l'urbanisation et le changement climatique et ses effets sur le risque inondation en milieu urbain. Le projet FloodResilientCity (www.floodresiliency.eu) s'inscrit dans cette tendance ;

- sur le temps court car l'objectif est de proposer des modélisations qui permettent des évaluations des niveaux de résilience urbaine et de produire de la connaissance dans ce domaine pour orienter les stratégies de réduction du risque inondation. Il s'agit à court terme de réaliser des tests des méthodologies et des outils d'évaluation proposés sur des villes réelles. C'est l'objectif du projet FloodProBE (www.floodprobe.eu) s'inscrit globalement dans cette tendance (van Ree *et al.*, 2011).

Les recherches menées sur la problématique de la ville résiliente aux inondations explorent des stratégies intégratives du concept de résilience urbaine (Zevenbergen *et al.*, 2011), (ResilienceAlliance, 2007), (UN/ISDR, 2002). Il s'agit d'étudier la capacité de la ville à fonctionner en mode dégradé, autant d'un point de vue technique qu'organisationnel. Il s'agit aussi d'évaluer la capacité de la ville à être remise en service. En outre, il est bien question de préparer la ville et de l'adapter aux inondations. Le projet FloodResilienCity s'inscrit dans cette démarche, en croisant les dimensions techniques et organisationnelles de la résilience. Au contraire, le projet FloodProBE vise en grande partie la résilience urbaine sous l'angle du génie urbain et du génie civil, avec une ouverture vers la résilience organisationnelle par la production de systèmes d'informations à référence spatiale.

De cette manière, c'est la gestion du risque inondation au sens large qui est intersectée par le concept de résilience (Zevenbergen *et al.*, 2011).

Ainsi, dans le cadre du projet FloodResilienCity, plusieurs collectivités du Nord Ouest de l'Europe s'associent afin de permettre une collaboration transnationale face à la problématique de la gestion des risques d'inondation. Dans ce projet, la résilience rentre dans un cadre général qui s'appuie sur quatre ensembles d'activités thématiques, chacun avec des programmes d'actions détaillés, fondés sur « l'approche des 4-A » (Fig. 8) :

- Awareness : concerne l'alerte, la sensibilisation au risque et l'apprentissage ;
- Avoidance : pour éviter d'augmenter les risques lorsqu'ils sont faibles ou inexistant, par exemple par la planification urbaine ;
- Alleviation : réduire les risques par des mesures structurelles et non structurelles ;
- Assistance : concerne la conception de plan de secours, à la fois en temps de crise et en préparation à l'événement redouté.

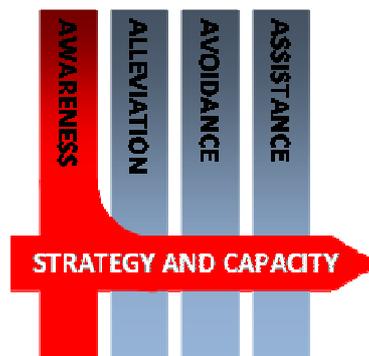


Figure 8. L'approche intégrée de gestion du risque inondation proposée dans le cadre du projet FloodResilienCity

Le projet FloodProBE, quant à lui, cherche à proposer des réponses à la ville résiliente en jouant sur des approches mixtes de la gestion du risque inondation (Fig. 9). La question de la

performance⁵ des ouvrages de protection contre les inondations est à intégrer avec l'évaluation de la résilience du territoire urbain protégé, résilience évaluée en termes de capacité de résistance, d'absorption et de récupération (Lhomme *et al.*, 2010)

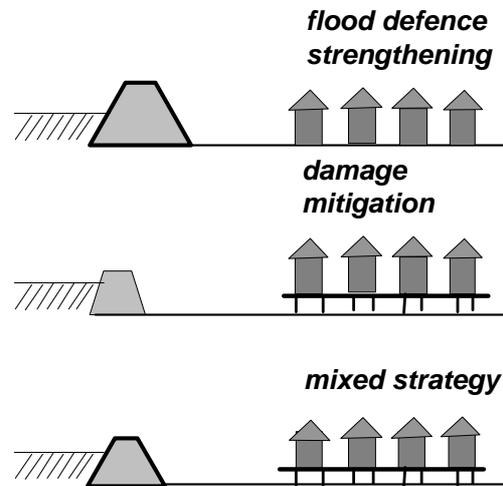


Figure 9. L'approche du projet FloodProBE en termes de stratégie de résilience urbaine (Van, 2008)

La recherche présentée dans ce mémoire s'inscrit dans le contexte de ces deux projets de recherche : FloodResilienCity et FloodProBE. Elle combine les approches des deux projets :

- l'approche holistique (technique et organisationnelle) de la résilience portée par FloodResilienCity ;
- l'approche technique de la résilience portée par FloodProBE.

En croisant ces approches, notre recherche vise l'évaluation technico-fonctionnelle de la résilience urbaine, au travers de recherches menées sur les digues de protection contre les inondations et les réseaux techniques urbains : les systèmes techniques urbains. Dans cette première approche, nous visons un apport scientifique pour la résilience de temps court. Puis, en s'appuyant sur cette analyse technico-fonctionnelle, des systèmes d'information à référence spatiale seront mis en œuvre pour répondre à des problématiques plus organisationnelles et visant la résilience de temps long.

3. Des ouvrages de protection contre les inondations à maintenir

Intégrer les excès d'eau au sein même de la ville n'a pas été, au cours du temps, l'option choisie naturellement par les aménageurs. En effet, face à l'aléa inondation, les hommes ont plutôt essayé de se protéger des débordements des cours d'eau et de la mer. Ils ont tout d'abord établi leurs lieux de vie dans des zones à la topographie favorable et hors des champs d'expansion des crues : il s'agissait, dans ce cas, d'une protection passive. Puis, ils ont tenté de dompter les cours d'eau pour vivre plus près de leurs abords et devenir ainsi des riverains

⁵ Aptitude d'une structure à remplir les fonctions pour lesquelles elle a été conçue. Par extension, on parle de performance d'une fonction pour indiquer l'état de réalisation de la fonction Cremona, C. 2002. *Application des notions de fiabilité à la gestion des ouvrages existants*. Association Française de Génie Civil.. Dans notre méthodologie d'évaluation de la résilience des systèmes techniques urbains, on parlera de capacité de résistance.

au sens originel du terme. Cette protection, dite active, a été rendue possible par la construction progressive de digues. A l'instar de celles de la Loire, les plus anciennes digues encore en fonctionnement aujourd'hui et surélevées au cours du temps, datent du Moyen-âge. Les hommes ont pu ainsi profiter des bénéfices du réseau hydrographique, qui représentait un axe de communication et d'échanges privilégié. Cela n'empêchait pas, lors des crues des cours d'eau que des digues se rompent et que les zones habitées soient inondées. De nombreux récits historiques viennent témoigner de ces événements et il existait, jusqu'à une période récente, un certain fatalisme des hommes face à la force des rivières et des fleuves ou face à la fragilité des ouvrages de protection.

Le risque induit par la rupture ou le dysfonctionnement des digues de protection contre les inondations se situe à l'interface entre le risque naturel (lié à l'aléa hydrologique) et le risque technologique (lié aux ouvrages eux-mêmes). La rupture d'une digue lors d'une crue fait partie de cette catégorie de risque dorénavant difficilement acceptée par les populations et les politiques concernées, en tous cas dans les pays développés. Par ailleurs, l'accroissement de la démographie et l'attractivité des villes ont abouti à autoriser la construction dans des zones potentiellement inondables. Il en résulte donc une vulnérabilité accrue dans les lieux protégés par les digues, ces ouvrages n'ayant en outre généralement pas été conçus pour résister à des crues exceptionnelles ou extrêmes. En effet, la plupart du temps les digues ont été dimensionnées pour des crues inférieures aux crues centennales. Des débordements des cours d'eau par-dessus les digues sont possibles (phénomène de surverse) (Serre, 2005).

Les crues conduisent de plus en plus souvent à des ruptures de digues, ce qui accroît les effets des inondations dans les zones censées être protégées par ces ouvrages. Citons quelques événements notables :

- en Chine en 1998 le long du fleuve Yangze, où les ruptures de digues ont provoqué la mort de 2000 personnes, selon les chiffres officiels du gouvernement Chinois ;
- à Saint Louis (Etats-Unis) le long du Mississipi en 1998, où des digues atteignant 15 mètres de hauteur se sont rompues ;
- les inondations dans le sud de la France en 1999, 2002 et 2003 ;
- à la Nouvelle-Orléans, en 2005, suite au passage du cyclone Katrina, puis Rita, 1500 morts et une ville de la Nouvelle Orléans qui peine à se reconstruire ;
- la tempête Xynthia fera 59 morts en 2011 à la suite de rupture de digues maritimes en Vendée et Charente Maritime.

Ces dernières années, les problématiques liées aux digues ont profondément évolué. Les questions liées à la conception et à la réalisation des ouvrages se sont déplacées vers leur gestion et leur exploitation, avec l'objectif sous-jacent de la maîtrise des risques qu'ils induisent (Peyras, 2009). Il s'agit donc de produire la meilleure gestion et la meilleure exploitation d'un parc de digues, et en particulier d'améliorer et d'optimiser les actions de maintenance, dans le souci permanent de maintenir sur le long terme un niveau de sécurité optimal pour l'aménagement hydraulique.

La maîtrise des risques liée aux digues est fondamentale et les défaillances de ces ouvrages sont susceptibles d'avoir des conséquences en vies humaines ou économiques lourdes, comme l'ont montré les inondations récentes dans le sud de la France : Languedoc-Roussillon en 1999 (36 victimes et 620 M€ de dommages), Gard en 2002 (23 victimes et 1200 M€ de dommages) et basse vallée du Rhône en 2003 (7 victimes et 1000 M€ de dommages) (Mériaux *et al.*, 2004).

Le constat de la fragilité des digues en France, face aux crues majeures, a conduit à prendre conscience que ces ouvrages avaient besoin d'être mieux diagnostiqués, surveillés et entretenus. Un recensement récent, réalisé par le Ministère chargé de l'Environnement, a mis en évidence des caractéristiques communes souvent observées sur ces ouvrages : construction avec des matériaux hétérogènes et sans moyen de compactage (digues anciennes), état général médiocre voire mauvais, entretien insuffisant ou absent, propriétaires parfois non identifiés, etc. Le grand linéaire de ces ouvrages (environ 10 000 km sur le territoire national) complique par ailleurs leur gestion.

Les digues de protection contre les inondations peuvent donc aggraver les risques d'inondation en milieu urbain. En effet, une digue mal conçue, sous-dimensionnée ou mal entretenue, provoque, lors de sa rupture, une vague déferlante en direction des territoires censés être protégés par l'ouvrage (Fig. 10). On parle alors de risque « résiduel » auquel la ville devra faire face.



Figure 10. Cas de rupture par surverse sur le Vidourle, Gard, 2002 (Source Cemagref)

Concevoir la résilience urbaine ne pourra se faire qu'en intégrant en donnée d'entrée un parc d'ouvrages de protection contre les inondations à performance variable, performance qu'il s'agira d'évaluer, puis de mettre à niveau pour assurer la sécurité des biens et des personnes. La performance des ouvrages de protection contre les inondations constitue donc une première étape pour aboutir à des villes plus résilientes aux inondations. *Ainsi, notre proposition d'évaluation de la résilience urbaine intègre les risques liés aux ouvrages de protection.*

4. Des réseaux techniques urbains sensibles

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

Le développement et la dépendance des villes aux réseaux techniques urbains (Fig. 11) 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 du risque inondation 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^è 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.



Figure 11. Les réseaux techniques innervent la ville et permettent la diffusion des flux
...face aux défis du 21^è 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.*, 2009a). 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.*, 2009a) et leurs effets, montrent la sensibilité des réseaux à tous types d'aléas, de l'erreur humaine, aux attentats, jusqu'aux aléas technologiques et naturels.

Les réseaux techniques urbains doivent être rendus plus sûrs au cours du 21^è 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 aboutit 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 crues 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 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 lors d'inondations montrent à la fois une dépendance du fonctionnement urbain à ses réseaux techniques et une diffusion des effets de l'inondation 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 d'inondations et à la fois propagateurs de cette vulnérabilité à cause de leurs interdépendances et de leurs extensions. Ce constat est d'ailleurs vérifié pour la plupart des risques naturels (Felts, 2005); (Vigneron *et al.*, 2006) (Tab. 2).

Réseau	Eau		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												
technologique	tempête	1											
	explosion												
humain	pollution												
	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 2. La vulnérabilité des réseaux techniques urbains face aux risques (Toubin, 2011)

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 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).

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 inondations (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'inondation, et leur capacité à être remis en service, pour améliorer l'efficacité de la ville à récupérer ses fonctions dépendantes de ses réseaux.

5. Démarche scientifique et objectifs poursuivis

Notre recherche a pour finalité la formalisation des connaissances utiles pour l'aide à la décision et pour l'aide à la fabrication de villes résilientes aux inondations. En particulier et en préliminaire, l'évaluation de la résilience urbaine vis-à-vis du risque inondation constitue l'apport principal de cette recherche pour permettre de s'appuyer sur un socle scientifique solide pour la fabrication de la ville résiliente à moyen terme. Les méthodes employées et les outils développés, ou en cours de développement, ont pour objectifs d'une part d'informer sur le niveau de résilience de la ville par rapport à des scénarios d'inondation, d'autre part d'aider sur les décisions à prendre pour augmenter le niveau de résilience des territoires urbains.

Cette recherche est donc transdisciplinaire et au service de la ville. La discipline scientifique principale utilisée dans le cadre de nos recherches est le Génie Urbain, discipline par essence transversale faisant appel à d'autres disciplines, parmi lesquelles nous avons utilisé la Sécurité de Fonctionnement, la théorie des graphes, la géographie des risques, l'aide à la décision et les Sciences de l'Information Géographique (Fig. 12).

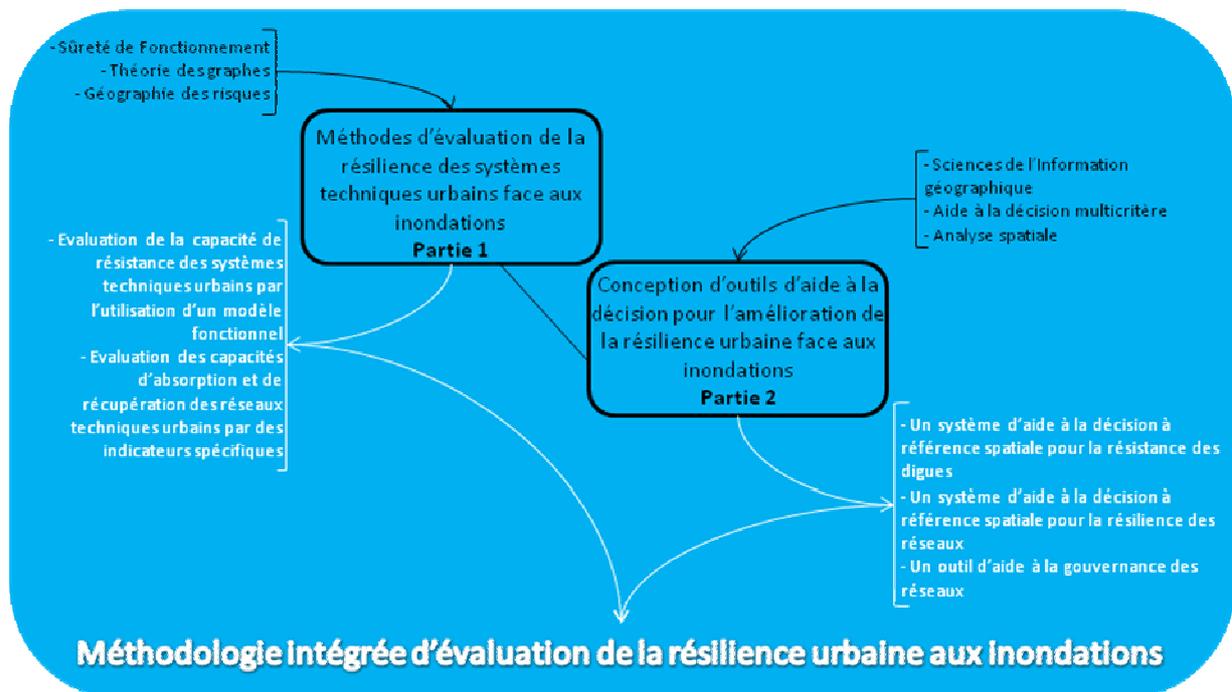


Figure 12. Etapes de la démarche scientifique, objectifs poursuivis, méthodologies mises en œuvre

Les recherches menées jusqu'alors, et retranscrites dans ce mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches, ont pour objectifs de proposer des pistes de réflexion en faveur de la ville résiliente en prenant en compte la capacité de résistance des systèmes techniques urbains (digues et réseaux), puis la capacité d'absorption des réseaux techniques urbains (Partie 1). Nous chercherons à évaluer le niveau de résilience des réseaux techniques urbains pour

répondre à la capacité de la ville à fonctionner en mode dégradé, puis à sa capacité à être remise en service. Enfin, nous proposerons des outils dédiés à l'aide à la décision pour l'amélioration de la résilience urbaine en vue de spatialiser les connaissances produites sur les systèmes techniques urbains : spatialisation des capacités de résistance, d'absorption, et de récupération. Enfin, en s'appuyant sur ces trois capacités, nous mettons en œuvre des outils pour l'aide à la gouvernance des systèmes techniques urbains. Ces outils d'évaluation de la résilience urbaine sont décrits dans la partie 2.

6. Cadre de réalisation de la recherche

Forte de 1500 ingénieurs diplômés et de son expérience en aménagement et gestion urbaine, l'EIVP s'est engagée depuis maintenant cinq ans dans la recherche. L'approche transversale en matière d'enseignement retenue par l'école depuis sa création, constitue dans ce domaine un atout certain : la gestion de projet inclut négociation, communication, prise en compte du temps et des moyens ; le génie urbain, transdisciplinaire, implique quant à lui l'intervention de nombreux acteurs dans des domaines différents en vue de réaliser un ouvrage, une infrastructure, un projet. Cette approche spécifique à l'EIVP a permis de développer des recherches originales, alliant la qualité scientifique et l'utilité opérationnelle. Pour assurer une bonne gestion des villes, il est en effet indispensable que les techniques mises en œuvre présentent pour les citoyens la plus grande fiabilité possible. C'est cette démarche qui permet à l'EIVP de faciliter la gestion de projets urbains complexes (EIVP, 2009).

Sous l'impulsion de son directeur scientifique et de son équipe d'enseignants-chercheurs, l'EIVP a privilégié les domaines d'investigation dans lesquels ses diplômés ont acquis une expertise reconnue, notamment les risques et la résilience des villes, les énergies nouvelles et le climat dans les villes.

En rejoignant le pôle de compétitivité Advancity, comme en renforçant ses liens avec des partenaires français (UPEMLV, ENPC) ou étrangers (EHTP de Casablanca, Polytechnique de Madrid ou de Barcelone, Université de Rio de Janeiro) ou en s'impliquant particulièrement dans les réseaux Erasmus (avec 11 Écoles et Universités dans 5 pays), l'école s'est insérée dans un réseau d'échange et de réflexion particulièrement dynamique qui facilite son développement. Il a permis aux chercheurs de l'EIVP d'être créatifs et entrepreneurs. La recherche de l'école pallie ainsi les carences des approches disciplinaires de la recherche urbaine en France. Le génie urbain permet de faire travailler dans une démarche systémique des chercheurs de cultures différentes, au service d'un système hétérogène complexe et riche (Diab, 2008).

Ces connaissances transversales constituent le socle des recherches en génie urbain ; à charge pour nous de mettre celles-ci au service de l'excellence grâce à une production scientifique identifiée et reconnue. Pour l'EIVP, en effet, la recherche doit aller de pair avec l'excellence et nous souhaitons, à travers nos travaux, poursuivre et revendiquer cette voie.

Ces trois dernières années ont vu l'émergence de l'EIVP dans le paysage de la recherche :

- adhésion et participation active aux actions du pôle de compétitivité Advancity ;
- implication forte dans des projets de recherche de l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) (Villes Durables, Stock E) et des projets européens (7ème PCRD, Interreg).

Le plan triennal 2010-2012 prévoit de travailler autour de deux thèmes phares :

- les énergies en ville et le climat urbain ;
- la gestion des risques et la résilience urbaine.

C'est dans le contexte d'une activité de recherche récente, partenariale et internationale que l'axe de recherche « risques et résilience urbaine » s'est structuré et continue son développement.

Ces thématiques phares se nourrissent bien évidemment d'autres enjeux transversaux importants comme les questionnements liés à l'aménagement, les systèmes d'information et l'innovation urbaine. Les relations entre espaces publics urbains et services constituent également des champs de recherche importants.

L'encadrement et la co-direction de trois doctorants ont permis d'atteindre des résultats exploitables en faveur de l'évaluation de la résilience des villes. Ces résultats contribuent à la rédaction de ce mémoire d'HDR :

i) Marc Vuillet (2009-2012)

Le parc de digues en France est constitué essentiellement d'ouvrages anciens, voire très anciens. Dans le parc de digues en charge en permanence, les digues de canaux de VNF datent pour la plupart du 19^{ème} siècle. Ces ouvrages sont hétérogènes et assez mal connus des gestionnaires, et on note environ 10 ruptures par an, en moyenne, le long des canaux navigables (Daly *et al.*, 2004). Un constat analogue peut être fait pour les digues de protection contre les inondations, dont certaines constructions remontent au Moyen Age (Mériaux *et al.*, 2005).

Les objectifs scientifiques de la thèse sont de proposer une méthodologie d'évaluation de la performance des digues, d'identifier et comprendre les causes de variabilités (spatiales et temporelles), d'analyser la relation entre la qualité des données et la qualité du profil de performance, de proposer une méthodologie d'auscultation et de confortation des informations.

L'analyse structurelle des différentes catégories types d'ouvrages, telles qu'elles sont observées en situation réelle, permettra :

- d'établir une typologie des digues, de lister les composants constitutifs des ouvrages,
- de repérer leur position physique et de déterminer les interactions avec les autres composants,
- d'étudier les interactions des composants entre eux et avec les milieux extérieurs : les contacts, les sollicitations mécaniques, les flux hydrauliques...

Le modèle fonctionnel à développer permettra la modélisation des mécanismes de vieillissement et de rupture des digues. Sur la base de ce travail de capitalisation de la connaissance sur la pathologie des digues, nous modéliserons les différents mécanismes des digues : modes de défaillance en jeu ; phénomènes conduisant et résultant de ces modes de défaillance ; indicateurs permettant de détecter les phénomènes. Les scénarios seront représentés sous forme d'arbres de défaillance correspondant à chaque mécanisme.

Ici aussi, une place toute particulière sera faite à l'analyse des échelles de temps et d'espace caractérisant à priori ces phénomènes. En particulier les experts auront à se prononcer sur des grilles d'analyse permettant d'estimer la cinétique des phénomènes internes aux digues et les étendues géométriques de ces phénomènes.

Les indicateurs de performance des digues vis-à-vis des différents mécanismes seront construits par les experts à partir des informations extraites de la modélisation fonctionnelle. Ces indicateurs de performance seront estimés à partir des déclarations d'experts mais aussi lorsqu'elles existent par le traitement d'informations repérées spatialement :

- les méthodes d'évaluation des performances prendront en compte le traitement des imperfections, incomplétude, imprécisions, incertitudes par des approches de type statistique, logique floue et fusion de données ;
- l'identification et la compréhension des causes de variabilités de même que la méthodologie de confortation des informations seront fondées sur les outils et méthodes de la géostatistique.

L'analyse des relations entre la qualité des données et la qualité du profil de performance sera basée sur des analyses de sensibilité aux agrégateurs et aux échelles d'évaluation.

Enfin, on tentera de dégager une méthodologie de prise en compte de la qualité des informations fournies par l'auscultation en fonction des essais réalisés et de l'échelle d'analyse. La variabilité spatiale sera caractérisée quantitativement à partir de données fournies par les partenaires, la variabilité temporelle sera analysée qualitativement à partir de dossiers d'historiques et de suivi.

ii) Serge Lhomme (2009-2012)

Le concept de résilience est ainsi devenu en quelques années un concept central de la gestion des risques, notamment dans les pays Anglo-Saxons. Cependant au moment où les collectivités territoriales tentent de mettre en place des dispositifs pour développer la résilience, les travaux à l'échelle territoriale (ville, bassin versant) sont rares. Or, les acteurs publics ont besoin de cette vision globale de leur système territorial. C'est pourquoi dorénavant, il est nécessaire de concevoir une approche systémique du risque, appliquée notamment à la ville.

Depuis les années 1970, la ville a fait l'objet d'approches systémiques. En effet, la ville peut être considéré comme un système à l'intérieur d'un système de villes, chaque système résultant lui-même de la conjonction de plusieurs sous-systèmes ou réseaux (continus ou discontinus) dont les périmètres peuvent ne pas être identiques, voire être plus larges que celui de la ville ou de l'ensemble urbain auquel ils sont rattachés au plan administratif. Tous ces systèmes sont caractérisables par un certain niveau de fragilité propre, un degré d'interdépendance qui va renforcer leur vulnérabilité, une désorganisation en cas de survenance d'un aléa, voire une destruction, une capacité à redémarrer à la suite de ce même aléa, etc.

L'approche systémique qui rajoute à l'analyse classique de chaque élément, l'étude des interrelations entre éléments et la prise en compte des effets dominos, l'identification et la mesure des indicateurs de fonctionnement (fondamentaux pour l'anticipation), l'analyse des mécanismes de régulation, permettra de trouver des solutions pertinentes et de servir de base au développement de la résilience urbaine.

L'idée est donc à partir d'une approche systémique de la ville, de modéliser ce système face au risque et de l'intégrer dans un Système d'Information Géographique (SIG), afin que les acteurs publics puissent analyser leur vulnérabilité et contribuer à améliorer leur résilience.

Pour cela les travaux suivant devront être réalisés :

- modéliser le fonctionnement du système urbain avant, pendant et après une catastrophe (la crue) ;

- travailler à la mise en place d'indicateurs de vulnérabilité et de résilience du système urbain ;
- coupler le modèle urbain et les indicateurs à un SIG ;
- proposer et simuler des scénarios de reconstruction du système urbain ;
- appliquer le modèle et les scénarios à des villes réelles.

Ainsi, dans un premier temps, un modèle de fonctionnement du système urbain avant, pendant et après un événement majeur sera développé. Ce modèle sera ensuite intégré dans un SIG. Dans le même temps, des indicateurs de vulnérabilité et de résilience devront être développés pour être intégrés à l'outil. Pour finir, des scénarii de reconstruction du système urbain seront développés, proposés et simulés, pour dans un dernier temps appliquer le modèle et les scénarii à une ville réelle.

iii) Marie Toubin (2010-2013)

L'amélioration de la résilience sera l'un des objectifs majeurs pour les collectivités dans les années à venir car la multiplication des risques auxquels elles doivent faire face, leurs enchaînements et leur amplification par le milieu urbain nécessitent un changement de paradigme pour leur gestion. La protection ne suffit plus, il s'agit maintenant d'accepter les perturbations, de les absorber puis de reprendre un fonctionnement normal le plus rapidement possible. C'est le sens que l'on donne ici à la résilience. Alors, pour parvenir à mener une véritable politique d'amélioration de la résilience à l'échelle d'une ville, l'ensemble des acteurs de la ville doivent être impliqués et surtout adhérer à la démarche.

Toutefois, dans l'amélioration de la résilience, à l'échelle urbaine, le premier obstacle semble être le manque de communication et de collaboration entre tous les acteurs. En effet, des méthodes sont développées actuellement pour évaluer la résilience et proposer des indicateurs pour mesurer le niveau de résilience des systèmes, mais la traduction opérationnelle au niveau des parties prenantes est fortement limitée pour l'instant. La difficulté est que les services urbains, les autorités, les acteurs économiques, et même les services techniques de la ville, n'ont pas l'habitude de partager leur savoir, et encore moins leurs moyens. Cette sectorisation limite la résilience du système global qui nécessite une compréhension mutuelle, de la coordination et de la mutualisation. La deuxième difficulté réside dans le fait que les outils disponibles actuellement sont dédiés à un risque unique et ne prennent pas en compte les effets dominos et la complexité des risques urbains. Ainsi, la mise en œuvre de solutions d'amélioration de la résilience face à un risque peut mener à des mesures diminuant la résilience face à un autre risque. Une approche holistique incluant l'analyse des interdépendances et des défaillances en chaîne est donc nécessaire pour assurer la résilience globale du système-ville. Face à ces deux enjeux de compartimentation (des acteurs et des risques), notre recherche vise à améliorer la résilience urbaine grâce à une méthode de diagnostic partagé entre les acteurs de la ville et de la gestion des risques.

Porteurs des services urbains, les réseaux techniques de la ville (réseaux liés à l'eau, à l'énergie, aux déchets, aux télécommunications et aux transports) sont le support de la ville et de son déploiement. Les réseaux techniques sont également des enjeux majeurs lors de la crise car ils peuvent propager la perturbation et car ils sont essentiels au rétablissement de la ville. Premier levier d'action des collectivités, le fonctionnement des réseaux techniques constitue une condition nécessaire à la résilience de la ville. Les collectivités locales peuvent donc agir prioritairement sur les réseaux portant les services urbains, et ce à chaque étape, de leur conception à leur gestion. Le principal but est d'identifier les points faibles dans leur organisation (information, ressources humaines et financières) en s'appuyant sur une

évaluation technico-fonctionnelle. L'intérêt est de confronter les retours d'expérience, les connaissances de terrain et l'expertise pour identifier les points critiques des systèmes urbains et surtout en assurer la reconnaissance par l'ensemble des acteurs.

L'enjeu est donc de faire travailler ensemble les collectivités locales, les gestionnaires de services urbains et les acteurs de la gestion des risques à l'identification de leurs points faibles et de leurs dépendances. Cette analyse est assurée par l'étude des réseaux techniques de la ville (redondance, capacité, topologie) et confirmée par la connaissance de terrain et l'analyse des événements passés. Le principal enjeu réside donc dans la difficulté, ou la réticence, de certaines organisations à communiquer et partager leurs informations. Or, c'est précisément la première étape dans l'acceptation des défaillances potentielles de l'organisation globale. Les points faibles en termes d'information, de communication ou d'infrastructure critique peuvent être identifiés, cartographiés et partagés par l'ensemble des parties prenantes dans le but d'avoir une meilleure compréhension de la résilience. Les solutions découlant du diagnostic peuvent être techniques, organisationnelles ou les deux à la fois. On peut supposer que les solutions techniques sont déjà connues des gestionnaires des réseaux urbains et que leur principale difficulté reste l'identification et la priorisation des mesures à prendre, deux problèmes abordés par le diagnostic partagé. Le deuxième volet des solutions concerne l'organisation et requiert de la coordination et un moyen de partager le savoir, d'où l'intérêt du diagnostic partagé. Le diagnostic partagé peut être vu comme un outil de dialogue et de débat entre experts, mais il peut également être utilisé pour sensibiliser la population et impliquer les décideurs. En effet, au-delà de son rôle dans l'évaluation de la résilience, le diagnostic est un outil favorisant la communication entre les acteurs.

La thèse de Marc Vuillet et une partie de la thèse Serge Lhomme concernent la partie 1 du mémoire, l'autre partie de la thèse de Serge Lhomme et la thèse de Marie Toubin la partie 2.

Les partenaires liés à cette recherche collaborative et applicative sont nombreux, internationaux et de nature différente.

Parmi les partenaires académiques, cette recherche est menée avec le Cemagref, le laboratoire PRODIG (co-directions de thèses), le LEESU (Département Génie Urbain), l'Université de Sheffield (UK), aussi, mais dans des objectifs plus opérationnels, avec Deltares (NL) et Sintef (N).

Sur le plan industriel, les Groupe Egis et Sogreah sont impliqués côté français, tout comme HR Wallingford (UK) et Dura Vermeer (NL).

Enfin, puisque notre recherche est appliquée, plusieurs collectivités territoriales participent à cette recherche et bénéficient des résultats : la Ville de Paris et les Grands Lacs de Seine en Ile de France, le Conseil Général du Loiret, l'Agglo et la Ville d'Orléans sur le Bassin de la Loire, et, à l'international, les Villes de Bradford (UK), Dublin (Irl), Mainz (D), Bruxelles et Leuven (B), Rotterdam et Dordrecht (NL), Trondheim (N), Prague (CZ), puis, La Nouvelle-Orléans (USA).

Partie 1

Méthodes d'évaluation de la résilience des systèmes techniques urbains face aux inondations

Cette première partie est consacrée aux méthodes d'évaluation de la résilience des systèmes techniques urbains : les digues de protection contre les inondations d'une part, les réseaux techniques d'autre part. Par rapport à la stratégie de résilience des villes face au risque inondation présentée en introduction, il s'agit ici de développer notre recherche pour évaluer la résilience des villes en intégrant la performance des digues traduite en capacité de résistance, puis la résilience des réseaux techniques urbains traduite en capacité de résistance, capacité d'absorption et capacité de récupération.

Nous avons vu précédemment que pour concevoir la ville résiliente aux inondations, il est important de mettre en place des stratégies qui reposent sur des approches mixtes entre protection (digues) et adaptation de la ville (réseaux techniques urbains). Nos méthodes d'évaluation de la résilience sont employées :

- pour l'analyse de la performance des digues de protection contre les inondations. En effet, la plupart des villes bénéficient de parcs d'ouvrages de protection contre les inondations. Il s'agit ici d'apporter des réponses aux questionnaires de ces ouvrages pour augmenter la sécurité de ces infrastructures et donc améliorer la résilience des villes aux inondations. L'objectif est donc de mettre en place une recherche sur l'évaluation de la performance des digues pour l'amélioration du processus de résilience urbaine fondée sur la protection ;
- pour l'analyse de la résilience des réseaux techniques urbains. En effet, les retours d'expériences montrent que ces réseaux propagent les risques en milieu urbain. Notre recherche vise donc à améliorer la résistance des réseaux, leur capacité à absorber une partie de l'inondation, puis à identifier le rôle des réseaux dans leur participation à la remise en service de la ville. Ces trois capacités, fortement liées, constituent la les trois piliers de l'évaluation de la résilience des réseaux, et donc de la ville, d'un point de vue technique.

Dans un premier temps, un état de l'art lié au concept de résilience appliqué aux systèmes techniques urbains (digues et réseaux) est présenté. Puis, nous présentons également les méthodes utiles à notre recherche pour évaluer la capacité de résistances des systèmes techniques. Ensuite, nous appliquons ces méthodes aux digues et aux réseaux. Pour finir, nous présentons une méthode d'évaluation de la capacité d'absorption et de récupération des réseaux techniques urbains (notons que cette méthode n'est applicable qu'aux ouvrages en réseaux, les digues, en tant qu'ouvrages linéaires ne sont pas concernées par la capacité d'absorption, ni de récupération).

1. Le concept de résilience des systèmes techniques urbains

1.1. La résilience comme réponse au risque inondation en ville

Suite aux nombreuses catastrophes de ces dernières années, comme l'ouragan Katrina à la Nouvelle Orléans, les séismes survenus en Haïti puis au Japon, et leurs conséquences désastreuses pour ces pays, de nombreuses questions sont soulevées quant à la capacité des sociétés à se remettre de ces événements et à se reconstruire.

Ces questionnements peuvent être reliés à un concept émergeant en géographie des risques et en génie urbain : le concept de résilience. L'émergence de ce concept théorique soulève deux questions auxquelles nous cherchons à répondre :

- quelle est la pertinence pratique de ce concept dans un contexte de risque ?
- comment est-il possible d'évaluer ce concept pour un système complexe comme la ville ?

Compte tenu de la nature de nos travaux, qui consistent, *in fine*, à produire un système d'information à référence spatiale pour l'évaluation de la résilience urbaine dans un contexte de risque, il semblait pertinent de s'appuyer sur le cadre théorique de la géographie des risques afin de définir la résilience urbaine.

Bien que le cadre théorique de la géographie des risques n'ait pas pour vocation à réduire les risques mais à étudier et analyser ces risques, dans le domaine de la géographie des risques, la théorie est très vite mise en pratique (Vinet, 2010), afin de réduire les risques territoriaux et plus particulièrement les risques urbains. Ainsi, « *la géographie des risques est aujourd'hui reconnue, à un point tel que le partage entre le fondamental et l'appliqué devient très ténu* » (Pigeon, 2005). Compte tenu de ce rapport entre théorie et pratique en géographie des risques, le recours scientifique au concept de résilience peut difficilement être séparé de la prise de conscience de catastrophes tendant à devenir de plus en plus sévères et fréquentes. Le cadre théorique existant serait donc imparfait (Pigeon, 2005), ce qui expliquerait sa relative inefficacité d'un point de vue opérationnel à limiter les dommages (www.emdat.be) et d'un point de vue théorique à les étudier à l'heure d'une urbanisation croissante et d'un changement climatique introduisant de nombreuses incertitudes.

Ce cadre théorique repose sur la reconnaissance suivante : le risque peut être caractérisé comme étant le croisement entre un aléa et des enjeux caractérisés par leur vulnérabilité. En géographie, la définition du risque repose donc principalement sur le binôme aléa vulnérabilité. Le concept de résilience vient alors compléter ce binôme.

Ainsi, en géographie des risques, la résilience est très peu étudiée par elle-même. En effet, la résilience est généralement abordée par le prisme de la vulnérabilité dans la continuité du cadre préétabli. Pour comprendre comment la résilience est abordée en géographie des risques, il est pertinent d'étudier l'évolution du concept de vulnérabilité. Premièrement, les études de vulnérabilité qualifiées de « biophysique » ont étudié de façon analytique les vulnérabilités de différents enjeux. Ces vulnérabilités étaient fonction du degré d'exposition à un aléa et d'une sensibilité face à celui-ci (Reghezza, 2006). Cette approche, très « technocentrée » a longtemps dominé les études de vulnérabilité. Cependant, cette approche ne tient pas compte des capacités des sociétés à faire face à l'événement, notamment de leur capacité de réponse (Provitolo, 2009). C'est pourquoi, la prise en compte d'une vulnérabilité sociale s'est trouvée nécessaire afin de compléter cette première approche. Cependant, la

vulnérabilité sociale a très souvent été étudiée indépendamment des facteurs d'exposition ou de sensibilité d'objets physiques. Ces capacités des sociétés à faire face peuvent être assimilées à une résilience sociale (Cardona, 2003) pouvant être mise en rapport avec une approche « biophysique ».

Ainsi, pour des approches globales de la vulnérabilité, qui s'opposent à une vulnérabilité analytique (Dauphiné *et al.*, 2004), il est alors possible de s'appuyer sur le triptyque, exposition-sensibilité-résilience, pour définir la vulnérabilité. Cette vision a l'avantage de pouvoir dépasser la segmentation entre la géographie physique centrée sur l'étude d'une vulnérabilité « biophysique » et la géographie sociale centrée sur l'étude d'une vulnérabilité sociale. Le degré d'exposition et la sensibilité représentent le potentiel d'impact matériel de l'aléa sur les enjeux, soit une approche « biophysique ». Cette valeur peut alors être rapportée sur la capacité de résilience des sociétés (Dauphiné *et al.*, 2007), d'autres chercheurs font référence aux capacités adaptatives sans que la frontière avec le concept de résilience soit clairement établie (Fontaine *et al.*, 2009), soit une approche plus sociale.

Cette étude de la résilience par le prisme de la vulnérabilité implique deux interprétations :

- premièrement, le concept de vulnérabilité semble englober le concept de résilience, la résilience étant une caractéristique tendant à diminuer la vulnérabilité ;
- deuxièmement, dans une même continuité et par simplification, la résilience tend à s'opposer à la vulnérabilité, la résilience correspondant à une attitude positive face à la crise et la vulnérabilité correspondant à une propriété négative face au danger potentiel.

Ces deux interprétations du concept de résilience sont problématiques.

La première interprétation limite le concept de résilience en géographie des risques au champ des sciences sociales qui ne représente qu'un champ disciplinaire étudiant la résilience. Ainsi, la résilience n'apporte rien de très novateur, puisqu'ici la résilience correspond, plus ou moins, à l'étude d'une vulnérabilité sociale qui a contribué à faire émerger le concept de vulnérabilité (White *et al.*, 1975), (Wisner *et al.*, 1976).

La deuxième interprétation tend à favoriser le discours d'opposition entre résilience et vulnérabilité. Ces deux concepts ne sont alors plus séparés, mais l'un se retrouve être l'inverse de l'autre. Ainsi, la résilience peut être présentée comme « La » solution pour réduire les vulnérabilités. C'est-à-dire comme une solution à des problématiques complexes, or cette vision ne peut qu'aboutir à une dévalorisation du concept, quand, une fois à l'épreuve du terrain, celui-ci aura montré ses limites.

D'un point de vue théorique, notre recherche vise à démontrer qu'une application du concept de la résilience urbaine est possible et novatrice via l'évaluation de la résilience des réseaux techniques urbains à l'aide d'une approche transdisciplinaire.

1.2. Les systèmes techniques urbains : des infrastructures essentielles

Dans notre analyse de la ville, et surtout du risque inondation en milieu urbain, nous considérons comme systèmes techniques urbains les digues de protection contre les inondations et les réseaux techniques urbains (énergie, eau, transport et télécommunications). Les digues protègent les villes quand elles fonctionnent normalement, c'est-à-dire lorsque les fonctions pour lesquelles elles ont été conçues sont accomplies. Dans le cas contraire, les digues se rompent et permettent à la crue l'inondation de la ville. De l'autre côté, les réseaux techniques urbains propagent le risque inondation en ville par des dysfonctionnements en

chaîne. Notre évaluation de la résilience urbaine face aux inondations tient compte de ces deux phénomènes.

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 notre problématique. C'est pourquoi nous proposons une nouvelle approche.

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. 13) :



Figure 13. 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 composants distincts : i) les systèmes techniques – les réseaux –, ii) 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. 14).

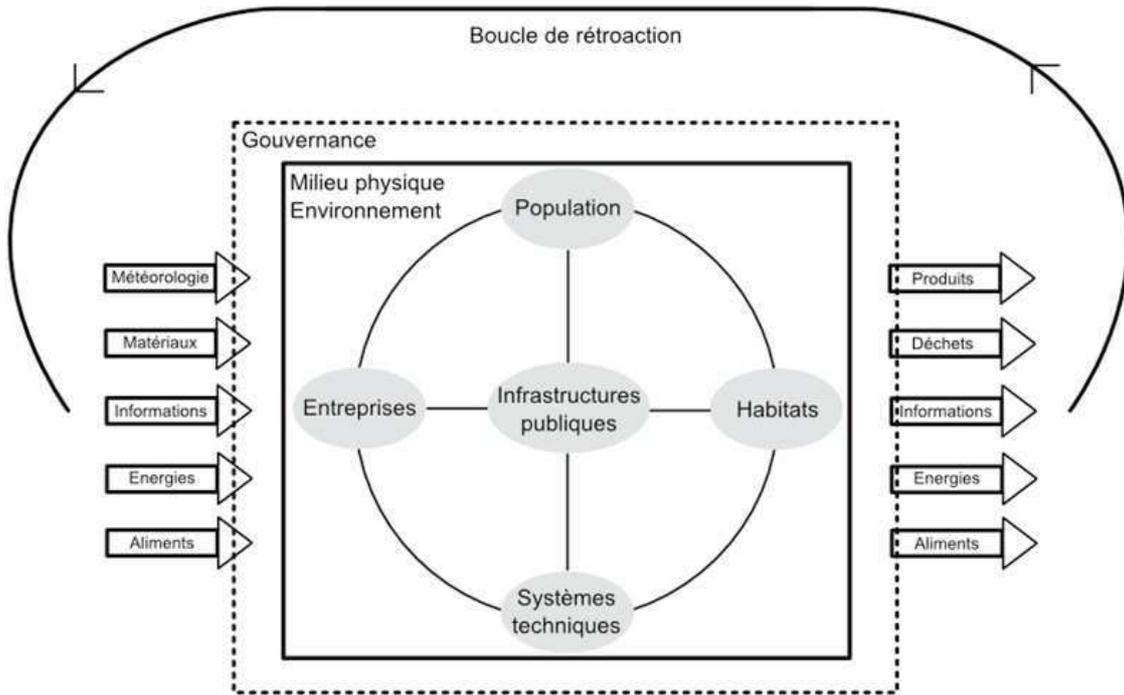


Figure 14. Modélisation du système urbain

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 du risque inondation, 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. 14).

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 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. 15).

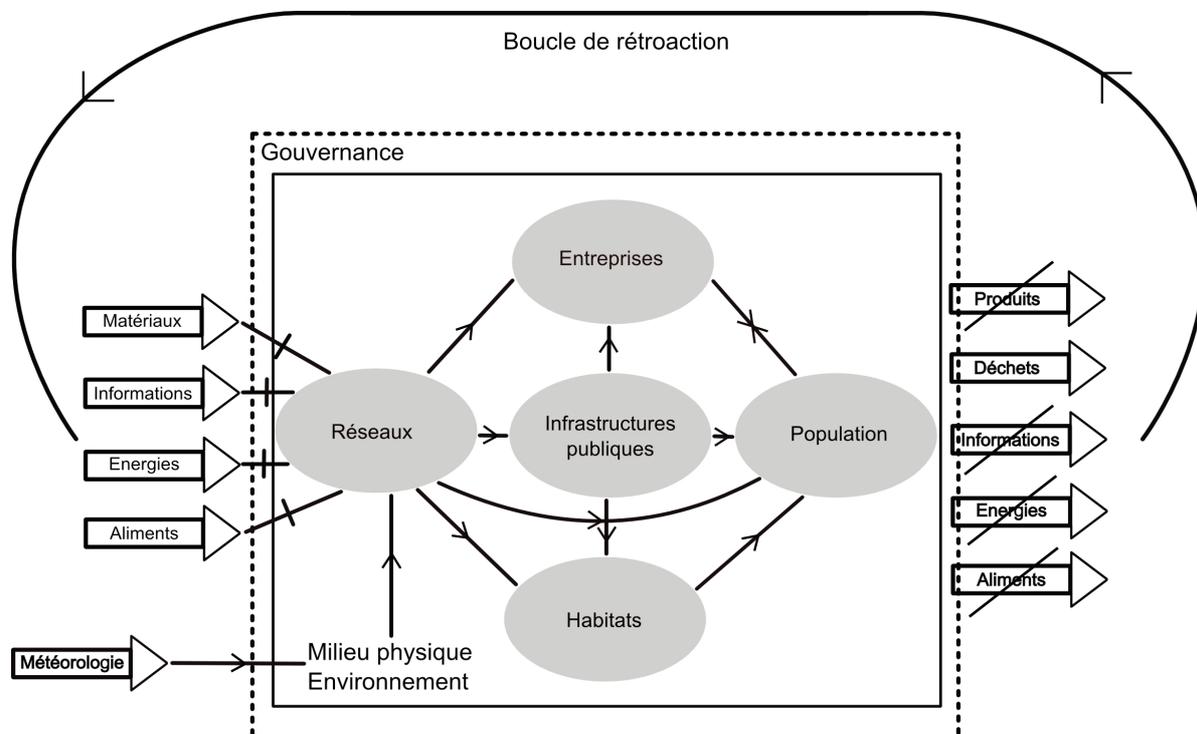


Figure 15 : Les réseaux techniques et la propagation du risque inondation dans la ville

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. Notre recherche vise à proposer une méthode d'évaluation de la résilience de ces réseaux.

De par la particularité des risques d'inondation et de par la volonté de déployer une approche systémique plutôt qu'analytique, il est proposé d'étudier la résilience des réseaux techniques urbains pour étudier la résilience urbaine (Lhomme *et al.*, 2010). A ce titre, trois capacités sont primordiales pour étudier la résilience des réseaux techniques (Fig. 16) :

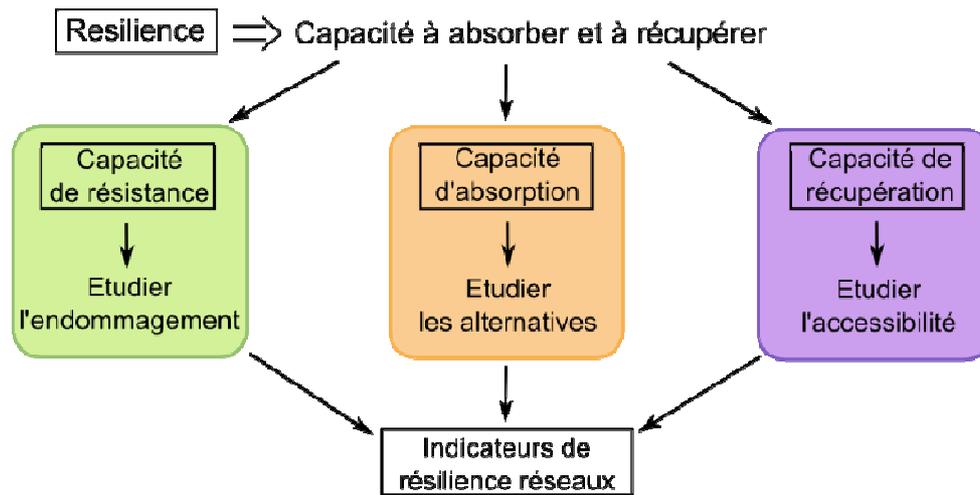


Figure 16. Les capacités à étudier pour la résilience des réseaux

i) La capacité de résistance face à la perturbation

Il est question ici de déterminer l'endommagement matériel de la digue et du réseau suite à l'inondation. 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 Sécurité 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 seront utilisées ici.

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 apportent des réponses.

2. Evaluer la capacité de résistance des systèmes techniques urbains aux inondations

2.1. Objectifs scientifiques et principes

Evaluer la capacité de résistance des systèmes techniques urbains est fondamentale. Cela consiste à comprendre les dysfonctionnements des systèmes techniques urbains. Seule la capacité de résistance est commune aux digues de protection contre les inondations et aux réseaux techniques urbains. Nous recherchons une méthode commune à ces deux types de systèmes techniques urbains pour modéliser leur capacité de résistance. Nous présentons les méthodes envisageables liées aux systèmes complexes, puis nous retenons une combinaison de méthodes applicables aux digues et aux réseaux.

2.2. Comment évaluer la capacité de résistance des systèmes techniques urbains ?

2.2.1. Les méthodes pour modéliser le fonctionnement des systèmes complexes

Par système complexe, on entend un système composé d'un grand nombre d'éléments qui interagissent entre eux de façon non linéaire (Simon, 1991) et dans lequel les relations de cause à effet ne sont pas toujours établies scientifiquement et nécessitent une part d'intuitif.

Les méthodes de la Sûreté de Fonctionnement ont été développées à l'origine pour étudier des systèmes industriels au fonctionnement complexe (nombre de composants très important, défaillances multiples et bouclées...) pour lesquels il est très difficile, voire impossible, de produire un modèle de fonctionnement par des approches physiques classiques (Villemeur, 1988).

Dans le cas des systèmes techniques urbains, nous sommes face à des systèmes complexes puisque nous sommes confrontés à des processus physiques nombreux, redondants, progressifs et faisant intervenir de nombreuses interactions avec le milieu extérieur.

Les méthodes de la Sûreté de Fonctionnement apparaissent alors bien adaptées pour la modélisation des mécanismes de défaillances des systèmes techniques urbains.

L'Analyse Fonctionnelle

Par opposition à l'approche matérielle, l'analyse fonctionnelle s'appuie sur les fonctions d'un système pour comprendre son fonctionnement. Elle établit de façon systématique et exhaustive les relations fonctionnelles à l'intérieur et à l'extérieur d'un système.

Définissons tout d'abord la notion de fonction. Selon la norme NF X50-150, une fonction est définie comme les « *actions d'un produit ou de l'un de ses constituants exprimées en terme de finalité* ». L'analyse fonctionnelle est une démarche (Fig. 17) qui consiste à recenser, ordonner, caractériser, hiérarchiser et/ou valoriser les fonctions d'un système. Plusieurs méthodes d'analyse fonctionnelle existent et sont liées aux fonctionnalités du système à étudier.

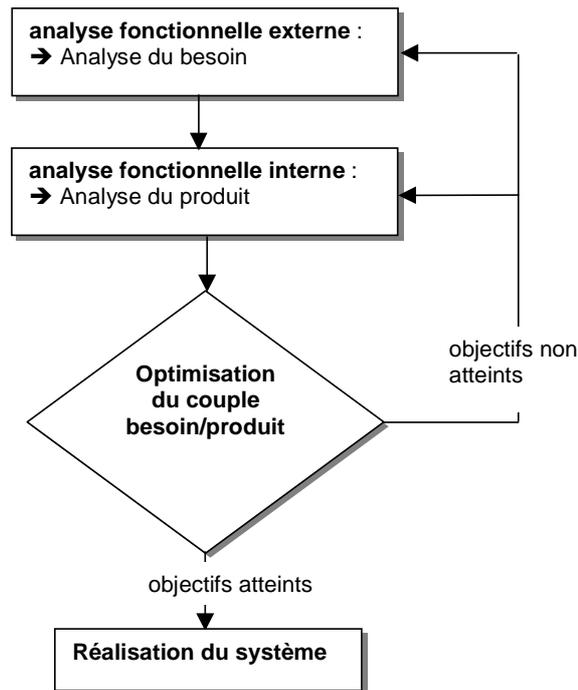


Figure 17. Démarche générale de l'analyse fonctionnelle (Peyras, 2003)

On distingue trois familles (Zwingelstein, 1996) :

- l'analyse fonctionnelle tirée des techniques d'analyse de la valeur : normes NF X50-150 à X50-153 ; Reliasep ; méthodes FAST, Den, APTE ;
- l'analyse fonctionnelle appliquée à l'informatique et aux logiciels : SADT et IDEF-0 ;
- l'analyse fonctionnelle appliquée aux organisations : méthode MERISE.

Dans le domaine des systèmes mécaniques (tels les digues et les réseaux), l'expérience tirée de l'utilisation des différentes méthodes a montré que les méthodes d'analyse de la valeur, bien que d'application générale, sont particulièrement adaptées (Peyras, 2003). Elles ont comme applications récentes :

- les produits de construction du bâtiment (Lair, 2000) ;
- les barrages (Peyras, 2003) ;
- les routes (Valadas, 2003) ;
- les installations d'eau à l'intérieur des bâtiments (Correc, 2005).

Parmi celles ci, la méthode APTE (APplication des Techniques d'Entreprises), développée par le cabinet conseil APTE, est une méthode d'analyse de la valeur appliquée à l'organisation des entreprises, au calcul et à la présentation des frais généraux. Elle est également l'une des plus utilisées en Sûreté de Fonctionnement, généralement employée en vue d'une analyse des modes de défaillance ultérieure. Elle présente l'originalité d'effectuer simultanément deux analyses dépendantes l'une de l'autre : une analyse structurelle et une analyse fonctionnelle (Zwingelstein, 1996).

Nous proposons d'appliquer une démarche d'analyse fonctionnelle fondée sur la méthode APTE, qui semble être la mieux adaptée au contexte des systèmes techniques urbains (ISDF, ?). Cette analyse se décompose en deux parties principales (Fig. 18) :

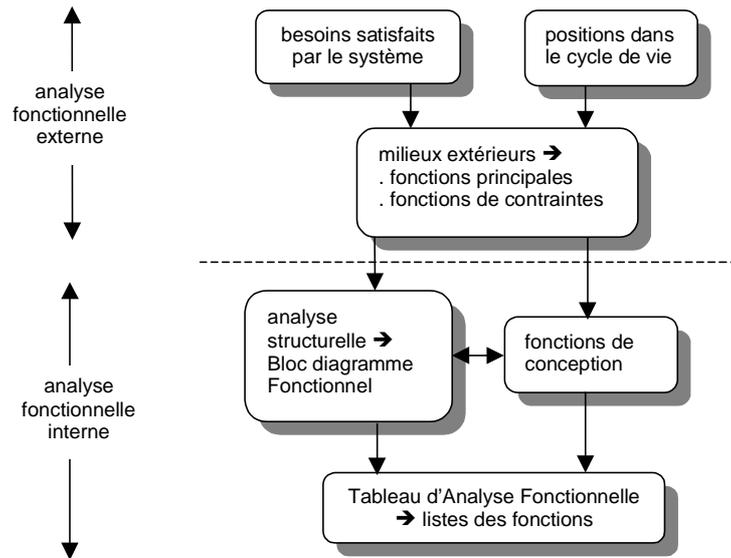


Figure 18. Processus de l'analyse fonctionnelle (Peyras, 2003)

L'analyse fonctionnelle externe comprend la mise en évidence du besoin satisfait par le système (cycle de vie, cas d'utilisation) et la recherche des milieux extérieurs (particuliers au système, propres au milieu environnant ou à l'exploitation du système...). Elle permet la compréhension et la description synthétique des limites du système considéré, son environnement et les fonctions qu'il remplit (Zwingelstein, Zwingelstein, 1995).

L'analyse fonctionnelle interne comprend l'analyse structurelle du système. Elle permet de définir les positions et les relations des différents composants du système. Il est ainsi possible de formuler les fonctions de chaque composant : contact et flux (Zwingelstein, 1996).

La méthode APTE met en œuvre des outils puissants de l'analyse fonctionnelle : le Bloc-diagramme Fonctionnel et le Tableau d'Analyse Fonctionnelle (Zwingelstein, 1996).

Le Bloc diagramme Fonctionnel (BdF) est une représentation du système et des milieux extérieurs qui met en évidence (Fig. 19) :

- les interactions entre les composants du système et les milieux extérieurs ;
- les interactions entre les composants eux-mêmes ;
- les circulations des flux à travers ou à l'intérieur du système et ses composants.

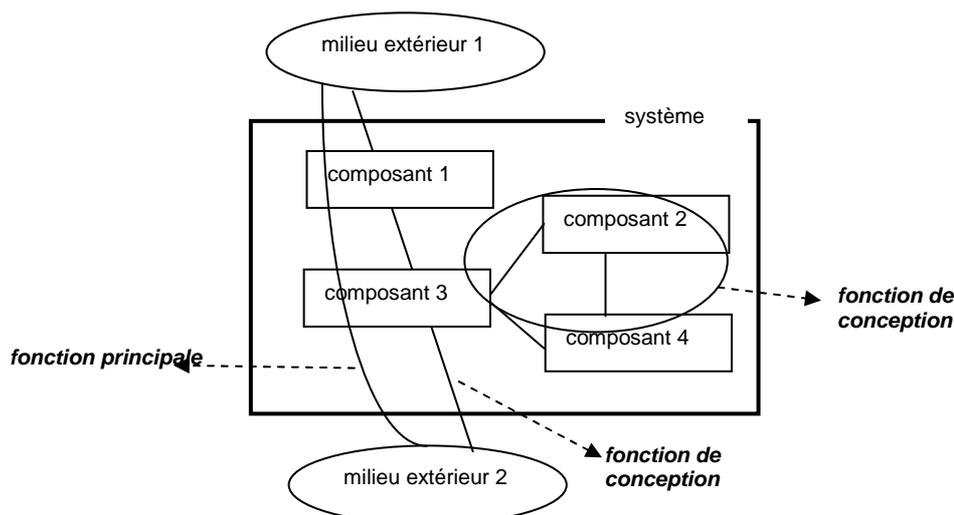


Figure 19. BdF appliqué à un système de quatre composants (Zwingelstein, 1996)

Le BdF permet d'identifier les *fonctions principales* du système en examinant les flux mettant en relation deux milieux extérieurs via le système, ses *fonctions de conception* des composants en examinant les interactions entre les composants du système et les milieux extérieurs.

Le Tableau d'Analyse Fonctionnelle (TAF) découle de l'analyse du BdF. Il rassemble, d'une part, les fonctions principales du système, d'autre part, les composants et leurs fonctions de conception (Tab. 3).

		Fonction principale	Fonction de conception
Composants du système	n°1		
	n°2		
	...		
	n°N		

Tableau 3. Structure d'un Tableau d'Analyse Fonctionnelle (Zwingelstein, 1996)

L'analyse fonctionnelle est essentielle à l'application d'une méthode d'analyse des modes de défaillance puisqu'elle recense de manière exhaustive tous les éléments du système (analyse structurelle), les interactions du système avec le milieu extérieur (analyse fonctionnelle externe) et les interactions de chaque composant du système avec l'environnement extérieur (analyse fonctionnelle interne). Elle aboutit à la liste des fonctions principales du système et aux fonctions de conception des composants.

L'Analyse des Modes de Défaillance et de leurs Effets (AMDE)

L'AMDE est apparue dans les années 1960 dans l'aéronautique et est actuellement une des méthodes de la Sécurité de Fonctionnement la plus utilisée dans l'industrie (spatiale, nucléaire, automobile...). Cette méthode fait l'objet de nombreux guides et normes, généralement mis au point pour chaque contexte industriel particulier.

C'est une méthode inductive d'analyse des défaillances potentielles d'un système. Elle considère, systématiquement, l'un après l'autre, chaque composant du système et analyse ses modes de défaillance (un mode de défaillance est la non réalisation d'une fonction quelconque dans des conditions prévues : non fonctionnement, perte ou dégradation d'une fonction, fonction intempestive, et leurs effets) (ISDF).

Le déroulement d'une AMDE la recherche systématique des modes de défaillance, de leurs causes et de leurs effets (Villemeur, 1988). Les résultats des analyses AMDE sont présentés sous forme de tableaux, spécialement conçus pour le type de système étudié (Tab 4).

Élément	Fonctions	Modes de défaillance	Causes	Effets
Disjoncteur	Interrupteur	Refus d'ouverture	Collage	Non délestage
«	«	Refus de fermeture	Mécanique	Non alimentation
«	Protection sur court-circuit	Refus d'ouverture	Collage	Non protection
«	Passage du courant	Ouverture intempestive	Mauvais réglage	Coupure d'alimentation
«	«	Echauffement	Contacts défectueux	Détérioration électronique

Tableau 4. AMDE appliquée à un disjoncteur électrique

La chronologie des analyses d'une étude AMDE répond à une logique de production industrielle, dans laquelle on essaie d'éliminer les défaillances liées aux phases de fabrication : les défauts de conception et de réalisation et les écarts par rapport aux normes et règles d'hygiène et sécurité. Elle comprend généralement trois analyses (Fig. 20) (ISDF) :

- l'AMDE Produit est en principe réalisée en première phase : elle vérifie que le système assure en phase d'exploitation de façon satisfaisante les fonctions pour lesquelles il est conçu ;
- l'AMDE Processus examine si le produit obtenu est bien conforme à ce qui est prévu. Elle identifie les modes de défaillance liés à la conception et à la réalisation du système ;
- l'AMDE Moyen est plus rarement réalisée pour rechercher les moyens à mettre en œuvre.

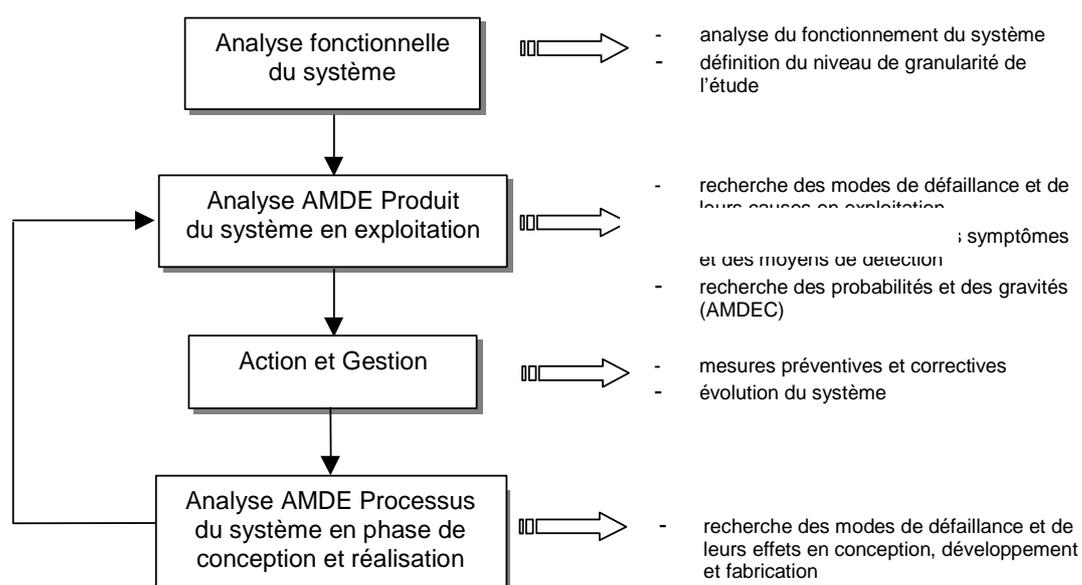


Figure 20. Processus général de l'AMDE (Peyras, 2003)

L'AMDE a été utilisée depuis la fin des années 1990 dans différents domaines du génie civil : les bâtiments, les routes, les barrages, les digues de canaux et les digues aux Pays-Bas.

Dans le domaine du bâtiment, et plus particulièrement de ses produits de construction, (Lair, 2000) propose une démarche reposant sur l'utilisation de l'analyse fonctionnelle couplée à une AMDE pour caractériser la durabilité des produits de construction. Cette étude est une des premières dans le domaine du génie-civil à utiliser des méthodes de la Sûreté de Fonctionnement telles l'Analyse Fonctionnelle et l'AMDE. Elle comporte les étapes suivantes (Fig. 21) :

- définition du produit et de ses éléments (éléments et matériaux composant le produit, relations entre éléments, avec les produits voisins...);
- identification des fonctions assurées par le produit et le rôle de chacun de ses éléments ;
- identification des défaillances pour chacune des étapes du processus de construction (conception, fabrication, transport, stockage, mise en œuvre, maintenance) qui pourront avoir une influence sur le comportement futur du produit ;
- recherche des différents scénarios conduisant à la défaillance, c'est à dire les différents enchaînements d'événements qui vont conduire à une défaillance du produit.

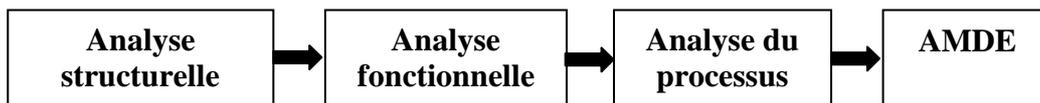


Figure 21. Evaluation de la durabilité – Approche fondée sur l'AMDE (Lair, 2003)

Dans le domaine des routes, une démarche utilisant les méthodes de la Sûreté de Fonctionnement (analyse fonctionnelle, AMDE) a été mise en œuvre (Valadas, 2003). Cette approche a abouti à la construction de scénarios de dégradation des chaussées.

Dans le domaine du diagnostic des installations d'eau à l'intérieur des bâtiments, le démarche proposée par (Correc, 2005) a permis de décomposer le système et d'associer par la suite des observations et des informations qualitatives afin d'établir des scénarios de dégradation des installation liés à la corrosion.

Dans le domaine des barrages, les méthodes de la Sûreté de Fonctionnement (analyse fonctionnelle, AMDE) ont été mises en œuvre (Peyras, 2003). Ces travaux ont été complétés par des applications aux barrages poids (Pomero, 2001) et aux barrages en remblais (Figeac, 2003) (Tab. 5).

N°	COMPOSANT	FONCTION	MODE DE DEFAILLANCE	CAUSE POSSIBLE DE LA DEFAILLANCE	EFFET POSSIBLE DE LA DEFAILLANCE	SYMPTOME DE LA DEFAILLANCE	MOYEN DE DETECTION
3	Noyau étanche						
		1 - Réduire aux sollicitations mécaniques	la fonction	"Préciser conception-réalisation"	"Etat intrinsèque du composant"		
		1. Réduire à la hauteur hydraulique transmise par le remblai amont	"Réduire aux sollicitations mécaniques"	. comparaison	. fissuration	. piézométrie	. piézomètre
		2. Réduire aux surpressions dans les fondations amont	est dégradée au et défailante	"Etat intrinsèque du composant"	. déformation		. cellule de pression interstitielle
		3. Réduire aux surpressions dans les fondations aval					
		4. Réduire à la hauteur du remblai amont		"Flux de charges"			
		5. Réduire à la hauteur du remblai aval		. surpression dans le noyau étanche			
		6. Réduire au poids de la crête					
		7. Réduire au poids propre de l'évacuateur					
		8. Réduire aux charges d'exploitation transmises par la crête					
		2 - Limiter les flux hydrauliques	la fonction	"Etat intrinsèque du composant"	"Flux hydrauliques"		
		1. limiter les infiltrations provenant du remblai amont	"limite les flux hydrauliques"	. fissuration	. eaux d'infiltration dans le noyau étanche		
		2. limiter les infiltrations provenant de la fondation amont	est dégradée au et défailante	. érosion	. eaux d'infiltration dans le dispositif de drainage vertical		
		3. limiter les infiltrations provenant de la fondation aval		. dissolution			
		4. limiter les infiltrations d'eau de pluie provenant de la crête		. dessiccation			
				"Flux hydrauliques"	"Flux de charges"		
				. eaux d'infiltration dans le remblai amont	. surpression dans le noyau étanche	. piézométrie	. piézomètre
				. eaux d'infiltration dans la fondation			. cellule de pression interstitielle
				"Préciser conception-réalisation"			
				. comparaison			
		3 - Préparer les surfaces de contact	la fonction	"Etat intrinsèque du composant"	"Contact"		
		1. préparer la surface de contact avec la crête	"préparer les surfaces de contact"	. déformation	. Déformation de la crête	. mesureur du tassement	. mesureur topographique
		2. préparer la surface de contact de l'évacuateur de crue	est dégradée au et défailante				. planimétrie
		3. préparer la surface de contact du dispositif de drainage					. nivellement
		4. avoir d'appui la galerie			"Etat intrinsèque du composant"		. mesureur d'alignement
					. fissuration		. observation visuelle
		4 - Réduire aux sollicitations hydromécaniques	la fonction	"Préciser conception-réalisation"	"Etat intrinsèque du composant"		
		1. Réduire au phénomène d'érosion interne du aux eaux d'infiltration provenant du remblai	"Réduire aux sollicitations hydromécaniques"	. comparaison	. érosion	. observation de particulier dans les eaux de fuite	. observation visuelle
		2. Réduire au phénomène d'érosion interne du aux eaux d'infiltration provenant de la fondation	est dégradée au et défailante	"Flux hydrauliques"		. mesureur du débit de drainage	. empatement - déversoir - débitmètre
		3. Réduire au phénomène d'érosion interne du aux eaux d'infiltration provenant de la fondation aval		. eaux d'infiltration dans le noyau étanche			
		4. Réduire au phénomène de dessiccation		"Etat intrinsèque du composant"			
				. dissolution			
				. fissuration			

Tableau 5. AMDE du noyau étanche d'un barrage en remblai (Figeac, 2003)

Dans le domaine des digues, quelques références bibliographiques introduisent des méthodes de la Sûreté de Fonctionnement. C'est notamment le cas aux Pays-Bas pour les digues de protection de polder. En 1998, (Pilarczyk, 1998) analyse la digue comme un système composé de plusieurs éléments, chacun devant assumer des fonction bien précises. Dans les études de (Klein Breteler *et al.*, 2000), (Pilarczyk, 2003) et (Coeveld *et al.*, 2004) l'analyse structurelle des digues est réalisée. Enfin, les modes de dégradation de ces éléments sont recensés dans (Pilarczyk, 1998).

En France, pour les digues en charge en permanence, (Lepetit, 2002) a adopté une démarche fondée sur les méthodes de la Sûreté de Fonctionnement (analyse fonctionnelle et AMDE) (Tab. 6).

Fonction	Elément	Mode	Cause	Effet direct	Effet indirect	Symptôme	Détection
Stabilité	Remblai	Séisme	liquéfaction	Écoulement	Effondrement Propagation	Zone sismique Granulométrie	Essais

Tableau 6. AMDE appliquée aux digues en charge en permanence –extrait (Lepetit, 2002)

A partir de la méthode AMDE, il a dégagé les principaux scénarios de rupture afin de proposer les méthodes et techniques de reconnaissance les plus adaptées.

Par contre, ce type de méthode, à notre connaissance, n'est pas employé pour analyser le fonctionnement des réseaux techniques urbains. Cela s'explique en partie par le fait que les connaissances sur les réseaux sont parfois plus complètes et que d'autres méthodes peuvent donc être employées, comme les statistiques (Laffréchine, 1999). Toutefois, l'application de l'analyse fonctionnelle puis de l'AMDE aux réseaux peut présenter un intérêt lorsqu'on s'intéresse aux interrelations existantes entre plusieurs types de réseaux. Ces interrelations ne sont pas modélisées de manière exhaustive (Lhomme *et al.*, 2010). Nous proposons d'utiliser ces méthodes pour répondre à ce verrou scientifique.

En synthèse, l'AMDE est une méthode puissante pour améliorer la sûreté de fonctionnement d'un système. Elle permet de générer une base d'informations qui sert de support pour définir,

améliorer, corriger et valider un produit tout le long de sa vie, depuis sa conception jusqu'à l'exploitation.

La recherche bibliographique a montré des applications intéressantes en génie civil, notamment dans le domaine des barrages (Peyras, 2003). Pour les digues de protection contre les inondations, aucune recherche remarquable n'a été mise en évidence. Cela se vérifie d'autant plus à l'échelle des réseaux techniques urbains.

Autres méthodes qualitatives de la Sûreté de Fonctionnement

A côté de l'AMDE, il existe d'autres méthodes qualitatives de Sûreté de Fonctionnement parmi lesquelles nous recensons l'Analyse Préliminaire des Dangers (APD) et la Méthode des Combinaisons de Pannes Résumées (MCPR) :

- l'Analyse Préliminaire des Dangers est utilisée dans les premières phases de conception d'un système et constitue un premier outil d'identification des risques potentiels (Villemeur, 1988). Cette méthode ne présente pas d'intérêt pour les systèmes techniques urbains car les mécanismes de défaillance sont généralement bien identifiés. Ainsi, l'analyse du fonctionnement de ces systèmes relève d'études de sûreté plus fines, telle que l'AMDE ;
- la Méthode des Combinaisons de Pannes Résumées qui a pour objet de prendre en compte la combinaison des modes de défaillance, après une étude AMDE.

Il résulte de cette analyse que l'AMDE est soit la méthode la plus adaptée aux systèmes techniques urbains, soit une phase préliminaire à l'application d'autres méthodes (Peyras, 2003).

Les méthodes quantitatives de la Sûreté de fonctionnement

Ces méthodes visent, outre l'identification des risques, à produire des mesures de la sûreté de fonctionnement. Les principales sont la Méthode de l'Arbre des Causes (MAC) et la Méthode des Arbres d'Événements (MAE). D'autres méthodes sont destinées à simuler le fonctionnement dynamique d'un système : la Méthode de l'Espace des Etats, les réseaux de Petri stochastiques et les simulations de Monte Carlo.

La Méthode des Arbres des Défaillances, parfois appelée la méthode de l'Arbre des Causes, est une méthode déductive : l'événement indésirable situé au sommet de l'arbre et on déduit les événements intermédiaires et de base (Fig. 22). Chaque niveau d'événements est relié en cascade à l'aide de symboles correspondant à des opérateurs qualitatifs (max, et, ou, si...) (Villemeur, 1988).

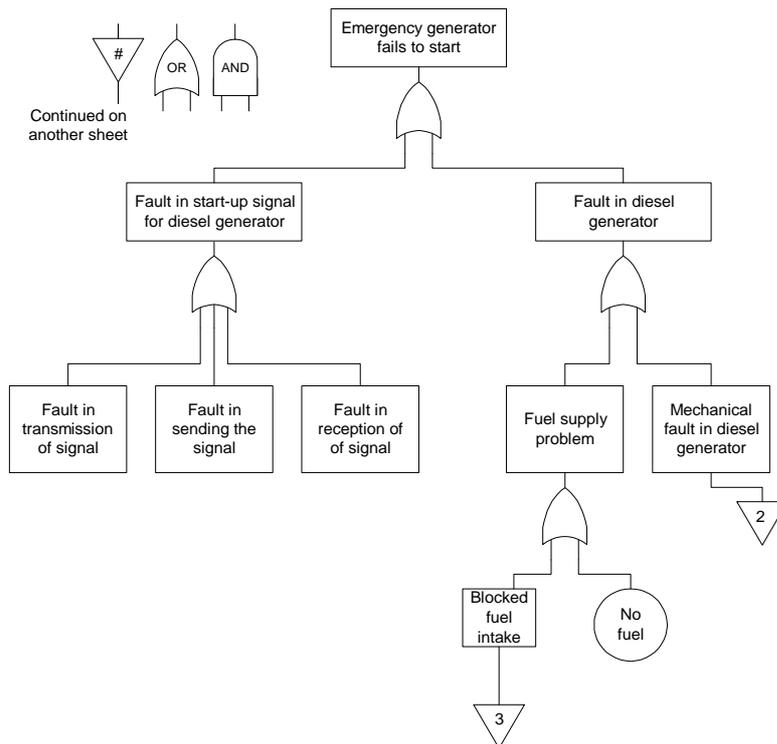


Figure 22. Arbre des causes appliqué à un générateur de secours (CEA, 2000)

Les arbres de défaillances sont utilisés dans le domaine du génie civil. Dans le domaine des ponts, (Sianipar *et al.*, 1997) a utilisé des arbres de défaillance pour montrer l'influence de la dégradation d'un composant du pont sur ses autres composants et (Johnson, 1999) a utilisé des arbres de défaillance pour déterminer les probabilités de rupture de ces ouvrages.

La méthode des arbres des causes apparaît, à travers son mode de construction et son application en génie civil, bien adaptée à la représentation des mécanismes de défaillance des systèmes techniques urbains.

La Méthode des Arbres d'Événements (MAE), appelée parfois la Méthode de l'Arbre des Conséquences, est issue de l'industrie nucléaire (Fig. 23). Elle trouve ses applications dans les études de sûreté de fonctionnement des systèmes à fonctionnement binaire (marche ou défaillant) et à évolution chronologique (mécanisme non bouclé) (Villemeur, 1988).

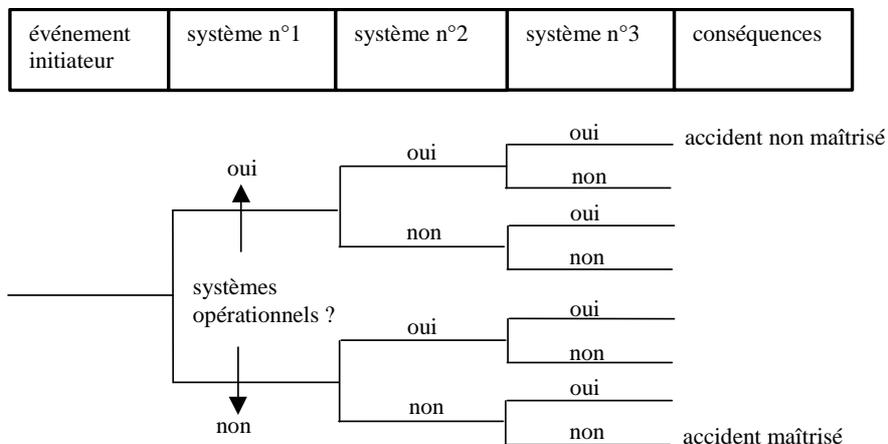


Figure 23. Structure d'un arbre d'événements (Zwingelstein, 1996)

La MAE présente des inconvénients pour une utilisation dans le contexte des systèmes techniques urbains : les défaillances des ouvrages et de leurs composants sont rarement binaires ni chronologiques, mais plutôt progressives, bouclées et redondantes (Peyras, 2003). Ainsi, leur mise œuvre sur les digues et les réseaux nécessiterait des adaptations aux particularités des mécanismes de ces ouvrages.

La Méthode de l'Espace des Etats (MEE), ou la méthode des processus de Markov, consiste à représenter le comportement d'un système par un ensemble de composants pouvant se trouver dans un nombre fini d'états de fonctionnement.

Pour les systèmes techniques urbains, constitués de nombreux composants susceptibles de connaître plusieurs états de dégradation progressifs, les transitions à étudier deviennent rapidement très importantes, rendant la méthode inutilisable (données disponibles insuffisantes, complexité des mécanismes en jeu).

Les réseaux de Petri stochastiques utilisent une représentation sous forme de graphes orientés marqués, indiquant les états (ou les places) des composants du système et les transitions entre chaque place, associées à un délai régi par une loi (déterministe ou probabiliste). Les limites de la méthode apparaissent dès lors que le système à étudier est complexe et qu'on envisage plusieurs états de dégradation. De plus, dans le contexte des systèmes techniques urbains, cette méthode nécessite des informations particulièrement difficiles à obtenir, voire impossible (lois de variables, modèle de comportement).

Les simulations de Monte Carlo sont utilisées lorsque le système à étudier est trop complexe. Dans ce cas, les méthodes du processus de Markov ou des réseaux de Petri stochastiques ne permettent pas un traitement correct sans approximations grossières ou mal maîtrisées. On préfère alors la simulation de Monte Carlo. Deux conditions sont nécessaires :

- disposer d'un modèle de comportement du système étudié capable de reproduire de manière correcte son fonctionnement et son évolution au cours du temps lorsqu'il est soumis à différents aléas. Ces modèles sont souvent connus d'une manière déterministe pour les systèmes mécaniques simples. Ceci n'est pas le cas pour les systèmes techniques urbains ;
- disposer d'un logiciel de simulation de Monte Carlo pour effectuer des tirages aléatoires des variables d'entrée (état du système), pour réaliser des histoires du système à partir de son modèle de comportement et pour analyser statistiquement les variables de sortie.

Il paraît à ce jour impossible d'utiliser ces méthodes sans modélisations qualitatives préalables dans un but d'acquisition de connaissances sur les systèmes techniques urbains.

En synthèse, les systèmes techniques urbains sont des systèmes complexes du fait essentiellement de leurs mécanismes de défaillance. Pour modéliser le fonctionnement et les défaillances des systèmes techniques urbains, nous proposons d'utiliser les méthodes de la Sûreté de Fonctionnement qui sont bien adaptées pour de tels systèmes.

Ces méthodes permettent l'identification des risques et l'analyse du comportement et des défaillances. Elles sont qualitatives (APD, AMDE, MCPR) ou quantitatives (MAC, MAE...), fondées sur la construction de graphes d'états (MEE, réseaux de Petri stochastiques), fondées sur la simulation (simulation de Monte-Carlo).

Les méthodes de la Sûreté de Fonctionnement concernent de plus en plus le domaine du génie civil. Les exemples développés montrent des applications récentes de l'analyse fonctionnelle et de l'AMDE aux domaines du bâtiment, des routes, des barrages. Nous proposons d'utiliser

l'Analyse Fonctionnelle et l'AMDE à notre contexte des digues et des réseaux techniques urbains.

L'analyse fonctionnelle va permettre d'analyser le fonctionnement des systèmes techniques urbains au sein de leur environnement et les interactions de leurs composants au sein de la structure. Elle est essentielle avant l'application d'une AMDE.

La méthode AMDE répond à nos objectifs. Elle permet, d'une part, de recenser de façon exhaustive les modes de défaillance et leurs effets dans les différentes phases de la vie du système (conception, réalisation et exploitation), d'autre part, de structurer les informations relatives aux dégradations des digues et des réseaux. Nous proposons donc d'adapter cette technique aux digues de protection contre les inondations et aux réseaux techniques urbains.

Enfin, la méthode des arbres de défaillance est intéressante pour la représentation des mécanismes de défaillance des systèmes techniques urbains. Sur la base de l'AMDE, elle permet d'enchaîner de façon inductive les défaillances s'opérant sur les composants de ces systèmes.

2.2.2. Les modèles issus du raisonnement qualitatif

Les principes du raisonnement qualitatif

Face à des systèmes complexes, il est difficile d'appréhender de façon exhaustive les relations internes par des variables et des équations. Il est donc nécessaire de se placer à un niveau d'abstraction élevé, pour intégrer toutes les connaissances hétérogènes relevant de différentes disciplines : c'est l'objet du raisonnement qualitatif (Dague *et al.*, 2004).

Ainsi, le raisonnement qualitatif comprend tout ce qui concerne la description non numérique d'un système, en préservant ses propriétés comportementales majeures et en supprimant les détails.

Il existe de nombreuses techniques pour représenter et manipuler les données qualitatives :

- l'algèbre des signes ;
- le raisonnement sur les ordres de grandeur ;
- le raisonnement sur les intervalles ;
- le raisonnement asymptotique par les ordres de croissance ;
- les ensembles flous et la théorie des possibilités.

Nous ne développons pas ces différents outils et nous renvoyons le lecteur à (Travé-Massuyès *et al.*, 1997).

Les modèles du raisonnement qualitatif

Le raisonnement à base de modèles (Model Based Reasoning) est un processus déductif mettant en œuvre des modèles qualitatifs. Il est utilisé pour prévoir, simuler et expliquer le comportement d'un système complexe, à partir du comportement et du fonctionnement de ses composants.

Deux situations peuvent conduire à préférer les modèles qualitatifs par rapport aux modèles traditionnels numériques :

- lorsqu'on peut se satisfaire de résultats approchés (par exemple, caractériser un processus physique sans en donner les paramètres exacts) ;

- lorsque les connaissances sur le système sont imprécises ou intrinsèquement qualitatives.

En effet, c'est de plus en plus le cas des gestionnaires de patrimoine confrontés d'un côté à des incomplétudes, imprécisions, voire indisponibilité des données, et de l'autre à des choix budgétaires. Les modèles qualitatifs trouvent donc naturellement leur utilité pour servir de support à des tâches ne requérant pas une forte précision, pour lesquelles les considérations quantitatives sont peu utiles (Travé-Massuyès *et al.*, 1997).

Les applications principales des modèles qualitatifs sont les suivantes :

- le diagnostic à base de modèle des systèmes ;
- la simulation qualitative du comportement des systèmes ;
- des applications plus diverses comme la production, la recherche des défaillances...

On distingue deux classifications pour les modèles qualitatifs (Travé-Massuyès *et al.*, 1997) :

- les modèles statiques et dynamiques : un modèle statique est une description d'un système limitée aux états d'équilibres ou aux régimes stationnaires. A contrario, un modèle dynamique décrit les états transitoires (évolution entre deux états transitoires) : dans ce cas, il produit une description du comportement du système au cours du temps ;
- les modèles avec ou sans causalité explicite : un modèle sans causalité explicite ne spécifie pas le sens des interactions. A contrario, les modèles avec causalité explicite déclarent le sens de propagation des influences ou des valeurs, au moyen d'un graphe orienté ; ils permettent donc de prendre en compte les liens de cause à effet.

Dressons un rapide panorama des modèles du raisonnement qualitatif susceptibles d'intéresser notre contexte (Travé-Massuyès *et al.*, 1997).

Modèles qualitatifs statiques

Les modèles causaux (c'est-à-dire les modèles statiques avec causalité explicite) reposent sur l'élaboration d'un graphe causal, dont les nœuds sont des variables et dont les arcs traduisent les influences entre ces variables.

Parmi ces modèles, les plus simples se contentent d'identifier les relations entre les variables sans les qualifier.

Dans les graphes orientés signés, les nœuds et les variables sont affectés d'un signe (+, -, 0) et les arcs d'un signe (+, -). La figure 24 donne l'exemple d'un système simple comprenant un réacteur et une boucle de recyclage et son graphe orienté signé.

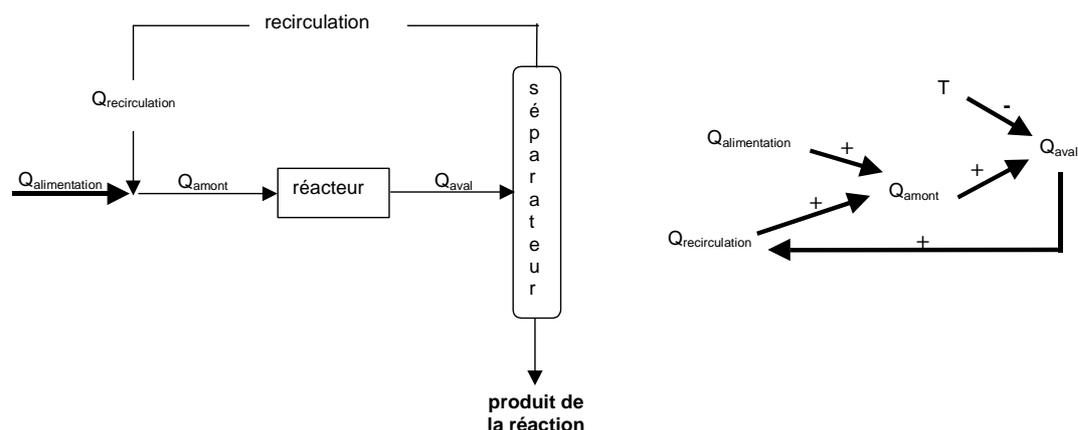


Figure 24. Boucle de recyclage et son graphe orienté signé (Travé-Massuyès et al., 1997)

Les graphes de propagation de valeurs symboliques (type modèle de Simao) sont des graphes causaux plus sophistiqués, où les variables d'entrée prennent des valeurs qualitatives dans un espace fermé, et incluant des règles de transfert et d'opération des valeurs qualitatives.

Modèle qualitatif dynamique

L'objectif des modèles qualitatifs dynamiques est de représenter l'évolution du système entre deux états d'équilibre et la description globale du comportement dans le temps.

Leur principe est de reproduire le comportement des systèmes à partir des relations de cause à effet : tout événement affectant une variable est propagé sur les autres variables, qui lui sont causalement dépendantes, par l'intermédiaire de chemins causaux (arcs).

La propagation peut être simulée par des fonctions de transfert qualitatives et dynamiques prenant le temps comme paramètre (Fig. 25).

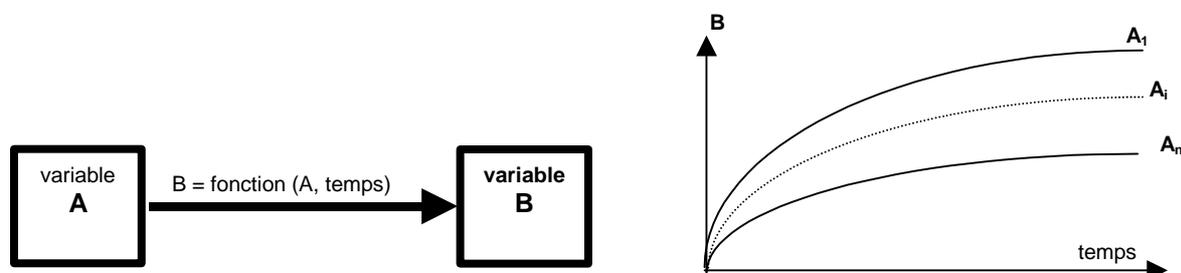


Figure 25. Graphe causal dynamique

Dans le domaine de la Sûreté de Fonctionnement, et notamment lors de l'utilisation de l'AMDE on raisonne en termes de mode de défaillance. A chaque défaillance, une cause est associée à un effet : le raisonnement est donc causal. Cet aspect conduit quasiment naturellement à l'utilisation de graphes causaux (Travé-Massuyès *et al.*, 1997).

En synthèse, les modèles qualitatifs semblent pouvoir offrir un excellent support pour la représentation des scénarios de défaillance des systèmes techniques urbains. En effet, ils s'adaptent à la complexité du système et à la qualité des informations disponibles.

Nous préférons les graphes causaux compte tenu des forts liens de cause à effet existant dans les mécanismes. Une analyse qualitative à partir de quelques valeurs, du type de celle proposée dans le modèle de propagation de valeurs symboliques, semble particulièrement intéressante.

2.2.3. Proposition méthodologique pour l'évaluation de la capacité de résistance des systèmes techniques urbains

Nous proposons un modèle de fonctionnement des systèmes techniques urbains et de leurs mécanismes de défaillances. Les méthodes pour modéliser le fonctionnement des systèmes complexes semblent adaptées aux mécanismes qui régissent le comportement des digues. En effet, par système complexe, on entend un système composé d'un grand nombre d'éléments qui interagissent entre eux de façon non linéaire (Simon, 1991) et dans lequel les relations de cause à effet ne sont pas toujours établies scientifiquement et nécessitent une part d'intuitif.

Les méthodes de la Sûreté de Fonctionnement ont été développées à l'origine pour étudier des systèmes industriels au fonctionnement complexe (nombre de composants très important, défaillances multiples et bouclées...) pour lesquels il est très difficile, voire impossible, de produire un modèle de fonctionnement par des approches physiques classiques (Villemeur, 1988).

Dans le cas des systèmes techniques urbains (digue et réseaux), nous sommes face à des systèmes complexes puisque nous sommes confrontés à des processus physiques complexes, redondants, progressifs et faisant intervenir de nombreuses interactions avec le milieu extérieur. Les méthodes de la Sûreté de Fonctionnement apparaissent alors bien adaptées pour la modélisation des mécanismes de défaillance de ces systèmes.

Nous cherchons ici à évaluer la capacité de résistance des systèmes techniques urbains (Fig. 16) pour déterminer des processus d'endommagement.

2.3. La capacité de résistance des digues

Notre recherche, pour cette première partie, propose des méthodes pour évaluer la performance des digues, avec, in fine, l'objectif d'améliorer la résistance des digues dans un processus d'amélioration de la résilience urbaine face aux inondations. Il s'agit de fournir, dans le cadre du diagnostic rapide des digues, une évaluation de la performance du parc d'ouvrages d'un gestionnaire, avec les données disponibles, pour permettre au gestionnaire du parc de digues :

- de disposer d'une vision global de la performance de son parc d'ouvrages ;
- de mieux programmer les travaux de maintenance sur l'ensemble du linéaire de digues dans un objectif d'amélioration de la résilience urbaine ;
- de déterminer sur quels tronçons de digues doit être mené le diagnostic approfondi ;
- d'évaluer l'impact d'éventuels travaux de maintenance sur le niveau performance du parc de digues.

Pour cet objectif de recherche, nous disposons de plusieurs méthodes adaptées à nos besoins provenant de divers domaines scientifiques :

- les méthodes issues de la Sûreté de Fonctionnement, pour la représentation, la modélisation du comportement et l'analyse des défaillances des digues ;
- les méthodes issues des Sciences de l'Ingénieur, plus spécifiquement la modélisation qualitative des systèmes pour la modélisation des mécanismes de rupture des digues.

C'est dans ce contexte que s'inscrit, depuis 2002, notre recherche liée à l'évaluation de la performance des digues de protection contre les inondations. Ce travail a été engagé dans un premier temps dans le cadre de ma thèse de doctorat (Serre, 2005), financée par le ministère chargé de l'écologie (Programme RIO II), puis à travers notre encadrement d'une partie des travaux de thèse de Marc Vuillet (2009-2012) financée par l'ANRT et le bureau d'études G2C Environnement, au travers du projet DIGSURE. Trois stages de TFE et de Master ont contribué à cette recherche (Figeac, 2003), (Berthaud, 2004) et (Prévot, 2005). Cette recherche sur les digues s'inscrit dans un processus d'amélioration de la résilience urbaine face aux inondations.

2.3.1. L'analyse fonctionnelle des digues

Nous cherchons ici à modéliser les mécanismes de rupture des digues sous forme de scénario, de façon à obtenir les informations nécessaires à l'évaluation de leur performance. Pour cela, il nous faut un modèle permettant de représenter tous les mécanismes de rupture et qui s'adapte à tous les types de digues.

Les modèles fonctionnels répondent au besoin de méthodes d'évaluation génériques (Peyras, 2009). Nous avons exploité des outils destinés à modéliser les systèmes complexes et à représenter les liens logiques entre les successions de défaillance se produisant dans les ouvrages (les techniques de la Sûreté de Fonctionnement). Le modèle fonctionnel de représentation des mécanismes est construit en trois étapes résumées à la figure 26 et développées dans la suite du texte :

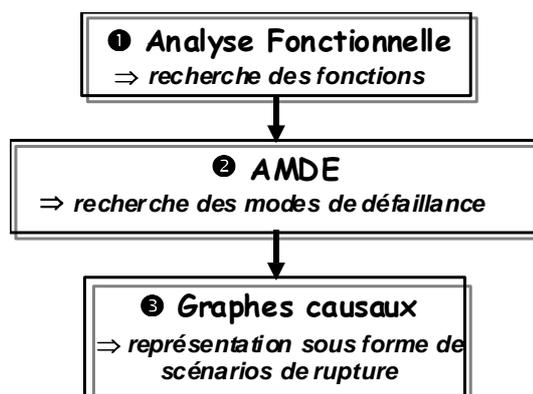


Figure 26. Principe du modèle de représentation des scénarios de rupture (Peyras, 2003)

La première méthode à appliquer dans le cadre de la Sûreté de Fonctionnement est l'analyse fonctionnelle. Elle permet la compréhension et la description synthétique du fonctionnement d'un système. L'analyse fonctionnelle définit les limites du système considéré, son environnement, et les fonctions qu'il remplit (Zwingelstein, 1996).

Pour réaliser l'analyse fonctionnelle d'une digue, il est nécessaire de fixer la précision de notre étude. Notre objectif étant une description fine des digues et de leurs mécanismes, nous réalisons l'analyse fonctionnelle à l'échelle spatiale du composant. Nous nous intéresserons donc aux fonctions accomplies par les composants des digues.

On procède ensuite à l'analyse structurelle des différentes catégories de digues. Nous avons examiné des profils de digues types, telles qu'elles sont observées en situation réelle. Cette analyse a conduit à proposer trois profils en travers types couvrant l'ensemble des digues rencontrés dans le parc français : les digues à étanchéité amont, les digues à étanchéité interne et les digues en maçonnerie (Fig. 27).

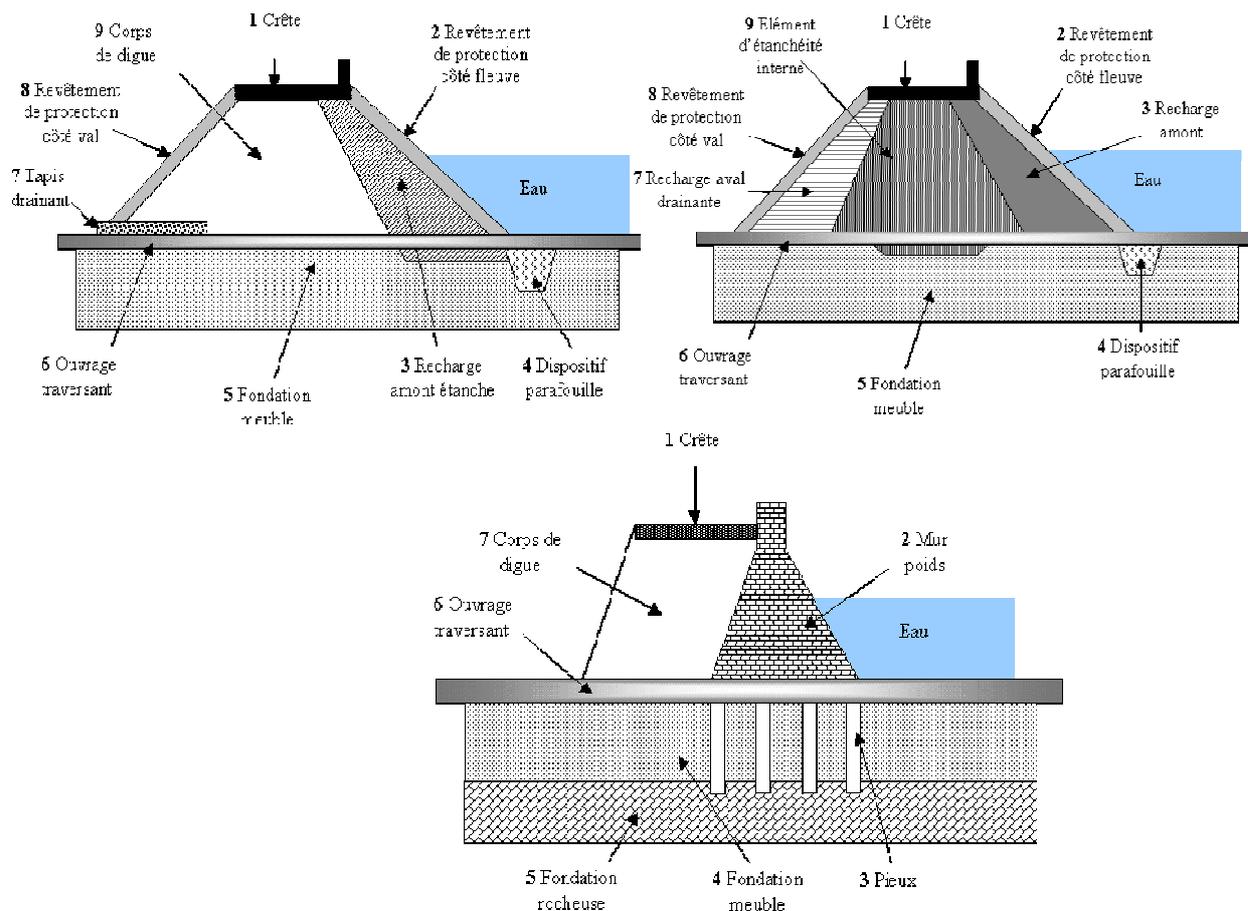


Figure 27. Analyse structurelle des différents profils de digues (Serre *et al.*, 2008)

L'analyse structurelle des profils de digue permet de lister les différents composants constituant l'ouvrage, de déterminer la nature des matériaux les constituant, de repérer leur position géographique et de déterminer les interactions avec les autres composants. A titre d'illustration, nous développons l'analyse structurelle des digues à étanchéité amont (Tab. 7) :

Numéro	Composant	Nature possible
1	Crête	Granulats Terre
2	Revêtement de protection côté fleuve	Terre végétale Terre végétale et grillage anti-fouisseur Perré Perré et terre végétale Enrochements Enrochements et terre végétale
3	Recharge amont étanche	Argiles compactées Géomembrane

Tableau 7. Les composants pour les digues en remblai à étanchéité amont

Les interactions des composants entre eux et avec les milieux extérieurs sont matérialisées au moyen de schémas (les Blocs diagrammes Fonctionnels) établis à l'échelle du composant (Fig. 28). Nous étudions les interactions liées aux contacts, aux sollicitations mécaniques et aux écoulements (flux hydrauliques et flux hydrodynamiques).

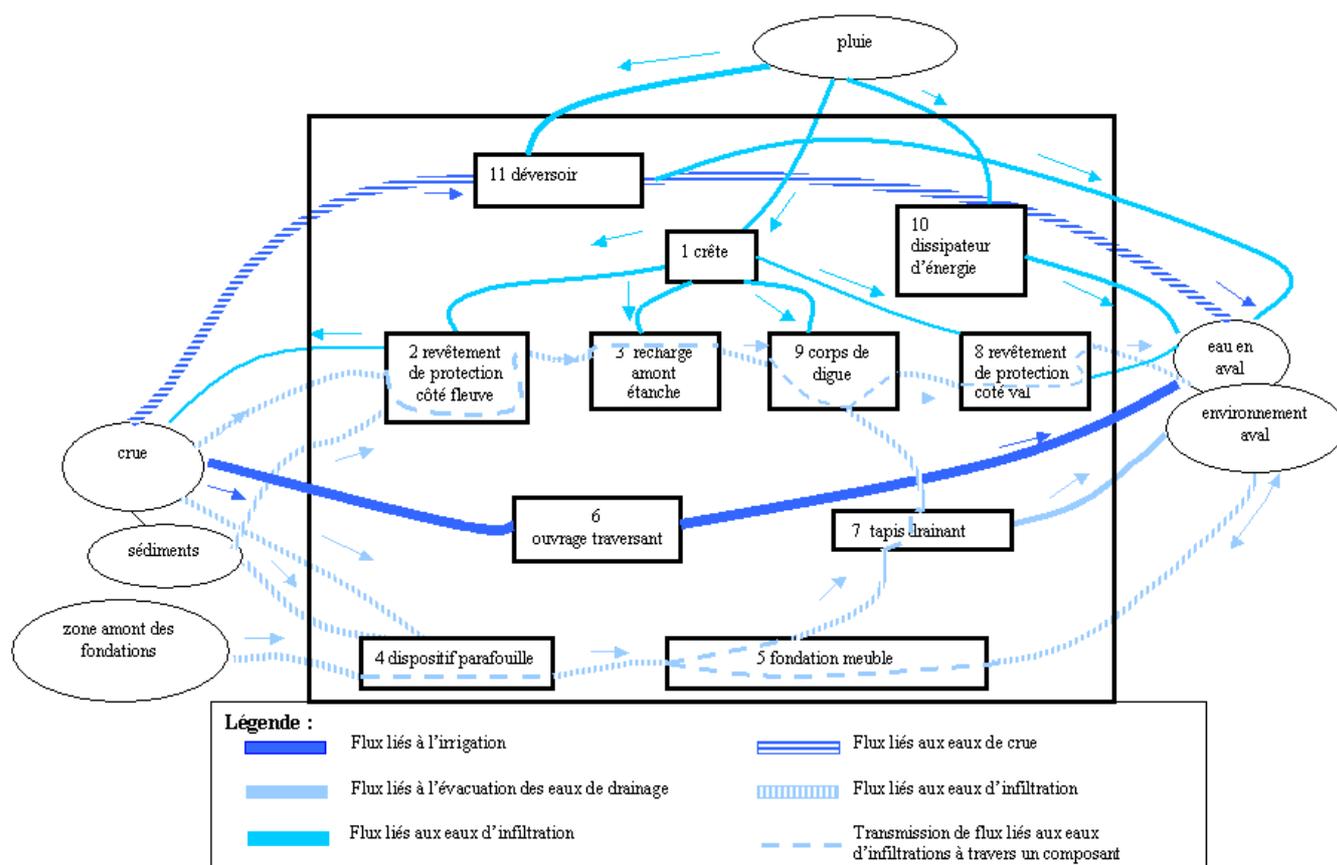


Figure 28. Bloc diagramme Fonctionnel relatif aux interactions de flux hydrauliques dans une digue à étanchéité amont

L'analyse des Blocs diagrammes Fonctionnels permet d'obtenir les fonctions de conception des composants, regroupées dans les tableaux d'analyse fonctionnelle (Tab. 8) et classées selon l'origine de l'interaction (contacts, sollicitations mécaniques, flux hydrauliques...). Au final, ces tableaux synthétisent l'analyse fonctionnelle des digues et récapitulent, pour chaque composant, les fonctions de conception accomplies par le composant.

Numéro	Composant	Classification de la fonction	Fonctions de conception
1	Crête	Flux hydrauliques	<ul style="list-style-type: none"> - limiter l'infiltration d'eau de pluie - évacuer l'eau de ruissellement vers le revêtement de protection côté val - résister à l'érosion externe provenant des eaux de ruissellement - résister à l'érosion externe au cours d'une crue
		Sollicitations mécaniques	<ul style="list-style-type: none"> - résister aux charges dues à la circulation - résister aux développements des racines

Tableau 8. Tableau d'analyse fonctionnelle - Extrait pour les digues à étanchéité amont (Serre *et al.*, 2008)

2.3.2. L'analyse des modes de défaillance des digues et de leurs effets

La méthode AMDE (Analyse des Modes de Défaillance et de leurs Effets) est apparue dans les années 1960 dans le domaine de l'aéronautique et est actuellement une des méthodes de la Sécurité de Fonctionnement la plus universellement utilisée dans l'industrie (spatiale, nucléaire,

automobile...). Cette méthode fait l'objet de nombreux guides et normes, généralement mis au point pour chaque contexte industriel particulier. L'AMDE est une méthode inductive d'analyse des défaillances potentielles d'un système. Elle considère, systématiquement, l'un après l'autre, chaque composant du système et analyse ses modes de défaillance, leurs causes et leurs effets.

Nous adaptons les techniques d'analyse de la méthode AMDE à notre contexte. Les résultats sont listés dans un tableau indiquant (Tab. 9) :

- les composants (et leur numéro de nomenclature) correspondent à la décomposition structurelle ;
- les fonctions de conception des composants obtenues à partir de l'analyse fonctionnelle ;
- les modes de défaillance : la défaillance d'une fonction (fonction non réalisée) et la dégradation d'une fonction (fonction partiellement ou mal réalisée) ;
- les causes possibles des défaillances d'un composant, obtenues à partir des Blocs diagrammes Fonctionnels. Ces causes sont classées selon leur origine : les contacts avec les milieux extérieurs ou les composants environnants, les sollicitations mécaniques, les flux hydrauliques (ou hydrodynamique), l'état intrinsèque du composant (ses caractéristiques propres), les causes liées à la conception / réalisation du composant ;
- les effets possibles d'un mode de défaillance, classées de façon analogue aux causes ;
- les indicateurs (visuels, issus d'un instrument d'auscultation, le coefficient de sécurité) qui traduisent la manifestation des effets des défaillances. Ils sont détectés par différents moyens de détection.

N°	Composant	Fonctions de conception	Mode de défaillance	Causes possibles de la défaillance	Effets possibles de la défaillance	Indicateurs	Moyens de détection
1	Crête	- limiter les infiltrations d'eau de pluie	la fonction " limiter les infiltrations d'eau de pluie" est dégradée ou est défaillante	~ <i>Processus conception-réalisation</i> : . composition de la crête ~ <i>Etat intrinsèque du composant</i> : . fissuration de la crête	~ <i>Flux hydrauliques</i> : . eaux d'infiltration dans le corps de digue . eaux d'infiltration dans la recharge amont étanche ~ <i>Sollicitations mécaniques</i> : . sous-pressions dans le corps de digue	. fuites sur le parement aval	. observation visuelle . piézométrie . piézomètres

Tableau 9 : l'AMDE adaptée aux digues - Extrait appliqué à un composant particulier (Serre *et al.*, 2008)

En synthèse de l'AMDE, nous disposons des principaux modes de défaillance des digues, de leurs causes, de leurs effets et de leurs indicateurs associés.

2.3.3. Modèle fonctionnel pour les scénarios de rupture des digues

A ce stade, nous pouvons construire les scénarios de rupture des digues, en enchaînant les causes aux modes de défaillance, puis aux effets. Les scénarios sont ainsi modélisés par des successions de séquences de défaillance fonctionnelle, représentant les processus physiques (Coeveld *et al.*, 2004) se produisant au sein du système et conduisant à des pertes ou

dégradations de fonctions. Nous représentons les scénarios sous forme de graphes causaux : chaque mécanisme est modélisé dans un graphe orienté décrivant les processus fonctionnels de dégradation et les enchaînements de variables correspondants (Peyras, 2003).

Le modèle de représentation des scénarios comporte trois catégories de variables : les variables « fonction » correspondant aux modes de défaillance, les variables « phénomène » regroupant les causes et effets des modes de défaillance et les variables « indicateur » correspondant aux manifestations des phénomènes.

Les variables « phénomène » sont renseignées par les variables « indicateur », qui traduisent la manifestation des mécanismes (indicateur => phénomène). Les combinaisons de variables « phénomène » vont conduire à la dégradation d'une (ou des) variable(s) « fonction », la perte de performance de cette dernière produisant à nouveau une nouvelle séquence de phénomènes (phénomènes => fonction => phénomènes). L'enchaînement des défaillances sous forme « de phénomènes impliquant des dégradations de fonctions, impliquant de nouveaux phénomènes » constitue le scénario de rupture d'une digue (Fig. 29).

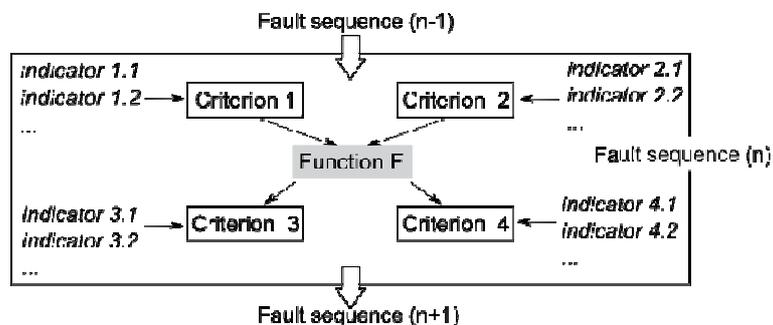


Figure 29. Principe du modèle fonctionnel pour la représentation des scénarios de rupture des digues

Un tel modèle présente de nombreux avantages : il structure la connaissance experte sous forme de scénarios fonctionnels, il organise l'information liée aux mécanismes autour de trois catégories de variable (fonction, phénomène et indicateur) et il permet de prendre en compte les dégradations partielles et progressives des variables et les mécanismes non chronologiques.

Les phénomènes (les causes et effets des modes de défaillance) intervenant dans les mécanismes de rupture des digues sont répertoriés et classés selon l'origine :

- état intrinsèque du composant : déformation, fissuration, érosion, colmatage, composition ;
- flux hydraulique : eau de crue, eau d'infiltration, eau d'irrigation par canalisation traversante, eau de drainage ;
- les sollicitations mécaniques : poussée hydrostatique, forces de pesanteur et sous pressions ;
- les sollicitations hydromécaniques : érosion interne, érosion externe, colmatage ;
- la conception et la réalisation : perméabilité, drainage, composition.

Nous distinguons trois catégories d'indicateurs (les indicateurs traduisent les phénomènes dans les mécanismes) :

- les indicateurs visuels sont détectés par l'observation visuelle du garde-digue ou de l'expert : érosion, végétations, ouvrages singuliers, désordres ;
- les indicateurs mesurés sont issus d'une mesure d'auscultation ou d'un essai in situ ou au laboratoire : piézométrie, débit, déformations ;
- les indicateurs calculés sont obtenus à partir d'un calcul faisant intervenir des indicateurs auscultés et correspondent aux facteurs de stabilité intervenant dans les conditions d'états-limites des digues : gradient hydraulique, charge hydraulique, coefficients de sécurité au glissement.

2.3.4. Application aux mécanismes de rupture des digues

Nous disposons d'un modèle fonctionnel pour représenter les mécanismes de rupture des digues et nous cherchons maintenant à renseigner une base de connaissances sur les mécanismes de rupture des digues. Le support de ce travail est la connaissance experte, contenue dans les documentations techniques relatives à la pathologie des ouvrages : nous renvoyons le lecteur intéressé vers (Pilarczyk, 1998) et (Mériaux *et al.*, 2001) qui sont les références remarquables sur le sujet. L'interview des experts est également utilisée en complément de l'analyse des recueils d'expertise.

A partir de la connaissance experte, nous déterminons les successions de défaillances fonctionnelles pour chaque mécanisme de rupture. Nous en déduisons les modes de défaillance en jeu, les phénomènes conduisant et résultants de ces modes de défaillances et les indicateurs permettant de détecter les phénomènes. Nous classons ces informations et nous procédons à des regroupements et à des choix terminologiques afin d'obtenir des informations structurées et homogènes, pouvant être intégrées dans des bases de données.

Il nous est alors possible de construire les scénarios de rupture des digues correspondant à chaque mécanisme selon la représentation proposée dans notre modèle. La synthèse de ce travail est résumée ci-après pour le cas particulier des digues en remblai à étanchéité amont (Tab. 10) :

Numéro	Nom	Condition hydraulique
1	Surverse	crue
2	Affouillement côté fleuve	crue ou régime normal de la rivière
3	Erosion interne en fondation	crue ou régime normal de la rivière
4	Erosion interne dans le corps de digue	crue
5	Glissement côté fleuve	décru
6	Glissement côté val	décru

Tableau 10. Les scénarios de rupture des digues à étanchéité amont

A titre applicatif, nous développons dans ce mémoire le scénario d'érosion interne d'une digue en remblai à étanchéité amont (scénario n°4 du Tableau 6). Ce scénario comporte trois séquences de défaillance successives : la dégradation mécanique du revêtement de protection côté fleuve, conduisant à la perte d'étanchéité de la recharge amont, elle-même conduisant à des processus d'érosion interne dans le corps de digue.

Dans une première séquence de défaillance, plusieurs phénomènes sont susceptibles de dégrader la performance de la fonction « le revêtement de protection côté fleuve résiste aux sollicitations mécaniques ». Il s'agit des phénomènes « végétation », « animaux fouisseurs », « chocs d'embâcles », « géomorphologie de la rivière » et/ou « composition du revêtement de protection côté fleuve ».

Lors de la deuxième séquence de défaillance, sous l'effets de phénomènes tels que les « racines dans la recharge amont étanche », « trous d'animaux fouisseurs dans la recharge amont étanche », « érosion de la recharge amont étanche », « composition de la recharge amont étanche » et/ou « ouvrages traversants dans la digue », la fonction « la recharge amont étanche limite les flux hydrauliques » va se dégrader, conduisant à des infiltrations d'eau dans le corps de digue.

La troisième séquence de défaillance concerne le corps de digue. La fonction « le corps de digue résiste à l'érosion interne » peut être affectée par les phénomènes « racines dans le corps de digue », « trous d'animaux fouisseurs dans le corps de digue », « composition du corps de digue », « eau d'infiltration dans le corps de digue » et/ou « ouvrages traversants dans la digue ». Les effets de la perte de performance de cette fonction sont des phénomènes d'érosion interne dans le corps de digue, susceptibles de conduire à la rupture du tronçon.

Par l'analyse des processus physiques s'opérant dans les ouvrages et à chaque niveau de défaillance, nous avons recensé les fonctions de conception des composants qui vont se dégrader, les phénomènes conduisant et résultant de ces modes de défaillance et leurs indicateurs associés. Nous disposons donc de toutes les informations pour construire le graphe causal correspondant au scénario de perte d'étanchéité des digues à étanchéité amont (Fig. 30).

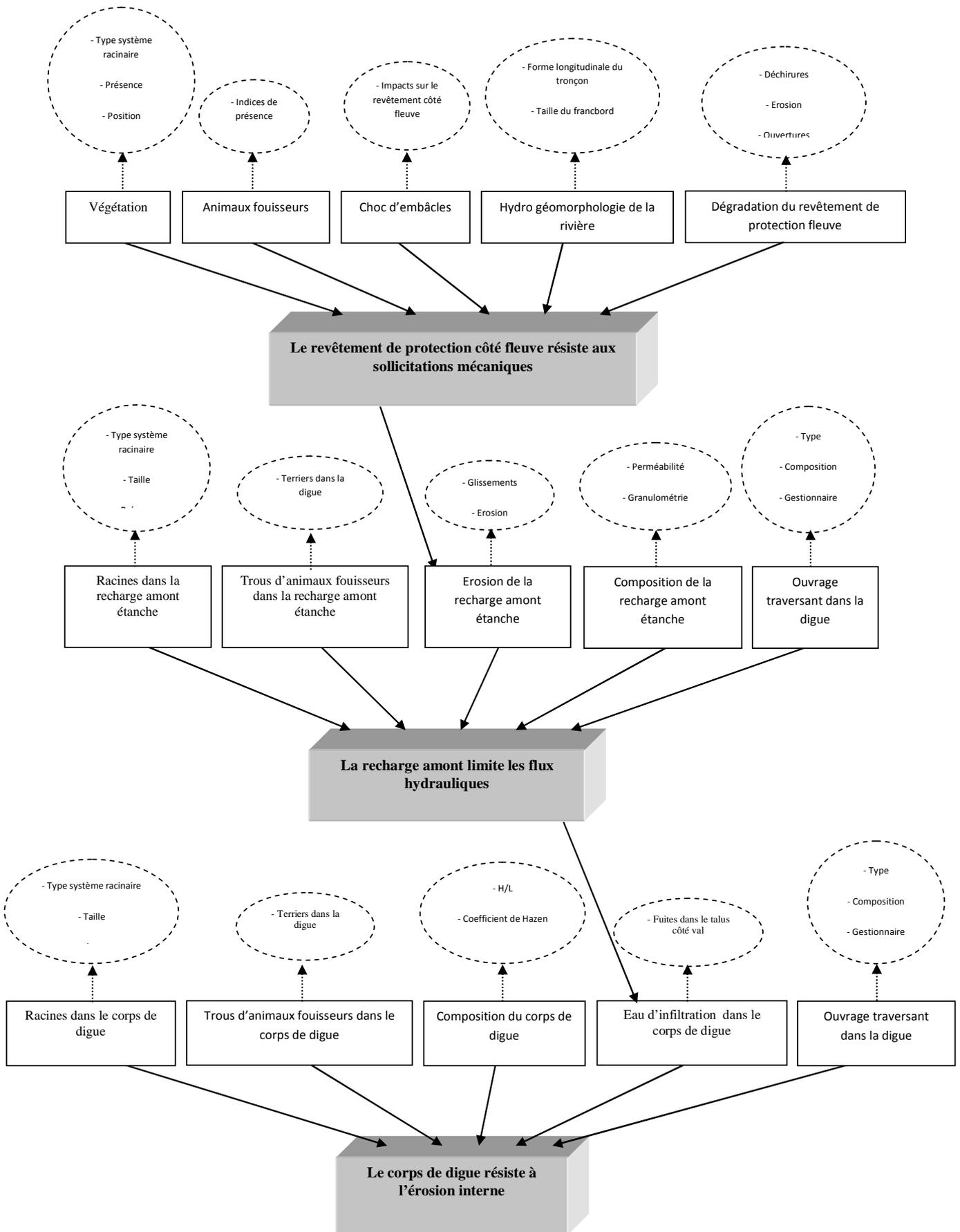


Figure 30. Scénario d'érosion interne dans les digues à étanchéité amont

L'application de cette démarche aux digues a permis d'obtenir des résultats probants. L'analyse fonctionnelle nous fournit une modélisation cohérente des différents types de digues et établit une synthèse des fonctions, phénomènes et indicateurs intervenant dans les mécanismes de rupture des digues. A partir de l'AMDE, nous proposons un modèle fonctionnel pour représenter les mécanismes de rupture des digues sous forme de scénarios. L'analyse de la connaissance experte permet de formaliser et recueillir toute l'information sur les mécanismes de rupture des digues. Le modèle fonctionnel de défaillance des digues a été déployé pour les différents mécanismes de rupture des digues : l'érosion interne, la surverse, le glissement et l'affouillement (Serre *et al.*, 2009). Cela a permis de définir l'ensemble des critères d'évaluation des digues et les indicateurs d'états associés.

Il résulte de cette application des méthodes de la Sûreté de Fonctionnement aux digues une modélisation des mécanismes de rupture des digues. Au-delà, cette modélisation permet l'identification des composants des digues à traiter en priorité pour améliorer d'une part la sécurité des ouvrages, mais surtout la résilience de la ville face aux inondations. Ainsi, les gestionnaires de digues, sur la base de ce modèle fonctionnel peuvent mettre en place des interventions sur les ouvrages en faveur de la résilience de l'espace urbain protégé par les digues.

En plus d'une méthode permettant d'évaluer la capacité de résistance des digues, les gestionnaires de digues devront bénéficier d'outils d'aide à la décision pour donner des priorités à leurs interventions en termes d'amélioration de la résilience urbaine. Un outil dédié aux gestionnaires de digues sera présenté dans la Partie 2 de ce mémoire.

2.4. La capacité de résistance des réseaux techniques urbains

Les villes modernes sont de plus en plus dépendantes d'infrastructures toujours plus complexes et avancées techniquement : réseaux d'énergie, d'eau, de transport et de télécommunication (Fig. 31) et semblent de moins en moins résilientes. En effet, les gestionnaires dépendent de services sur lesquels ils n'ont pas les capacités d'agir en cas de dysfonctionnements, alors même que ces services leur sont nécessaires notamment en période de crise. Plus communément, ces services sont considérés comme des infrastructures critiques. Les réseaux techniques sont un bon exemple d'infrastructures critiques. En effet, les réseaux techniques constituent un ensemble d'infrastructures interdépendantes nécessaires au bon fonctionnement du système urbain. Or, ces réseaux de par leurs structures et leurs contraintes d'implantation sont très sensibles aux risques d'inondation. Une recherche concernant la résilience des réseaux techniques urbains semble donc nécessaire afin d'améliorer la résilience urbaine.

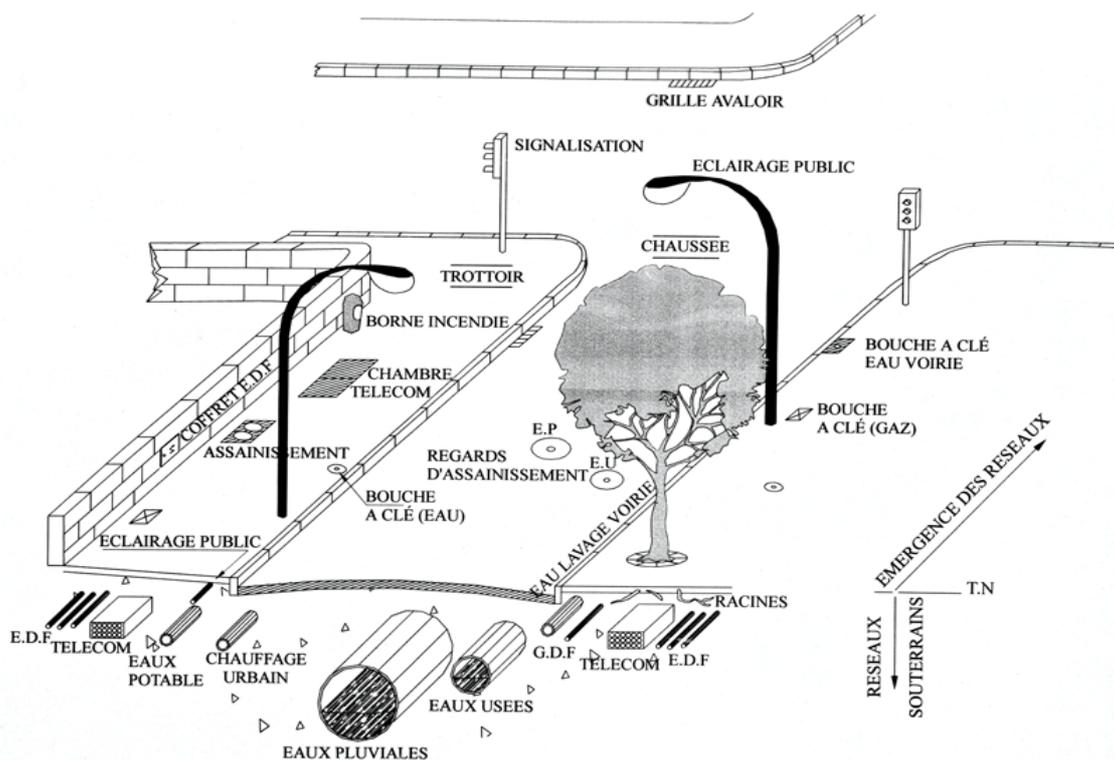


Figure 31. Représentation de l'implantation des réseaux techniques en milieu urbain (Domingo, 2010)

La modélisation de scénarios de défaillance des infrastructures critiques est alors un enjeu majeur car ces scénarios permettraient l'identification des éléments pouvant être endommagés suite à une perturbation, entraînant donc des conséquences problématiques.

C'est dans ce contexte de résilience urbaine que s'inscrit notre recherche actuelle liée à l'évaluation de la résilience des systèmes techniques urbains. Ce travail a été engagé dans un premier temps dans le cadre des thèses de doctorat Marc Vuillet (performance/résistance des digues) et de Serge Lhomme (résilience des réseaux techniques urbains), financée par deux projets de recherche européens : FloodResilienCity et FloodProBE. Deux stages de TFE et de Master ont contribué à cette recherche (Lhomme, 2009), (Domingo, 2010).

2.4.1. Les méthodes de la Sûreté de Fonctionnement appliquées à un réseau technique urbain particulier : la voirie

Dans un premier temps, il est nécessaire de définir ce qu'est une infrastructure dite « critique », équivalant ici à la notion anglaise de « critical infrastructure ». Une infrastructure peut être définie comme un ensemble d'installations et de services nécessaires au fonctionnement de la société (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 voir même d'un état. Ces infrastructures critiques ont la spécificité de dépasser les frontières géographiques, politiques, culturelles et organisationnelles (Boin *et al.*, 2007). En effet, ces infrastructures sont très dépendantes les unes des autres. La méthodologie développée a donc pour principal objectif l'étude des interrelations des ces infrastructures fortement interdépendantes.

S'il existe des méthodes d'analyse de risque physique, statistique (mathématique) ou encore par dire d'expert, il existe aussi des méthodes 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). Cependant, contrairement à la modélisation physique des processus continus ou discrets de dégradation du système qui 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, consistant 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). L'utilisation de telles méthodes pour analyser des scénarios de défaillance et modéliser des processus d'interdépendance entre systèmes complexes semble alors pertinente (Cf. partie 1).

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. L'hypothèse faite ici est qu'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.

Nous appliquons la méthodologie présentée plus haut (Fig. 26).

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 (Fig. 32).

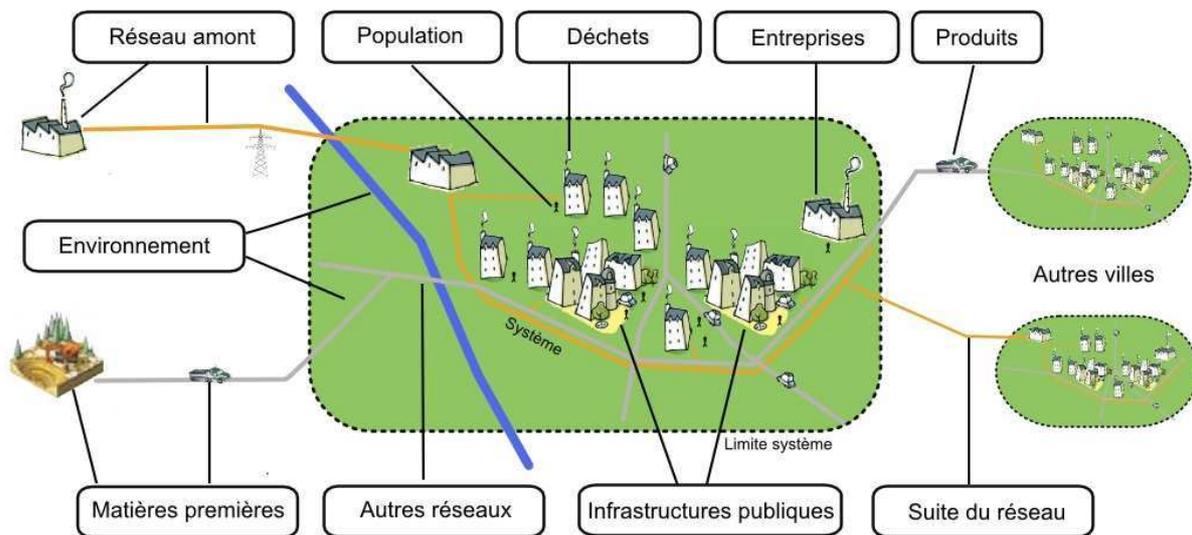


Figure 32. Analyse fonctionnelle générale externe des réseaux techniques urbains (Lhomme *et al.*, 2011)

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 (Fig. 33).

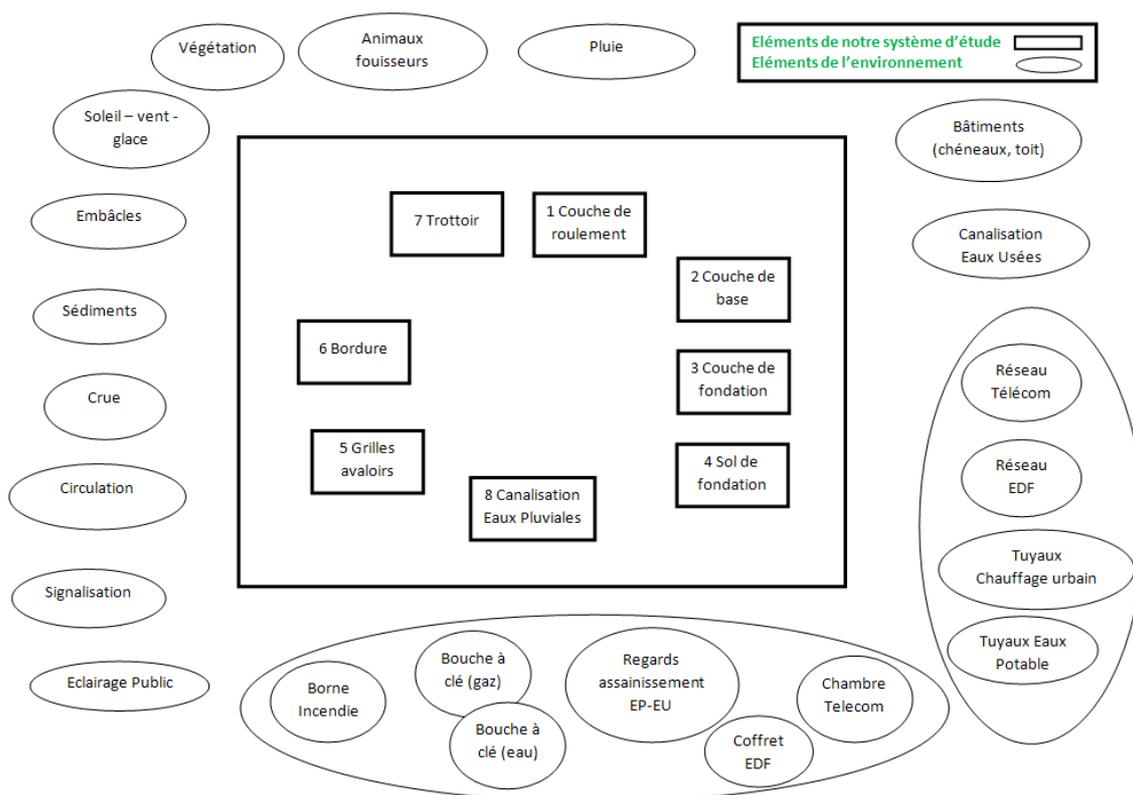


Figure 33. Analyse fonctionnelle structurelle du réseau routier urbain (Domingo, 2010)

Les fonctions de conception que réalisent les composants du système sous-entendent des fonctions de contact et de flux. Elles expriment les interactions des composants entre eux, mais aussi entre les composants et les milieux extérieurs. Les interactions des composants entre eux et avec les milieux extérieurs sont matérialisées au moyen de schémas : les Blocs diagrammes Fonctionnels (BdF) établis à l'échelle du composant. Nous étudions les interactions liées aux contacts, aux flux hydrauliques et aux sollicitations mécaniques.

Nous avons construit trois Blocs diagrammes Fonctionnels différents représentant trois types de relations possibles :

- les relations de contact (contacts entre les éléments et leur environnement) ;
- les relations de flux hydrauliques (circulation de l'eau et des fluides) ;
- les relations de flux de charges (forces agissantes).

Le BdF de contacts (Fig. 34) représente le flux de contacts existants entre deux éléments, pour chaque composant de notre système ; il représente tous les contacts que chaque élément de notre système a avec les autres éléments de notre système et/ou avec les éléments de l'environnement. Nous avons aussi représenté les relations de contact de certains éléments de l'environnement.

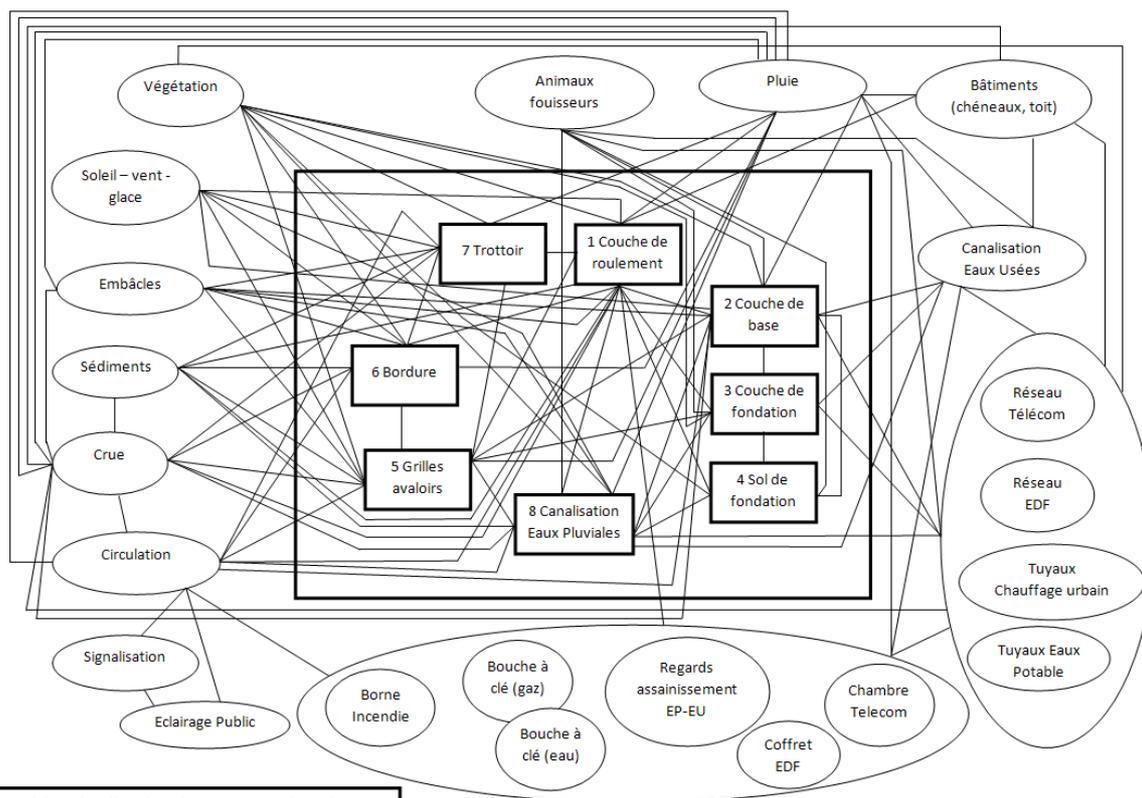


Figure- Elaboration d'un Bloc-Diagramme- Fonctionnel :
Relations de Contact dans notre système réseau routier urbain

Figure 34. Bloc diagramme Fonctionnel relatif aux relations de flux de contacts (Domingo, 2010)

De la même manière, nous avons représentés les flux hydrauliques (Fig. 35) et les flux de charges (Fig. 36).

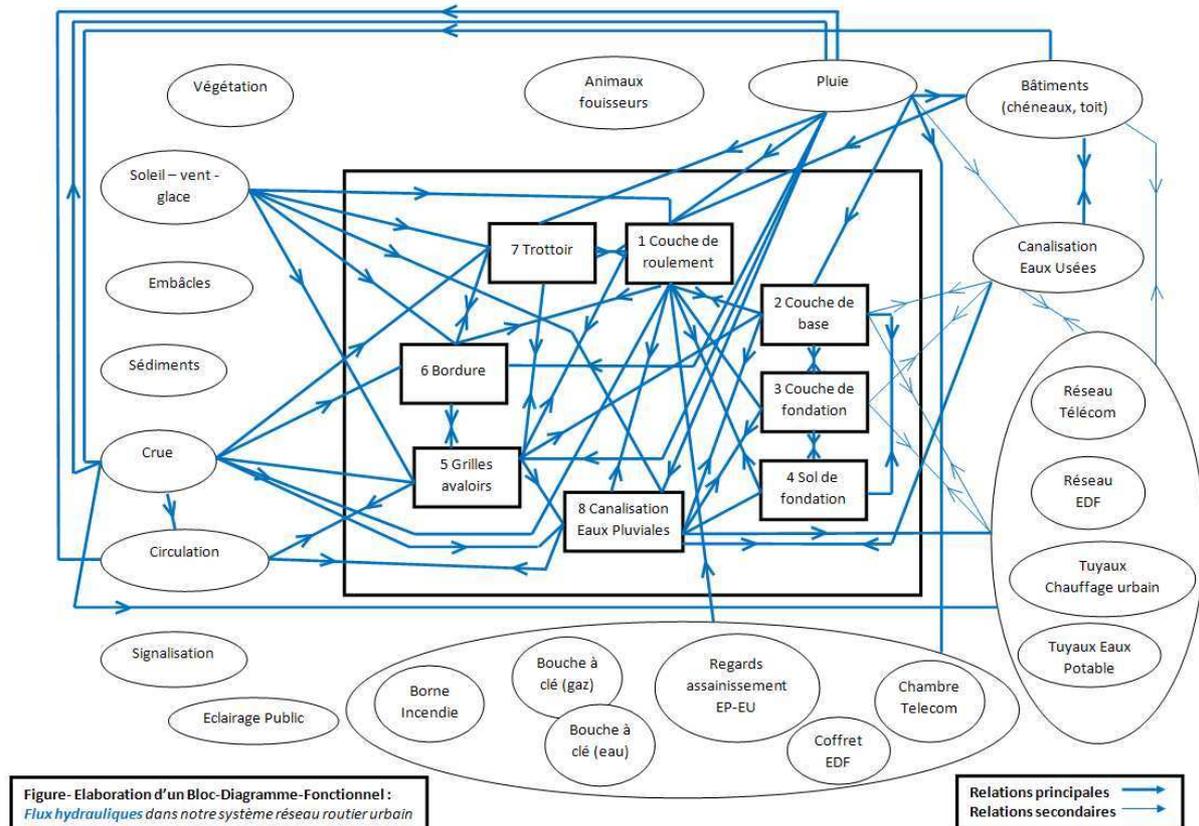


Figure 35. Bloc diagramme Fonctionnel relatif aux relations de flux hydrauliques (Domingo, 2010)

Dans le BdF de flux hydrauliques, la ligne bleue qui part du composant *Grilles Avaloirs* vers le composant *Canalisation Eaux potable* représente le flux d'eau entre ces deux composants. L'eau captée par la grille avaloir est dirigée vers la canalisation d'eau pluviale. Tous les flux générés par la pluie et la crue (environnement extérieurs) sollicitent les composants de notre système.

Il y a des cas où le flux d'eau entre deux composants n'est pas uni-directionnel. Dans notre système c'est le cas pour la plupart des composants. Par exemple, le flux entre la *Grille avaloir* et le *Trottoir* est à double sens, car, dans le cas d'une crue, il y aura de l'eau du trottoir qui sera dirigée vers la grille avaloir, sauf si la fonction de la grille est défaillante, ou la canalisation d'eau pluviale saturée : dans ce cas là, il y aura des flux d'eau dans le sens contraire.

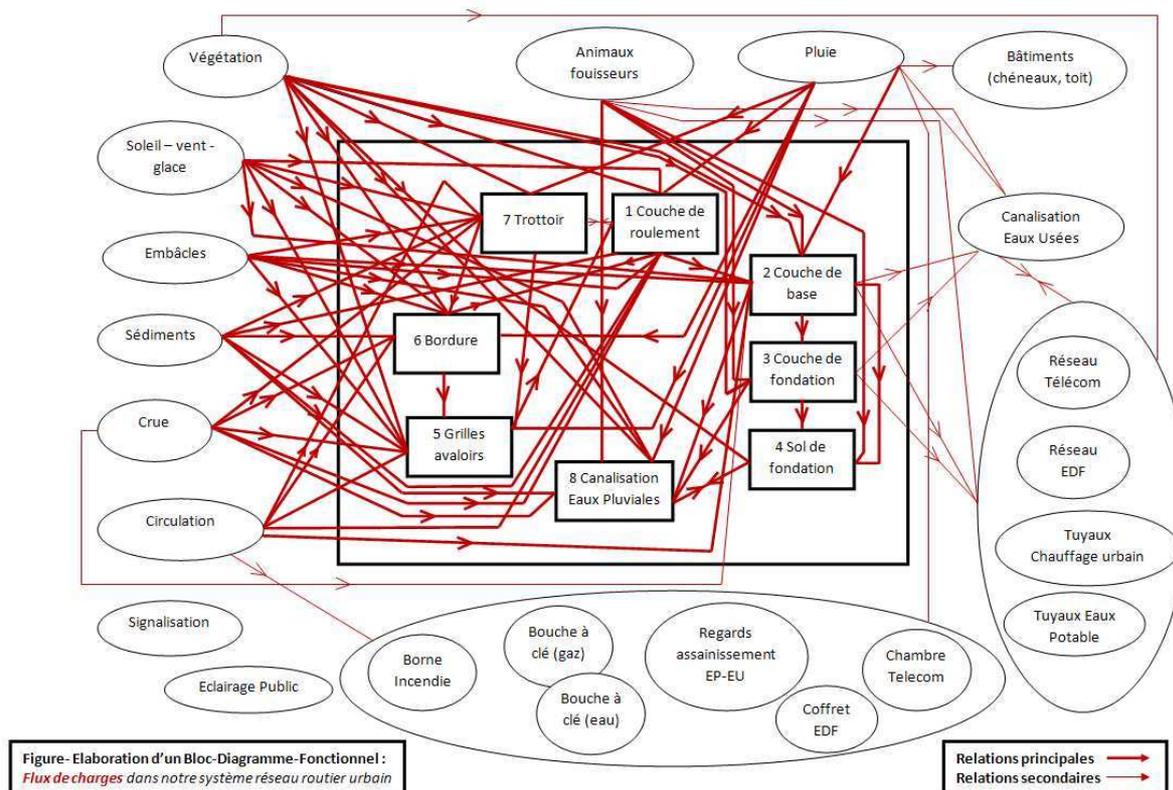


Figure 36. Bloc diagramme Fonctionnel relatif aux relations de flux de charges (Domingo, 2010)

Ce dernier bloc diagramme fonctionnel représente le flux de charges existant entre chaque composant de notre système. La direction de la flèche, comme expliqué dans le diagramme des flux hydrauliques, va du composant qui charge au composant qui est chargé.

L'analyse des Blocs diagrammes Fonctionnels permet d'obtenir les fonctions de conception des composants, regroupées dans les tableaux d'analyse fonctionnelle (Tab. 11) et classées selon l'origine de l'interaction (contacts, sollicitations mécaniques, flux hydrauliques...).

N°	COMPOSANT	FONCTIONS GENERIQUES ET FONCTIONS DE PRECISION
1	Couche de roulement	<p>1- résister aux sollicitations mécaniques supporter agression du trafic résister aux charges dues à la circulation résister à l'orniérage résister au développement des racines résister au poids de l'eau de ruissellement résister au poids propre de la crue résister aux chocs d'embâcles</p> <p>2- résister à l'érosion externe (protéger chaussée d'intempéries) résister à l'affouillement résister au ruissellement résister à l'érosion externe au cours d'une crue</p> <p>3- résister aux sollicitations thermiques résister au gel-dégel résister aux gradients thermiques élevés</p> <p>4- limiter les flux hydrauliques limiter l'infiltration d'eau de pluie</p> <p>5- évacuer les flux hydrauliques évacuer l'eau de pluie ou de ruissellement vers les extrémités</p>

Tableau 11. Tableau d'analyse fonctionnelle du premier composant (Domingo, 2010)

Au final, ces tableaux synthétisent l'analyse fonctionnelle de notre système réseau routier urbain et récapitulent, pour chaque composant, les fonctions de conception accomplies par les composants, classés selon leurs origines : hydraulique, mécanique, des flux de charge, etc.

L'Analyse des Modes de Défaillance et de leurs Effets (AMDE) a été 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 qui pour chaque composant établit les causes et les effets de la perturbation du composant (Tab. 12).

Réseau Transport	Composant Route	Fonction	Défaillance	Causes	Effets
		Assurer la continuité du service Permettre le transport des véhicules	La fonction	Submersion des voies Endommagement des voies Encrassement de la voirie	Perturbation circulation Mise en danger des usagers
		Résister aux flux hydrauliques Résister aux pressions hydromécaniques de la crue Eviter submersion	La fonction	Débordement réseau assainissement Fort débit Type et état de la voirie Voyie non surélevé	Submersion des voies Endommagement des voies Encrassement de la voirie
		Résister aux sollicitations mécaniques Résister aux pressions mécaniques des autres composants urbains Résister aux endommagements dus aux chocs des embâcles	La fonction	Type et état de la voirie Destabilisation autres réseaux Charriage d'éléments grossiers Effondrement d'un élément voisin	Endommagement des voies Encrassement de la voirie
		Permettre le bon fonctionnement des autres composants urbains Assurer la circulation (les échanges) de flux	La fonction	Perturbation circulation	Aggravation crise Dangerosité augmenté Perturbation activité économique Perturbation approvisionnement Perturbation circulation Mise en danger des usagers
	Trottoir	Assurer la continuité du service Permettre le transport des personnes	La fonction	Submersion trottoir Endommagement des trottoir Encrassement des trottoir	Submersion trottoir Endommagement des trottoir Encrassement des trottoir
		Résister aux flux hydrauliques Résister aux pressions hydromécaniques de la crue Eviter submersion	La fonction	Débordement réseau assainissement Fort débit Type et état du trottoir	Submersion trottoir Endommagement des trottoir Encrassement des trottoir
		Résister aux sollicitations mécaniques Résister aux pressions mécaniques des autres composants urbains Résister aux endommagements dus aux chocs des embâcles Résister aux déformations de la route	La fonction	Type et état de la voirie Destabilisation autres réseaux Charriage d'éléments grossiers Effondrement d'un élément voisin	Endommagement des trottoir Encrassement des trottoir
		Permettre le bon fonctionnement des autres composants urbains Assurer la circulation protégée des personnes	La fonction	Perturbation circulation	Perturbation usagée Dangerosité augmentée
	Caniveau	Assurer la continuité du service Assurer l'évacuation l'eau	La fonction	Obstruction caniveau Déformation caniveau	Perturbation du cycle urbain de l'eau
		Assurer les flux hydrauliques Drainer les flux hydrauliques	La fonction	Obstruction caniveau Déformation caniveau	Perturbation du cycle urbain de l'eau
		Résister aux sollicitations mécaniques des autres réseaux Résister aux endommagements dus aux chocs des embâcles	La fonction	Déformations chaussée Embâcles nombreux	Obstruction caniveau Déformation caniveau
		Permettre le bon fonctionnement des autres composants urbains Assurer le bon fonctionnement du réseau routier	La fonction	Inondation	Réseau de voirie devient le réseau d'eau
	Regard/avaloir	Assurer la continuité du service Assurer l'évacuation l'eau	La fonction	Obstruction Regard	Perturbation intervention assainissement
		Assurer les flux hydrauliques Evacuer les flux hydrauliques	La fonction	Obstruction Regard	Perturbation intervention assainissement
		Permettre le bon fonctionnement des autres composants urbains Assurer le bon fonctionnement du réseau d'eaux usées Assurer l'interface entre l'extérieur et les autres réseaux	La fonction	Perturbation intervention assainissement	Aggravation de la crise

Tableau 12. Extrait de l'AMDE du réseau de voirie

L'Analyse Fonctionnelle et l'AMDE a été déployée sur l'ensemble des réseaux techniques urbains. Les tableaux d'AMDE montrent des interdépendances liées aux fonctionnements de ces réseaux, il convient maintenant d'appliquer cette méthodologie au système de systèmes de réseaux urbains afin de modéliser l'ensemble de ces interactions.

2.4.2. Les méthodes de la Sûreté de Fonctionnement appliquées au système de systèmes de réseaux urbains

Ainsi, ce deuxième niveau d'analyse prend en compte le niveau plus général, ce qui implique la prise en compte des interrelations entre les différents systèmes complexes.

Dans cette partie, l'objectif est d'appliquer la méthodologie définie, dans la partie précédente, aux réseaux techniques urbains. Pour permettre l'application de la méthodologie, ces systèmes techniques ont été divisés en quatre catégories :

- les réseaux d'énergie ;
- les réseaux de transport ;
- les réseaux d'eau ;
- les réseaux de télécommunication.

Dans un premier temps, une analyse fonctionnelle externe (Fig. 38) a été réalisée pour l'ensemble des réseaux techniques urbains. L'objectif est d'établir l'ensemble des fonctions communes que remplissent les réseaux techniques urbains par rapport à leur environnement (transporter des flux, résister à des pressions extérieures...). Cette analyse fonctionnelle externe s'appuie sur une modélisation générique du système urbain dans lequel les réseaux occupent une place centrale.

Des analyses fonctionnelles internes ont alors pu être réalisées pour les quatre grandes familles de réseaux. Ces analyses reposent sur des analyses structurelles qui ont pour objectif de déterminer l'ensemble des composants des différents systèmes. Suite aux analyses structurelles des différents réseaux, il est alors possible de procéder à l'analyse fonctionnelle. Ces fonctions expriment les interactions entre les composants du système et entre le système et son environnement. Ces interactions sont matérialisées à l'aide de schémas : les Blocs diagrammes Fonctionnels (BdF) (Fig. 37, 38, 39 et 40).

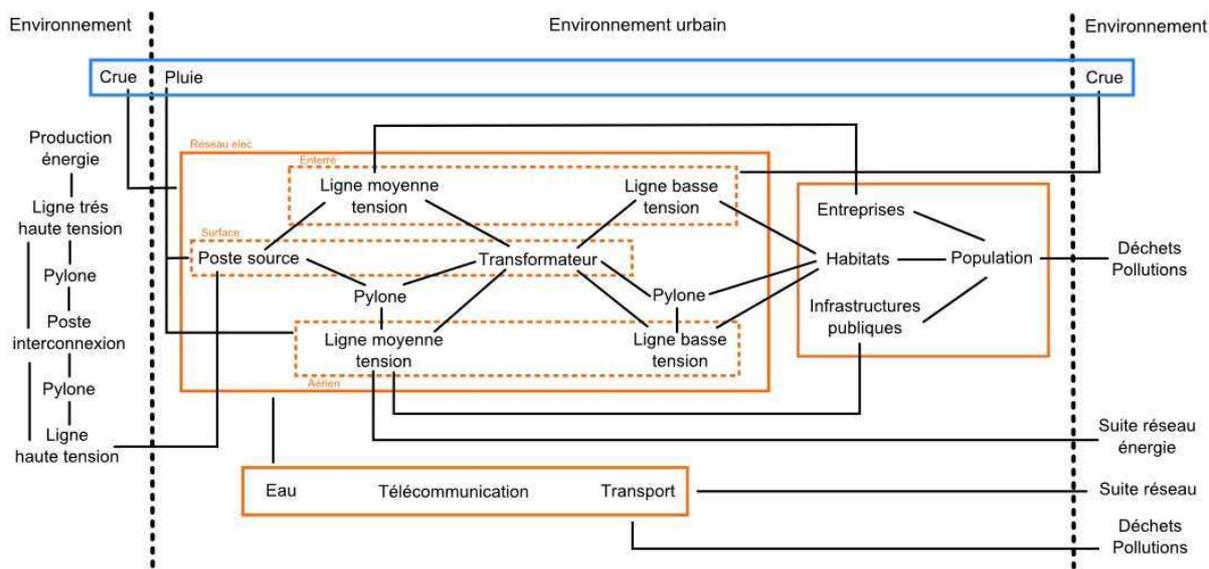


Figure 37. BdF contact du réseau électrique qui montre la décomposition structurelle du réseau électrique ainsi que les relations de contact entre ces composants

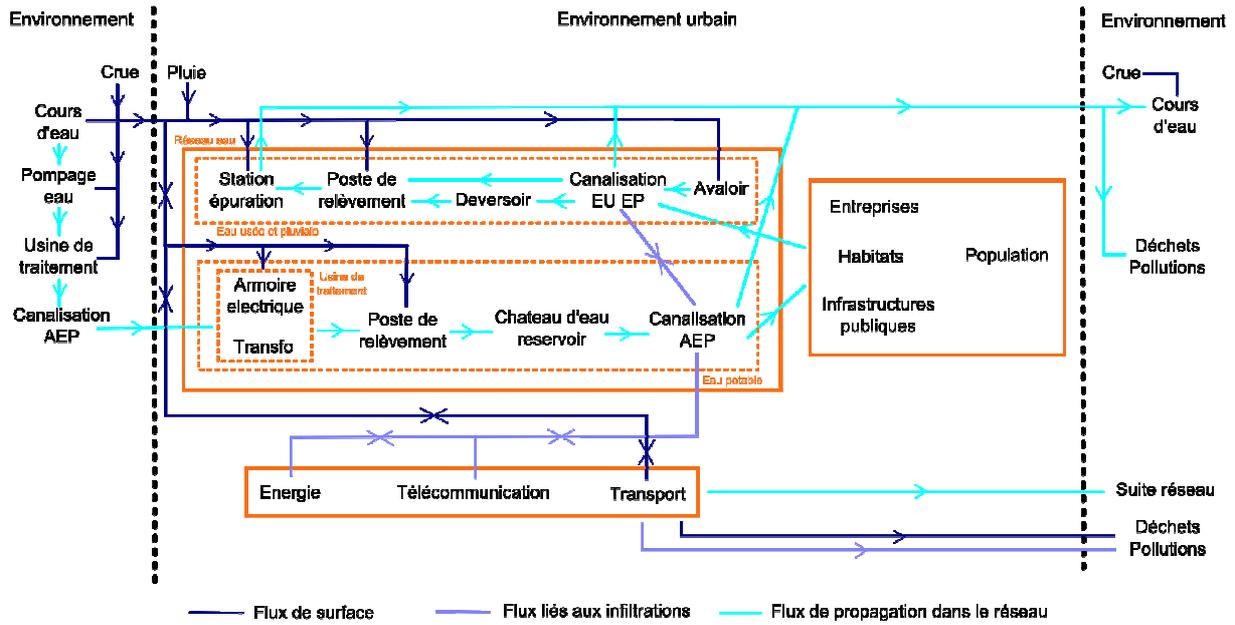


Figure 38. BDF des flux hydrauliques au sein des réseaux d'eau

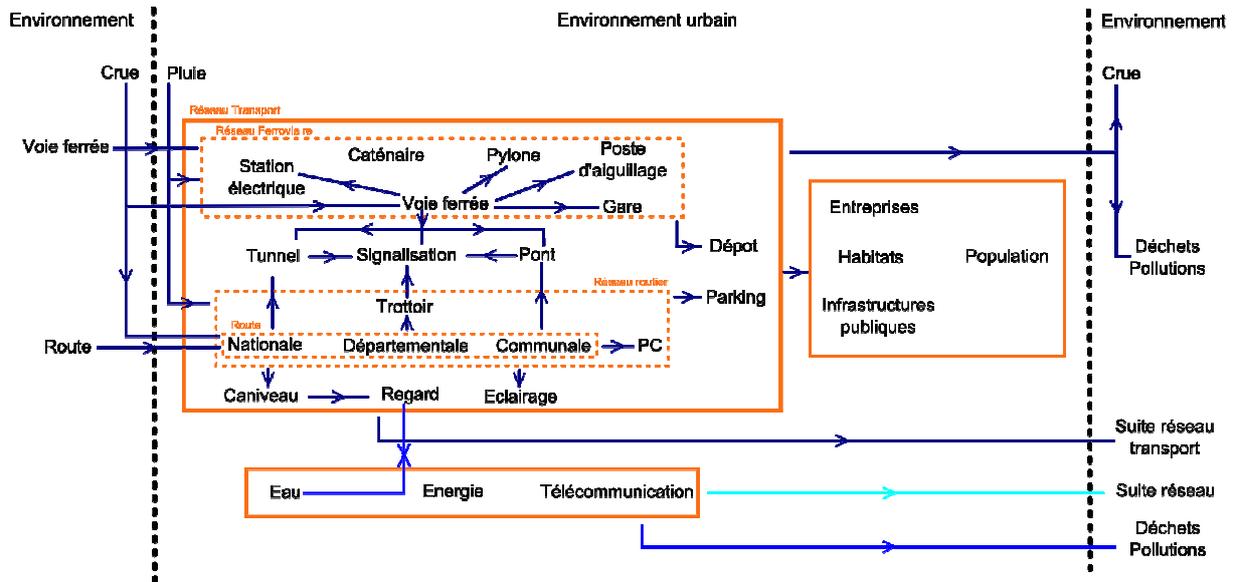


Figure 39. BDF des flux hydrauliques au sein des réseaux de transport

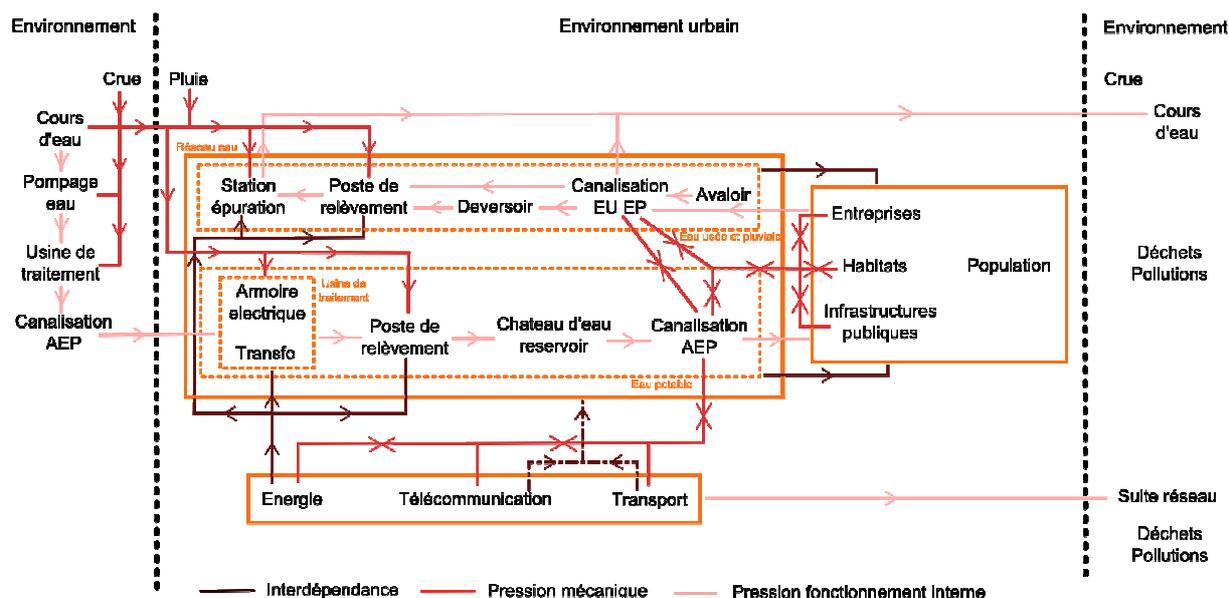


Figure 40. BdF des flux « vulnérabilité » au sein des réseaux d'eau

A partir des BdF réalisés, les fonctions réalisées par les composants des différents réseaux ont été déterminées, dans le cas particulier des risques d'inondation :

- assurer la continuité du service ;
- résister aux flux hydrauliques ;
- assurer les flux hydrauliques ;
- résister aux pressions mécaniques ;
- permettre le bon fonctionnement des autres composants du système urbain.

L'Analyse des Modes de Défaillance et de leurs Effets a été effectuée afin de déterminer les fonctions accomplies par chaque composant, leurs modes de défaillance susceptibles d'apparaître aux différents cycles de vie du système, leurs causes et leurs conséquences. Ainsi, outre la connaissance précise des séquences de défaillance des différents réseaux, l'AMDE va alors permettre de structurer les informations relatives aux perturbations de chaque système. Sont alors successivement étudiés :

- les impossibilités d'un élément à accomplir une fonction requise ;
- les effets par lesquels une défaillance est observée sur un élément du système ;
- les événements qui conduisent aux modes de défaillance ;
- les conséquences associées à la perte de l'aptitude d'un élément à remplir une fonction requise.

A partir de ces AMDE, des scénarios de défaillance qui tiennent compte de l'interdépendance des différents réseaux ont été produits (Fig. 41).

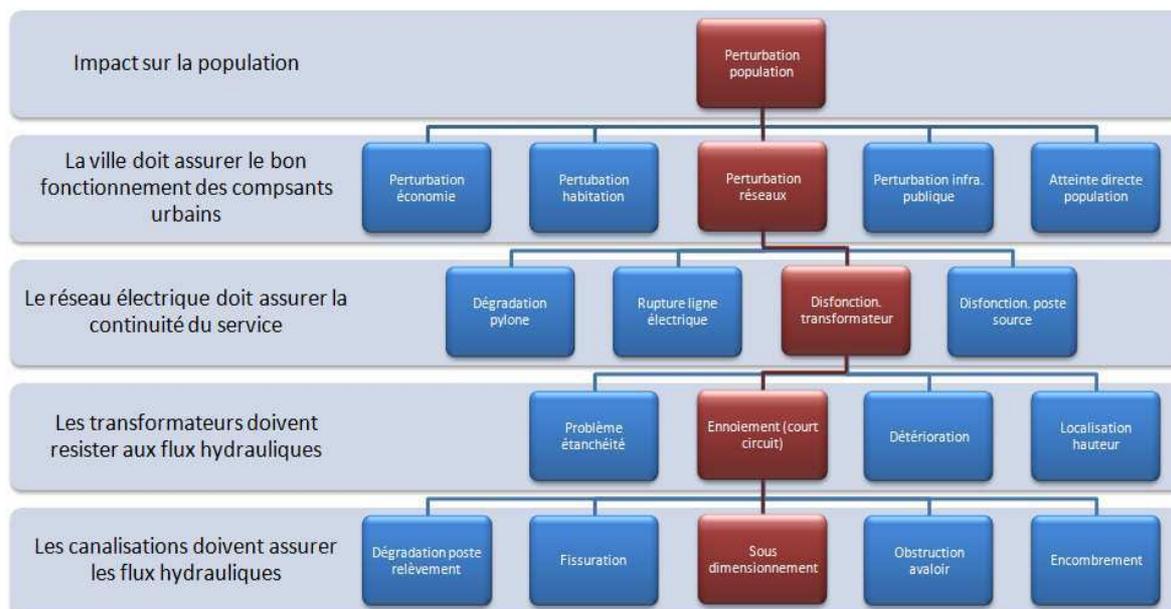


Figure 41. Exemple d'un scénario pouvant être produit

Cependant, l'AMDE est une méthode exhaustive. Ainsi, sachant que l'on détermine plusieurs causes et effets pour un composant et que nous disposons de plus d'une trentaine de composants répartis sur quatre réseaux différents, le nombre important de scénarios pouvant être produit permet difficilement d'être exhaustif quant à leur production. Une solution doit alors être recherchée afin de tenir compte de cette complexité : l'automatisation de l'AMDE pour produire l'ensemble des scénarios possibles est proposée maintenant.

2.4.3. Automatisation de la construction des scénarios

Compte tenu du nombre important de scénarios pouvant être produit, il s'est trouvé nécessaire d'automatiser la production des scénarios de défaillance. En effet, le choix méthodologique qui a conduit à utiliser l'AMDE se justifie par le besoin d'effectuer une analyse exhaustive des modes de défaillance. A ce stade, il était possible de faire appel à des experts, afin de retenir les scénarios les plus probables ou bien les plus critiques. Cependant, ce choix aurait remis en question l'utilisation d'une méthode aussi exhaustive, car l'exhaustivité de l'AMDE ne serait pas mise à profit. Le développement d'un outil informatique s'est alors imposé.

Pour permettre cette automatisation, la décision a alors été prise de constituer une base de données contenant les résultats de l'AMDE (Fig. 42). Cependant, avant l'intégration de cette AMDE dans une base de données, il a été nécessaire de dresser une typologie des causes et des effets. En effet, le lien entre la défaillance d'une fonction et une autre a été évoqué, mais pour que ce lien soit automatisé, une typologie précise a dû être définie. C'est seulement une fois cette typologie définie, qu'un algorithme a pu être développé afin d'établir l'ensemble des relations de causes à effets « directes » entre toutes les fonctions de tous les composants (Fig. 43). Les relations de causes à effets directes sont des liens directs de défaillances entre les différentes fonctions.

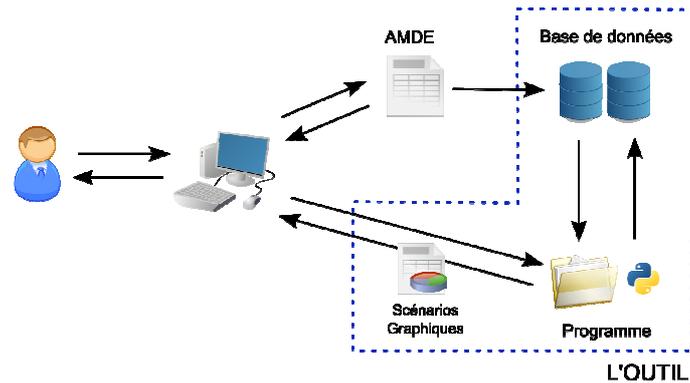


Figure 42. Architecture de l'outil d'automatisation des scénarios de défaillance des réseaux techniques urbains

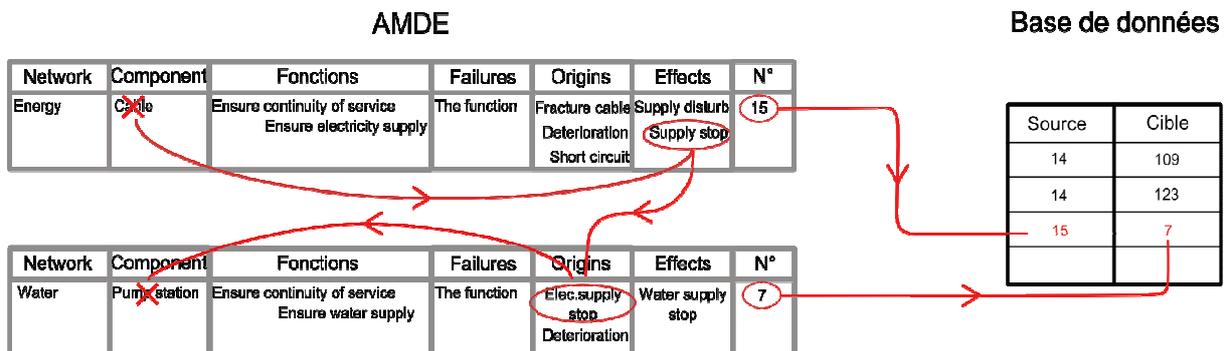


Figure 43. Algorithme permettant l'automatisation des scénarios. Cet algorithme permet la mise en relation des composants établie grâce à l'AMDE sous forme de graphe

Une fois ces relations de causes à effets directes établies, il a été nécessaire d'établir une méthodologie permettant de tenir compte de tous les scénarios pouvant être produits. Ici, il est nécessaire de préciser notre objectif. L'objectif est de disposer d'une méthodologie permettant d'établir l'ensemble des interdépendances entre les composants des différents réseaux. L'objectif n'est donc pas de produire tous les scénarios. Un algorithme a alors été mis au point afin de tester toutes les combinaisons possibles entre les différentes fonctions des différents composants (fonction 1 et fonction 2, puis fonction 1 et fonction 3, [...], puis fonction n et fonction n-1) et de tester s'il existait au moins une relation de cause à effet pour chacune des combinaisons. En l'occurrence, la relation recherchée est la solution la moins coûteuse en temps de calcul : c'est-à-dire la relation la plus directe : celle qui implique le moins de fonctions. Cela revient à rechercher des plus courts chemins sur un graphe. (Fig. 44). Nous pouvons alors établir les défaillances pouvant être déduites suite à la perturbation d'un composant. Inversement, il est possible d'établir les causes pouvant provoquer la défaillance d'une fonction.

Numero	Composant	Fonction	Numero pert	Composant Perturbe	Fonction Perturbe
1	Ligne MT entere	Assurer le transport d'électricité	7	Ligne BT entere	Fournir lénergie aux autres composants urbains
			18	Ligne BT aerienne	Livrer l'électricité aux composants urbains
			28	Transformateur ep	Permettre le transport d'électricité; Adapter la tension; Permettre la distribution d'électricité
			30	Poste de relevement ep	Assurer le relèvement d'eau potable; Permettre le transport deau potable
			37	Canalisation AEP	Livrer l'eau jusqu'aux particuliers
			39	Reservoir (chateau eau)	Transmettre les flux hydrauliques
			47	Canalisation	Evacuer les flux hydrauliques
			51	Poste de relevement	Assurer le relèvement des eaux usées; Permettre le transport
			54	Station epuration	Assurer le traitement des eaux usées; Recycler dans le milieu naturel
			57	Station epuration	Traiter l'eau avant retour dans l'environnement
			61	Borne	Assurer la demande en communication
			62	Repartiteur	Permettre le transport des communications; Permettre la distribution des communications
			65	CAA	Permettre le transport des communications; Permettre la distribution des communications
			68	CAA	Assurer la demande en communication
			72	Cable entere	Assurer la demande en communication
			75	Cable aerien	Assurer la demande en communication
			79	Chaussee	Permettre le transport des véhicules
			80	Chaussee	Résister aux pressions hydromécaniques de la crue; Eviter la submersion
			82	Chaussee	Assurer la circulation (les échanges) de flux
			84	Trottoir	résister aux pressions hydromécaniques de la crue; Eviter submersion
			93	Renardavaloir	Assurer le bon fonctionnement du réseau

Figure 44. Exemple d'effets pouvant être provoqués (à droite) par la perturbation d'une fonction d'un composant (à gauche)

Comme chacun des scénarios ne peut pas être vérifié, ou bien comme il est difficile d'assurer qu'aucun scénario n'a été omis, la validation de notre méthode et de notre application est difficile à établir. La confrontation des résultats avec ce qui se produira sur des terrains d'expérience sera la meilleure validation. En attendant, il est possible de s'appuyer sur des études très générales concernant l'analyse des vulnérabilités des réseaux effectuée lors de retours d'expérience. Pour cela, une étude statistique a été réalisée sur les scénarios produits par l'outil. Chaque scénario a été comptabilisé et regroupé pour que les résultats concernent des composants et non plus des fonctions. Le résultat de cette étude statistique fait émerger trois conclusions principales :

- Premièrement, le réseau électrique se révèle être très agressif envers les autres réseaux (Fig. 45) ;
- Deuxièmement, il est clairement identifié une distinction entre des éléments agressifs (à l'origine de beaucoup de scénarios) et des composants sensibles (à la conclusion de nombreux scénarios possibles) ;
- Troisièmement, il ressort que des composants particuliers jouent un rôle primordial dans les défaillances en chaîne, car ils vont diffuser la défaillance d'un réseau à un autre (par exemple, une station de relevage va diffuser une défaillance d'origine électrique au réseau d'eau).

Ces conclusions, obtenues à partir d'une méthodologie purement théorique, recourent des conclusions issues de retours d'expériences (Etablissement Public Loire, 2006), ce qui semble donc valider notre méthodologie.

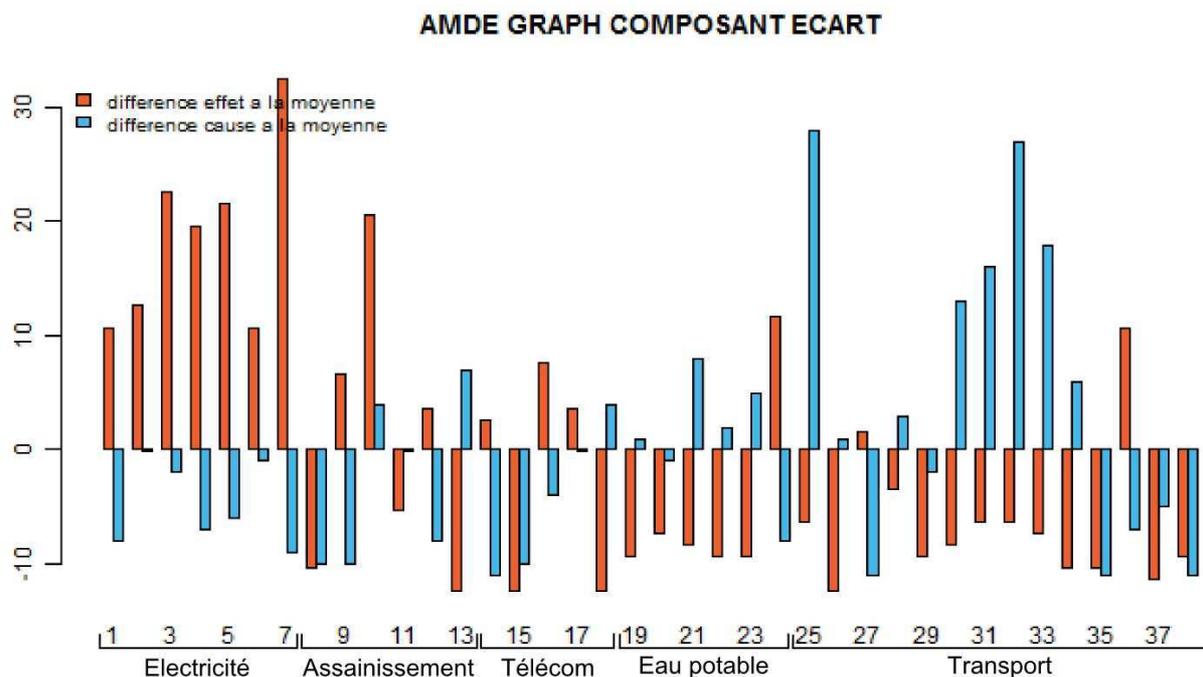


Figure 45. Illustration des statistiques obtenues montrant l'agressivité du réseau électrique envers les autres composants – l'écart à la moyenne des scénarios obtenus

La méthodologie définie dans cette recherche et appliquée aux réseaux techniques urbains semble permettre de tenir compte des interdépendances entre différents systèmes et ainsi de produire des scénarios de défaillance pour des systèmes fortement interdépendants. Si la validation de cette méthodologie reste problématique, la méthodologie présentée constitue une alternative à des méthodes plus mathématiques ou liées à de l'expertise. Ainsi, cette méthodologie semble pouvoir être appliquée à d'autres systèmes d'infrastructures critiques.

La méthode développée permet alors de réellement bénéficier de l'exhaustivité de l'AMDE qui constitue l'élément central de la méthodologie. Cependant, cette exhaustivité est relative à la qualité de l'AMDE réalisée. Or, il est toujours très difficile d'évaluer la qualité d'une AMDE, celle-ci doit être réalisée avec attention et reposer sur une typologie des causes et des effets.

Par la suite cette méthodologie, appliquée ici aux réseaux techniques urbains, sera intégrée dans un outil SIG afin de spatialiser l'information obtenue et de tenir compte de la configuration des réseaux. Ainsi, en confrontant un zonage de l'aléa par rapport à l'état existant de différents éléments des réseaux techniques urbains, les éléments directement impactés par l'aléa peuvent être identifiés. Puis, en appliquant la méthodologie présentée, il sera possible d'établir les interdépendances entre les différents réseaux, et ainsi de déterminer les effets produits par les dommages puis de les spatialiser.

3. Evaluer la capacité d'absorption des réseaux techniques urbains

3.1. Objectifs scientifiques et principes

Nous proposons ici d'évaluer la capacité d'absorption des réseaux techniques urbains, c'est-à-dire leur capacité à fonctionner en mode dégradé, lors d'une inondation. Au travers des réseaux circulent des flux. Nous cherchons ici à étudier, finalement, la continuité de circulation de ces flux, en considérant le maillage des réseaux. L'objectif consiste à étudier s'il existe, ou non, des alternatives lorsqu'une branche d'un réseau est défaillante.

Pour cela, nous utilisons à la fois des méthodes de géographie des risques et des méthodes qui proviennent de la théorie des graphes. En effet, la première famille de méthodes permet d'identifier des indicateurs de vulnérabilité des réseaux. La deuxième famille de méthodes permet de compléter ces indicateurs de vulnérabilité existants par la proposition d'indicateurs de résilience des réseaux techniques urbains, liés en particuliers à l'évaluation de la capacité à absorber des sollicitations externes comme une inondation.

3.2. Comment évaluer la redondance d'un réseau ?

Dans la méthodologie présentée, les capacités d'absorption des réseaux techniques caractérisent les alternatives pouvant être offertes par le réseau suite à la défaillance d'un ou de plusieurs de ses composants. Cette étude des capacités d'absorption requiert donc d'étudier les propriétés de redondance de ces réseaux. La redondance est alors une caractéristique définissant la résilience des réseaux. Ce postulat se retrouve dans différentes recherches. En effet, la redondance est définie comme une des propriétés caractérisant la résilience de différents systèmes (Clarke *et al.*, 1998), (Bruneau *et al.*, 2003), (Ahern, 2011).

Par exemple, il apparaît que l'on peut dégager quatre propriétés pour qu'une organisation soit résiliente (Pinel, 2009) :

- la robustesse ;
- la redondance ;
- la capacité de prise en charge (pour répondre à une défaillance d'une organisation) ;
- la rapidité de rétablissement.

Un système organisationnel se doit donc d'être redondant pour être résilient, au même titre qu'un système technique. Ainsi, généralement, si un composant d'un système ne fonctionne plus, un système redondant pourra pallier cette défaillance grâce à une alternative. La perturbation s'en trouvera absorbée et le service sera en partie assuré.

Cela ne veut pas dire qu'un réseau résilient doit atteindre un niveau de redondance « maximal » comme dans un graphe complet (ou des structures encore plus redondantes car chaque lien d'un graphe complet peut être doublé, triplé...). En effet, il existe un niveau à partir duquel la redondance peut être inutile voire même contre productive. « *On pourrait donc penser qu'en doublant, triplant, quadruplant, etc. de tels équipements, on arrive à se prémunir totalement contre les défaillances. Le bénéfice de cette redondance est cependant limité par ce qu'on appelle les défaillances de causes communes [...]. Il est donc clair qu'il existe un seuil de redondance au-delà duquel il est illusoire de vouloir aller, car on ne gagne*

plus rien en fiabilité. » (Parrochia, 2008). Les classifications des indicateurs de redondance devront tenir compte de cet effet en bornant les classes supérieures de redondance.

Il existe deux principales approches permettant d'étudier les réseaux. Une approche dite structurelle qui étudie la trame, la configuration des réseaux et une approche dite rhéologique qui étudie les flux des réseaux. Notre choix méthodologique a été d'utiliser des indicateurs structurels pour établir un indicateur de redondance. En effet, ce type d'indicateurs semble adapté pour l'évaluation de la redondance, puisque les propriétés de redondance d'un réseau traduisent en partie la configuration de celui-ci.

De plus, les aspects structurels permettent d'analyser comment des impacts matériels évoluent en impacts fonctionnels, c'est-à-dire comment des endommagements se concrétisent par un dysfonctionnement du service (Gleyze *et al.*, 2007). Autrement dit, ces aspects structurels caractérisent, d'une certaine manière, la mise en relation du territoire dans un contexte de risque. Ce niveau intermédiaire permet ainsi de passer d'une logique où le territoire est considéré comme support du risque, à une logique où le territoire est considéré en interaction avec le risque. Comme « *l'aspect spatial des phénomènes ne se limite pas à la statique des territoires et de l'occupation du sol, mais également à la dynamique des phénomènes qui s'y déroulent en particulier les phénomènes induits par la logique de réseau* » (Gleyze, 2005), ces aspects structurels, impliquant l'étude des réseaux techniques, doivent être à la base des études en géographie des risques.

Les travaux sur la résilience, se concentrant ici sur la redondance des réseaux, viennent compléter les travaux pionniers de Jean-François Gleyze sur la vulnérabilité structurelle des réseaux de transport. En effet, la vulnérabilité centre son étude sur l'impact possible du dysfonctionnement d'un composant sur l'ensemble du réseau, tandis que la résilience se focalise sur la continuité et le rétablissement possible du service suite au dysfonctionnement de celui-ci. Les problématiques de connexité sont notamment mises en exergue dans l'étude de la résilience. Or, la vulnérabilité élémentaire, l'indicateur de référence d'évaluation de la vulnérabilité structurelle, ne tient pas compte des critères de connexité (Gleyze, 2005). Résilience et vulnérabilité forment donc un même continuum, où dans ce cas précis la résilience complète les travaux sur la vulnérabilité.

La solution la plus intuitive pour étudier la redondance d'un graphe consiste à étudier le nombre de chemins indépendants entre deux sommets de ce graphe. En effet, plus ce couple possède de chemins indépendants, plus sa redondance sera forte. Quels sont alors les indicateurs issus de la théorie des graphes permettant d'évaluer la redondance d'un graphe en un point ?

Le nombre de chemins indépendants entre deux points correspond au maximum, au degré d'un des deux points de ce couple (en l'occurrence au degré minimum de ce couple) [1]. C'est pourquoi, l'idée que le degré d'un point puisse permettre d'évaluer la redondance du graphe en ce point peut paraître satisfaisante.

$$I(v,j) \leq \text{Min}[d(v); d(j)] \quad [1]$$

Où, relation entre chemins indépendants et degrés des points ($I(v,j)$ = nombre de relations indépendantes entre v et j ; $d(v)$ = degrés de v).

Cependant, la redondance d'un réseau n'est pas seulement liée à ce degré. En effet, pour valider ce postulat, il est possible d'étudier l'exemple des graphes connexes les moins redondants possibles, nommés « arbres » en théorie des graphes. Un arbre possède la particularité suivante : chacun des sommets de ce graphe n'est connectable à un autre sommet du graphe que par un seul chemin. Ainsi, il n'existe aucune alternative à la suppression d'un

arc. Or, il existe des arbres dont les configurations sont amplement différentes (Fig. 53). Cette première approche n'est donc pas satisfaisante.

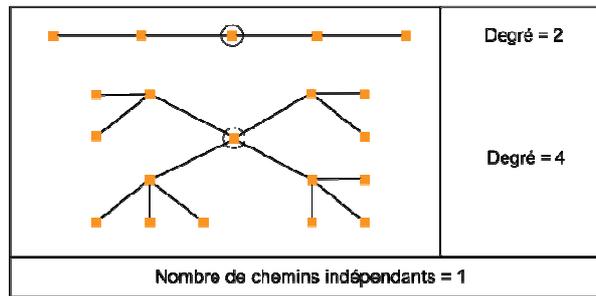


Figure 53. Le degré d'un sommet ne peut à lui seul caractériser la redondance d'un réseau

Un autre indicateur, apparu plus récemment en théorie des graphes, peut correspondre à un indicateur de redondance. En effet, comme son nom l'indique, le redundancy ratio cherche à calculer la redondance d'un réseau (Dueñas-Osario, 2005). La redondance correspond alors au nombre de relations indépendantes permettant d'aller d'un point aux voisins des voisins de ce point (Fig. 54). Les chemins indépendants permettant de relier un point à l'ensemble des voisins de ses voisins sont alors comptabilisés. Ce total est normalisé par le nombre total de relations indépendantes si le graphe était complet (graphe où tous les points du graphe sont reliés entre eux) [2].

$$Rr(v) = \frac{1}{(|S| - 1)^2} \sum_{j \in \Gamma^2(v); j \neq v} I(v, j) \quad [2]$$

Où le redundancy ratio ($|S|$ = nombre de sommets du sous graphe ; $I(v, j)$ = nombre de relations indépendantes entre v et j ; $\Gamma^2(v)$ = voisins des voisins d'un point).

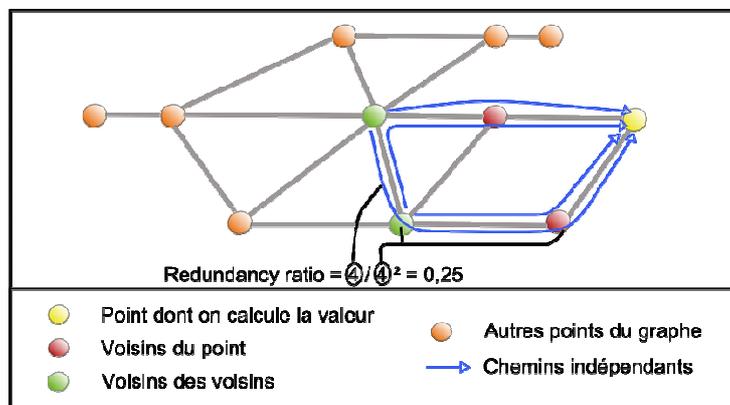


Figure 54. Le redundancy ratio

La mise en pratique de cet indicateur donne des résultats intéressants pour traiter un graphe dans son ensemble. Ainsi, en calculant la moyenne des résultats obtenus en chacun des points d'un graphe, cet indicateur permet de différencier des graphes de types linéaire, carré ou complet. Cependant, quelques incohérences demeurent (Fig. 55).

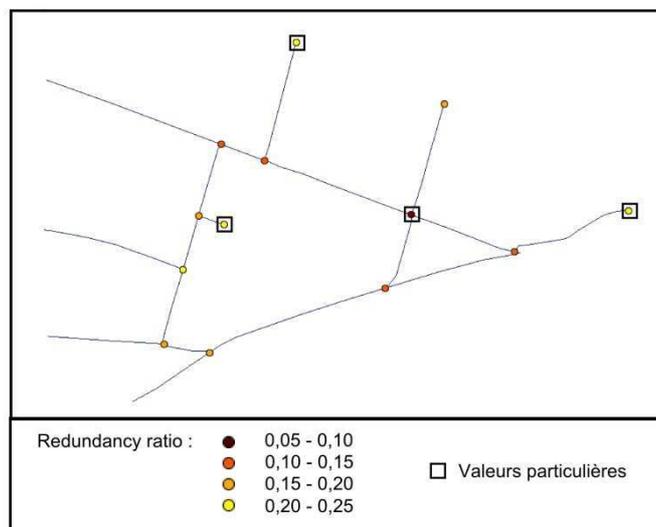


Figure 55. Les résultats du redundancy ratio sont parfois incohérents.

Les points de la figure 55 attirent l'attention (sommets pendants très redondants et points d'articulation peu redondants). Ils sont l'expression des cas soulignés ci-dessous (Fig. 56). En effet, dans les trois cas présentés en figure 56, il est anormal d'obtenir des valeurs aussi différentes, alors que les trois points soulignés appartiennent à des arbres. Dans le cas de base (au centre de la figure 56), une valeur de référence pour un réseau linéaire est obtenue. Or, pour le sommet pendant (à droite sur la figure 56) la valeur devient nettement supérieure et comparable à un maillage carré beaucoup plus redondant. *A contrario*, si l'on rajoute des sommets pendants (à gauche sur la figure 56), la valeur devient plus faible, sans pour autant pouvoir dire qu'en ce point la structure soit moins redondante. Ces trois cas révèlent que cet indicateur peut mettre en évidence le nombre de composantes connexes créées en cas de suppression d'un sommet (4 à gauche, 2 au centre, 1 à droite). En conclusion, l'utilisation de cet indicateur semble être indiquée pour mesurer la redondance globale d'un réseau, mais pas la redondance d'un graphe en un point.

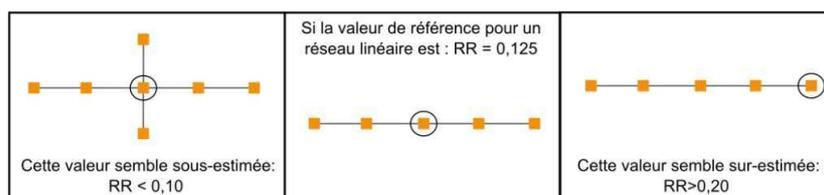


Figure 56. Trois cas où le redundancy ratio souligne le nombre de composantes connexes créées en cas de suppression du sommet (4 à gauches, 2 au centre, 1 à droite) et non la redondance du réseau (plus la valeur baisse plus le nombre de composante connexe augmente)

Le clustering coefficient, pouvant être traduit par coefficient de regroupement ou d'agglomération, est utilisé notamment pour étudier les structures locales robustes (Watts *et al.*, 1998), (Holme *et al.*, 2002), c'est-à-dire les composantes de la trame du réseau qui sont fortement connectées à leur voisinage. D'une certaine manière, cela correspond à des structures fortement redondantes. L'indice de clustering local d'un sommet mesure le degré de transitivité locale autour de ce sommet, soit le nombre de relations entre les voisins de ce sommet [3] (Fig. 57).

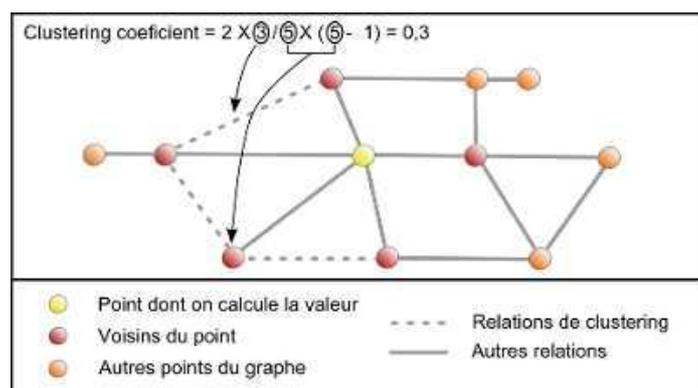


Figure 57. Calcul du cluster coefficient

$$\gamma(v) = \frac{\mathbf{E}[\Gamma(v)]}{\frac{1}{2} d(v)[d(v) - 1]} \quad [3]$$

Où, clustering coefficient ($\mathbf{E}[\Gamma(v)]$) = nombre d'arcs entre les voisins de v ; $d(v)$ = degré de v .

Or, cet indicateur ne permet pas de différencier les structures faibles. Par exemple, pour cet indicateur un réseau au maillage (à la trame) carré, maillage courant pour les infrastructures réseaux, est considéré comme une structure faible, car il n'existe aucune arrête entre les voisins d'un sommet (Fig. 58). Il n'existe donc aucune différence, pour cet indicateur, entre un réseau à la trame linéaire et un réseau à la trame carrée. En effet, cet indicateur est issu de la recherche en sciences sociales où les réseaux sont généralement plus fortement connectés qu'un réseau technique. Dans notre cas, ce coefficient ne peut pas être utilisé, même s'il est possible d'assouplir le critère de « clustering ».

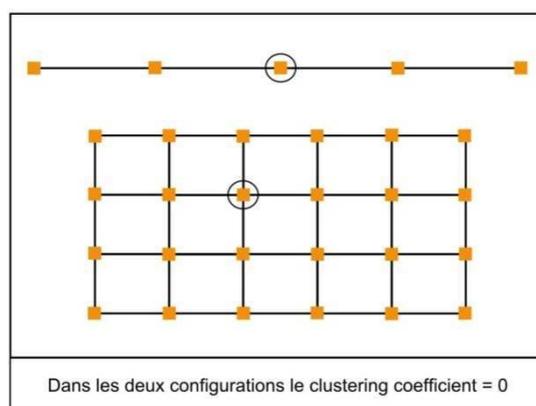


Figure 58. Le clustering coefficient ne permet pas de distinguer les structures que cet indicateur évalue comme faible

3.3. Développement de nouveaux indicateurs pour l'évaluation de la redondance

Une solution pour calculer la redondance d'un graphe en un point peut consister à calculer la moyenne du nombre de chemins indépendants possibles entre ce point et les autres points du graphe. Tentant de caractériser la redondance autour d'un sommet, cette moyenne peut être calculée à partir des points voisins à ce sommet [4]. Pour cela, il est proposé, comme pour le redundancy ratio, de travailler à l'échelle des voisins des voisins d'un point (Fig. 59). Cet indicateur sera nommé par la suite le nombre de chemins moyen local (*Cml*) [4].

$$Cml(v) = \frac{1}{V[\Gamma^2(v)]} \sum_{j \in \Gamma^2(v); j \neq v} I(v, j) \quad [4]$$

Où, nombre de chemins moyen local ($V[\Gamma^2(v)]$) = nombre de voisins des voisins de v ; $I(v, j)$ = nombre de relations indépendantes entre v et j).

La redondance d'un graphe en un point doit aussi tenir compte des alternatives existantes à ce point. En effet, un réseau redondant doit être en mesure de réorienter les flux. Ainsi, un sommet ne peut pas être considéré uniquement comme origine ou destination d'un chemin, mais il doit aussi être considéré comme un point de passage pouvant être perturbé (Gleyze, 2005). Pour cela, on effectue la moyenne du nombre de chemins entre les voisins du point, en cas de suppression de ce point [5]. La démarche est alors proche de l'indice de clustering, en raison des questions de transitivité. Il y a transitivité lorsque trois éléments A , B et C sont tels que, si A et B sont en relation, ainsi que B et C , alors A et C sont en relation. Dans notre cas, on considère que la relation entre A et C existe, s'il existe un chemin pour aller de A à C sans passer par B . Cet indicateur sera nommé : indicateur d'alternatives moyen local à un point (Fig. 59).

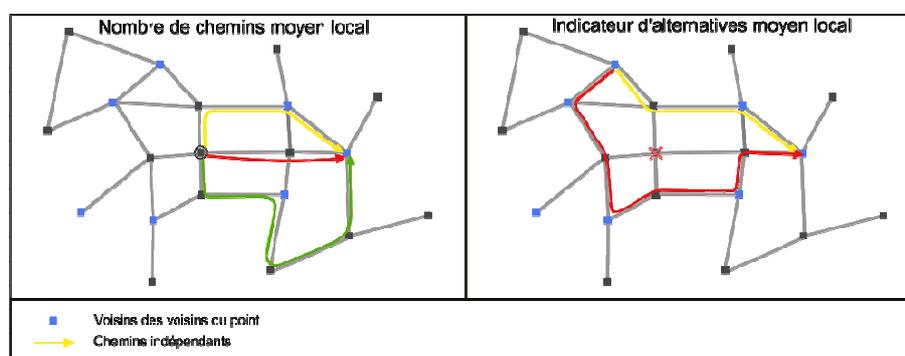


Figure 59. Les deux nouveaux indicateurs : à droite le nombre de chemins moyen local et à gauche l'indicateur d'alternatives moyen à un point

$$Aml(v) = \frac{1}{(V[\Gamma^2(v)])(V[\Gamma^2(v)] - 1)} \sum_{i, j \in \Gamma^2(v); i, j \neq v} I(i, j) \quad [5]$$

Où, indicateur d'alternatives moyen à un point ($V[\Gamma^2(v)]$) = nombre de voisins des voisins de v ; $I(i, j)$ = nombre de relations indépendantes entre i et j).

Les indicateurs présentés ont été testés sur des réseaux théoriques. Ces tests permettent de vérifier que les résultats obtenus concordent bien avec l'objet de la mesure ou au contraire permettent de détecter d'éventuelles anomalies. Ici, deux tests sont présentés concernant deux réseaux théoriques (un réseau linéaire et un réseau carré). Les valeurs des deux indicateurs permettent de clairement identifier les différences de redondance entre les deux réseaux (voir les valeurs moyennes et médianes) (Fig. 60 et Fig. 61). Le nombre de chemins moyen local met bien en évidence les spécificités d'un réseau arborescent (valeur=1 et écart-type=0) (Fig. 59). Tandis que l'indicateur d'alternatives moyen local à un point permet de clairement identifier les différentes configurations locales au sein d'un réseau. Ainsi, pour le réseau linéaire, cet indicateur distingue les sommets pendants et les points d'articulation lesquels, en cas de suppression, n'auront pas le même impact (Fig. 61).

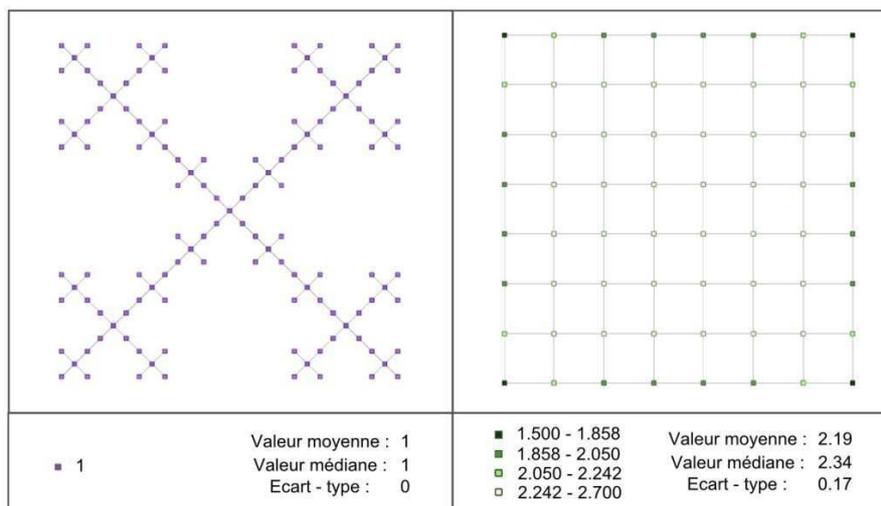


Figure 60. Test du nombre de chemins moyen local

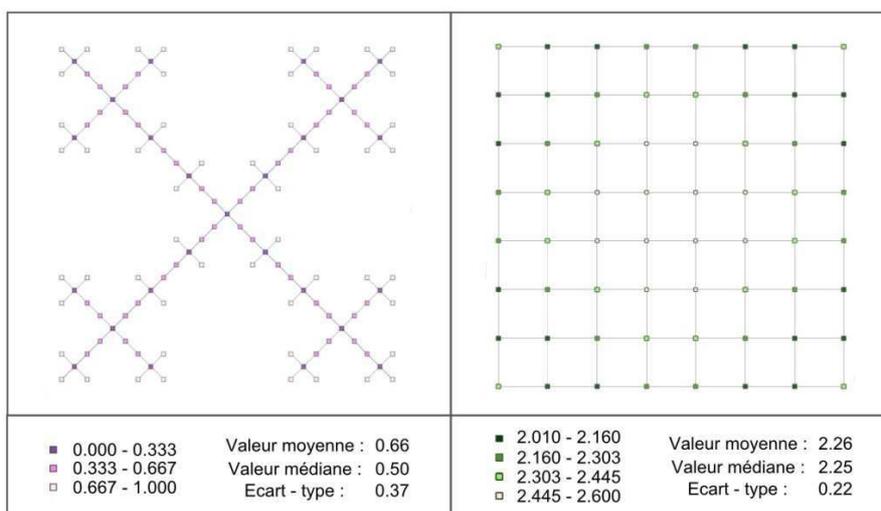


Figure 61. Test de l'indicateur d'alternatives moyen local

Dans le cas particulier d'un réseau de transport, la distance des trajets joue un rôle très important. Or, comme le souligne les points situés de part et d'autre des ponts, ces points n'apparaissent pas comme faiblement redondant, alors même qu'il le pourrait compte tenu de la configuration du réseau (Fig. 62). En effet, la qualité des alternatives n'est pas prise en compte par le nombre de chemins moyen local (Fig. 62) et l'indicateur d'alternatives moyen local.

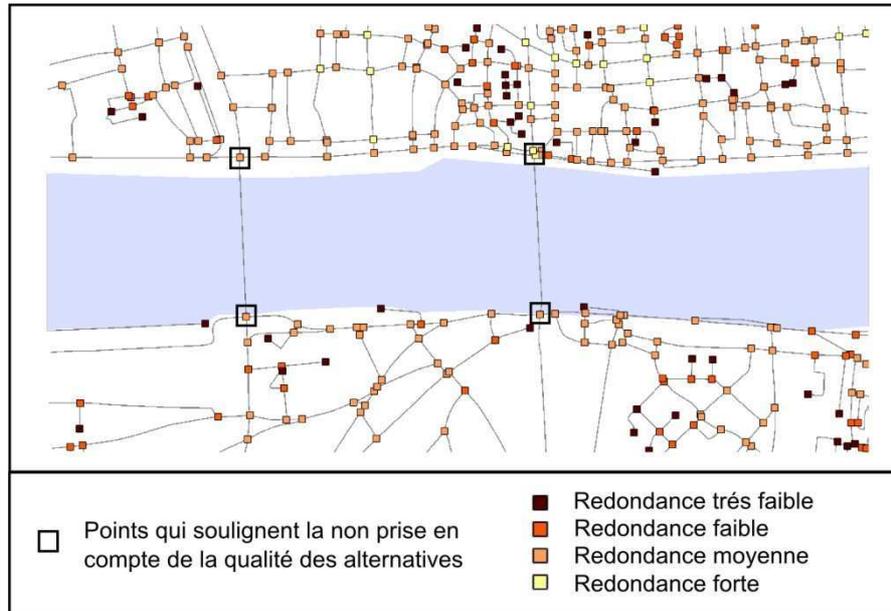


Figure 62. Points singuliers qui soulignent la non prise en compte de la qualité des alternatives (le nombre de chemins moyen local)

Par qualité, nous entendons la différence des distances entre le plus court chemin et les alternatives. Ainsi, plus cette différence est importante, plus la qualité de l'alternative est moindre. En effet, ces indicateurs ont été conçus comme des indicateurs purement topologiques qui ne tiennent donc pas compte de la géométrie du réseau, car la métrique n'a que peu d'importance, au premier abord, pour la plupart des réseaux. Cependant, certaines recherches commencent à démontrer le contraire (Gorman *et al.*, 2004). Il est donc proposé de pondérer ces alternatives en fonction du rapport entre la longueur du plus court chemin et la longueur de l'alternative en particulier pour les réseaux de transport [4]. L'indicateur n'est alors plus seulement topologique, il devient géométrique [6], [7].

$$Cmlp(v) = \frac{1}{V[\Gamma^2(v)]} \sum_{j \in \Gamma^2(v); j \neq v} \frac{\sigma(I(v, j))}{\text{Min}(\sigma(I(v, j)))} \quad [6]$$

$$Amlp(v) = \frac{1}{(V[\Gamma^2(v)])(V[\Gamma^2(v)] - 1)} \sum_{i, j \in \Gamma^2(v); i, j \neq v} \frac{\sigma(I(i, j))}{\text{Min}(\sigma(I(i, j)))} \quad [7]$$

Où, nombre de chemins moyen local pondéré et nombre et indicateur d'alternatives moyen local pondéré ($\sigma(I(v, j))$ = distance d'un chemin indépendant entre v et j)

Après avoir défini de nouveaux indicateurs, deux questions se posent :

- Quelle est la pertinence de ces indicateurs ?
- Comment peut-on les implémenter ?

Ces deux questions sont indissociables, car c'est par le biais de leur implémentation dans un système d'information à référence spatiale (partie 2) approprié que la pertinence de ces indicateurs sera évaluée. De plus, l'agrégation des deux indicateurs retenus pour qualifier la redondance d'un réseau technique permettra d'obtenir une information synthétique.

4. Evaluer la capacité de récupération des réseaux techniques urbains

4.1. Objectifs scientifiques et principes

Parmi les capacités que l'on a définies comme nécessaires à la résilience des réseaux techniques urbains, la capacité de récupération est sans doute celle la plus « représentative » du concept de résilience. En effet, nous opérons par exemple une distinction entre vulnérabilité et résilience, car le premier concept est centré sur la notion d'endommagement tandis que le second est centré sur des notions de récupération. Ici, la récupération n'est pas synonyme d'un retour à l'état antérieur, mais davantage d'une récupération fonctionnelle des services urbains, autrement dit une remise en service d'éléments nécessaires au bon fonctionnement urbain.

L'endommagement de composants urbains essentiels au bon fonctionnement de la ville est difficilement évitable durant une inondation. Ainsi, les réseaux sont un exemple d'infrastructures critiques indispensables au bon fonctionnement urbain, mais qui de par leurs structures et leurs contraintes d'implantation sont très exposés aux risques d'inondation. Ces réseaux ne pouvant résister à toutes les perturbations, nous avons étudié premièrement comment ce réseau pouvait assurer un fonctionnement en mode dégradé durant la perturbation, en analysant sa topologie. On ne s'intéressait alors pas aux éléments du réseau pouvant être perturbés, chacun des éléments pouvant être potentiellement perturbés dans ces études topologiques. Il n'en reste pas moins évident que pour retrouver un niveau tout à fait acceptable, les composants endommagés du réseau doivent être remis en service et ainsi assurer une récupération fonctionnelle de l'ensemble des composants du réseau. Pour cela, l'identification des éléments perturbés semble nécessaire, d'où la correspondance entre cet indicateur et l'étude des capacités de résistance des réseaux techniques urbains.

4.2. Comment évaluer la capacité de récupération des réseaux techniques urbains ?

Pour étudier ces capacités de récupération, il semble alors pertinent d'étudier d'un point de vue organisationnel ces réseaux. En effet, la remise en service des réseaux nécessite des capacités organisationnelles relevant de la gestion de crise. C'est pourquoi en France, il existe pour les différents réseaux des plans de remise en service des réseaux. On peut citer le plan CRISTEL (Crise aux Télécommunications), RADIAL (Réparation Accélérée des Dégâts d'Intempérie Aux Lignes) qui a pour objet la mise en place de dispositions pour faire face aux crises pouvant intervenir sur la boucle locale, lorsque tous les moyens ne permettent pas d'envisager un retour à la normale en moins d'un mois. Il existe aussi le plan Radial PRISME (Commutation, Transmission). Les missions réalisées dans le cadre des plans CRISTEL sont, par nature, des interventions exceptionnelles liées à des dysfonctionnements importants affectant les infrastructures et/ou les équipements réseaux de France Télécom. Autrement dit, leur objectif est le rétablissement du service aux clients dans les plus brefs délais, et ce dans des conditions de nature exceptionnelle. Ce plan de secours prévoit la mise en œuvre immédiate de techniques d'intervention, au niveau national ou régional, selon une organisation préalablement établie.

Pour le réseau électrique, on peut citer le plan ADEL (Action et Dépannage Electricité). Ce programme d'urgence a pour objectif de remettre en état les réseaux électriques dans des délais record pour réapprovisionner les populations victimes d'une catastrophe naturelle.

Pouvant être remis à jour tous les ans, ce plan consiste à mettre en éveil tous les services compétents d'EDF, de la clientèle à la production, en passant par le réseau, dans le but de constituer un véritable PC de crise. Ce plan comporte une liste d'abonnés prioritaires, parmi lesquels, outre les hôpitaux et les établissements de secours, figurent les stations de pompes et les équipements de télécommunication. Outre les moyens humains mis à disposition, des moyens techniques comme des groupes électrogènes sont prévus. D'autres plans existent, comme les plans FIRE (Force d'Intervention Rapide Electricité) et COREG (Communication et Organisation en cas d'Evènements Graves).

Cependant, ces plans ne garantissent pas aux villes une même récupération de leurs réseaux, car ces capacités organisationnelles doivent tenir compte des spécificités des organisations à l'échelle locale.

Ces plans consistent à allouer des ressources et des moyens, autant techniques qu'humains, afin de gérer la crise et ainsi permettre la remise en service de ces réseaux dans les plus brefs délais. Ces aspects organisationnels, nous incitent à étudier la résilience organisationnelle des réseaux. Actuellement, les travaux concernant la résilience organisationnelle des réseaux sont plus ou moins rares selon les pays. Ils existent notamment aux Etats-Unis, en Australie et au Canada, car ces pays se sont ouvertement tournés vers la mise en place de politiques de résilience à l'échelle nationale. Ainsi, une méthodologie d'évaluation de la résilience organisationnelle a été proposée par des canadiens. Ce bilan sur l'évaluation de la résilience s'articule autour de quatre axes majeurs :

- la connaissance du système : cette partie correspond à l'identification des points faibles du système et contribue à faire accepter les défaillances du système ;
- la capacité du système à maintenir ses activités : le système doit être proactif et anticiper les défaillances, de même qu'il doit planifier des actions pour maintenir un niveau de fonctionnement acceptable ;
- la capacité du système à rétablir ses activités : cette capacité constitue le second volet de la résilience organisationnelle. Le système planifie et met en place des procédures afin de retrouver au plus vite un fonctionnement acceptable en cas de crise ;
- l'état de résilience du système : le bilan final souligne les points forts du système et met en lumière les pistes d'amélioration visant à accroître sa résilience.

Cette évaluation consiste à interroger les organisations sur leur connaissance d'elle même et leurs composants vulnérables, sur leur politique de gestion de crise et à évaluer leur capacité d'anticipation.

Cependant, aussi complètes soient elles, ces méthodes ne tiennent pas compte des impacts spatiaux des dysfonctionnements urbains qui vont conditionner, en partie, les capacités de récupération de la ville à la suite d'une perturbation. Quelles solutions s'offrent à nous pour analyser les capacités de récupération d'un réseau d'un point de vue spatiale ? Pour étudier cela, intéressons nous aux effets spatiaux induits par la disposition des perturbations et des centres de remise en service.

Dans un comté de Los Angeles, on dénombre 3 centres médicaux (Centres des secteurs A, B, C) de même envergure. Cependant, l'établissement du secteur A sert 2 fois plus de patients. Dans ce même secteur, on projette un accroissement démographique plus important qu'ailleurs. Faut-il alors redistribuer les centres ou créer un nouveau centre ? La problématique est la suivante : les populations sont dynamiques d'un point de vue géographique et démographique. Il faut donc chercher à optimiser le rapport entre le

personnel médical et la clientèle (patients) desservie sur le territoire, le temps d'accès et la distance aux services. Ici l'aspect organisationnel est donc traduit en une problématique d'ordre géographique et démographique. En fait, ce type de problématique, appliqué dans cet exemple à une infrastructure critique, est couramment étudié par les entreprises commerciales, et a donné naissance à une branche du marketing : le géomarketing.

Le géomarketing repose sur une idée simple : le comportement des agents économiques est dicté par la minimisation de ses coûts (principe économique de base), c'est pourquoi, ceux-ci viseront notamment à minimiser leur coût de transport et leur temps, par conséquent leur distance. Ainsi, entre deux magasins équivalents, proposant les mêmes produits au même prix, le client aura de grande chance de choisir le magasin le plus proche (en tout cas le plus accessible). La notion d'espace devient alors primordiale en marketing, pour déterminer l'emplacement optimal d'un nouveau magasin par rapport à sa clientèle potentielle, ou déterminer les clients potentiels d'un centre (ce que l'on nomme les zones de chalandise). Il est bien sûr possible de complexifier ce modèle en tenant compte d'autres éléments complémentaires à la distance, c'est ce que l'on nomme la fonction objective.

Pour faciliter la recherche d'implantation, différents modèles baptisés « modèles de localisation-allocation » ont été mis au point. La question fondamentale soulevée par ces modèles est de savoir comment approvisionner ou servir au mieux une aire géographique vaste à partir d'un nombre limité de points de vente. Les modèles de localisation-allocation prennent d'une manière générale l'hypothèse que la probabilité d'un consommateur de fréquenter un point de vente ou de service donné est d'autant plus élevée qu'il en est proche, compte-tenu de son niveau d'attractivité. L'analyse tend ainsi à réduire la distance moyenne séparant l'ensemble des consommateurs au point de vente le plus proche de son domicile en maximisant l'accessibilité des localisations.

La recherche opérationnelle en matière de localisation d'activités a été l'une des préoccupations majeures dans de nombreux domaines d'applications (logistique, transport, grande distribution, services bancaires, assurance). Ce problème lié à un réseau discrétisé bien identifié est classiquement connu sous le nom de p-médian (Hakimi, 1965), (Revelle *et al.*, 1970) qui trouve son origine au début du XX^{ème} siècle dans les réflexions d'Alfred Weber (Weber, 1909) sur la meilleure manière de placer un centre de production par rapport aux sources de matières premières. En pratique, le problème du p-médian (nommé en abrégé p-MP) est soulevé dans la plupart des réseaux qu'ils soient routiers, aériens ou téléphoniques (Daskin, 1995), (Galvao, 1993). Une liste très variée des applications potentielles du modèle p-médian a été dressée, comme les décisions de localisation pour les services d'urgence (police, pompiers, urgences médicales), les réseaux informatiques et de communication (localisation des fichiers informatiques sur une série de serveurs identifiés), les applications militaires (centres stratégiques), les activités de service public ou privé (les magasins, centres commerciaux, postes), les activités de transport (arrêts de transport en commun, entrepôts), l'intelligence artificielle et les modèles statistiques (partition de nuage de points) (Handler *et al.*, 1979).

La méthodologie actuellement la plus pertinente consiste, à partir d'une géolocalisation des clients potentiels, à déterminer les zones de chalandise correspondant à ces clients potentiels en utilisant les principes de traitement du signal. En effet, ces principes permettent le traitement d'un grand nombre de données, ce qui facilite la mise en pratique des heuristiques du réseau p-médian. On détermine ensuite les caractéristiques de chaque aire (les centres et leur niveau de demande) pour permettre la mise en place d'un réseau p-médian que l'on résout à l'aide d'une heuristique (Fig. 63).

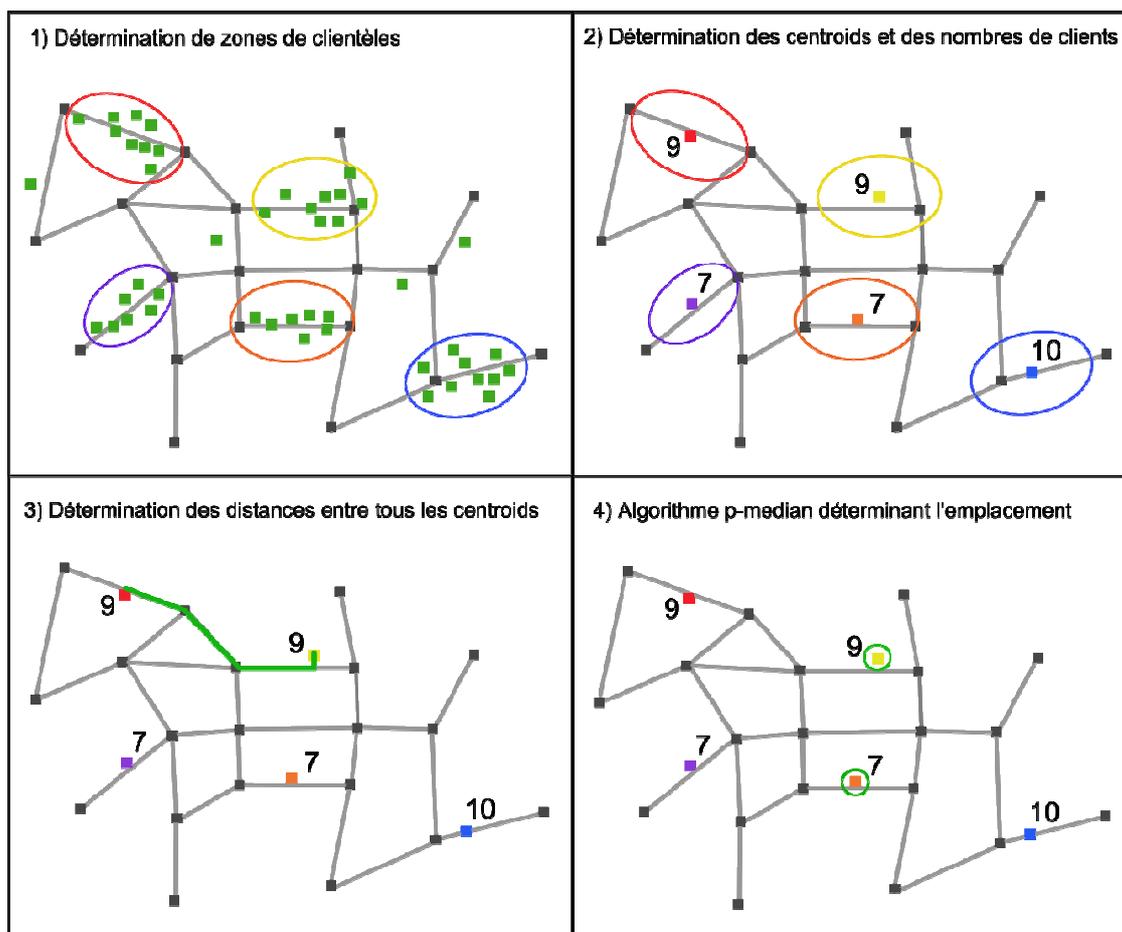


Figure 63. Méthodologie des modèles localisation-allocation en géomarketing, en haut à gauche, les clients potentiels sont représentés en vert. On détermine alors des zones de chalandise, puis on leur adjoint leur nombre de clients et leur centre. On calcule alors les distances entre chaque centre, puis l'algorithme p-médian. A souligner que l'emplacement optimum est souvent recherché à partir des centroïdes.

Nous proposons de tester, dans une première approche, les méthodes issues du géomarketing pour l'évaluation de la capacité de récupération des réseaux techniques urbains.

4.3. Quelques indicateurs pour l'évaluation de la capacité de récupération des réseaux techniques urbains

Pour une configuration donnée, il existe une position optimale des centres visant à minimiser une fonction de coût par rapport à leurs clients. L'idée est alors d'étudier la position optimale des centres de remise en service par rapport à leurs perturbations. Cela revient donc à appliquer les techniques de géomarketing à la gestion des risques, afin d'analyser la plus ou moins bonne distribution des centres de remise en service par rapport à leur possible perturbation. Plus cette distribution sera proche de la distribution optimale, plus les capacités de récupération seront optimisées.

Comment définir un indicateur en utilisant ces modèles issus du géomarketing ? On peut alors imaginer comparer les résultats issus d'une configuration idéale par rapport à la situation réelle.

Cependant, cette méthodologie pose un problème. Minimiser ces distances revient à rapprocher au maximum les centres de remise en service des perturbations. Cela veut dire, rendre les centres de remise en service probablement plus vulnérables à ces perturbations. C'est un paradoxe. Par exemple, si les perturbations ne correspondent pas toujours aux zones inondables, il est envisageable que, dans certaines situations, ces perturbations soient toutes en zone inondable. Dans ce cas, il y a une forte probabilité pour que l'emplacement optimal d'un centre de remise en service soit situé en zone inondable (Fig. 64). Néanmoins, on peut bien sûr chercher l'emplacement optimal situé hors zone inondable, ou encore parmi les zones déterminées comme redondantes.

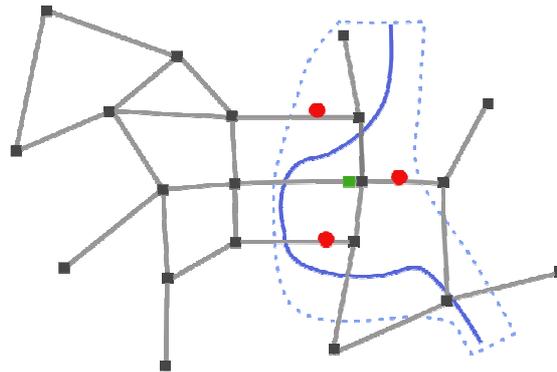


Figure 64: Limite d'une transposition directe du géomarketing à la gestion des risques, le carré vert représente le centre de remise en service, les points rouges les composants perturbés

L'approche ci-dessus peut difficilement s'appliquer à notre méthodologie. En effet, nos indicateurs de capacité d'absorption sont des indicateurs locaux (c'est-à-dire qu'ils s'appliquent en un point du réseau et permettent la délimitation de zones plus ou moins redondantes) et n'ont pas pour objectif de déterminer un indicateur global pour le réseau, contrairement à l'approche ci-dessus. Bien sûr, il est possible d'obtenir un indicateur global que l'on pourrait alors agréger, mais l'objectif de notre méthodologie est de mettre en exergue certaines zones plus ou moins redondantes, ce qu'un indicateur global ne permet pas.

L'approche spatiale souligne les questions d'accessibilité, donc de distance entre les perturbations et les centres. C'est pourquoi, pour notre indicateur, il semble nécessaire de tenir compte des distances entre les perturbations et les centres de remise en service les plus proches. Nous nous plaçons toujours dans le cas où les perturbations sont de même importance. Ainsi, les perturbations les plus proches des centres sont considérées comme ayant une plus grande capacité de récupération. En effet, les perturbations les plus accessibles seront sans doute traitées en premier (Fig. 65).

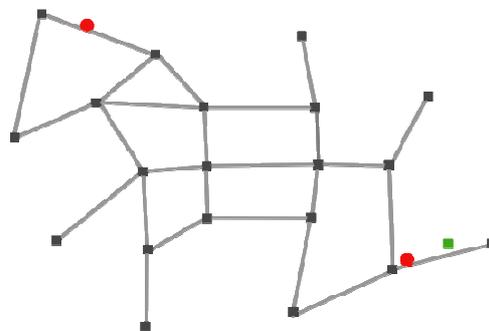


Figure 65. La distance comme indicateur de capacité de récupération

Sur cette figure, il semble peu probable que la perturbation la plus proche soit remise en service plus tard que la seconde perturbation. En effet, il semble difficile d'imaginer les équipes d'intervention passer devant celle-ci sans intervenir.

La seule prise en compte de la distance n'est pas suffisante. En effet, une perturbation qui n'est pas forcément proche d'un centre de remise en service, mais se situant dans une zone où le réseau routier est intact, peut être considérée plus accessible qu'une perturbation plus proche, mais située dans une zone où le réseau routier est perturbé. Pour prendre en compte cet effet, nous calculons l'allongement des distances entre les perturbations et les centres pour un réseau routier à l'état normal et à l'état perturbé. Cet allongement caractérise en partie le fait que la perturbation du réseau routier perturbe l'accessibilité à la perturbation du composant du réseau (Fig. 66).

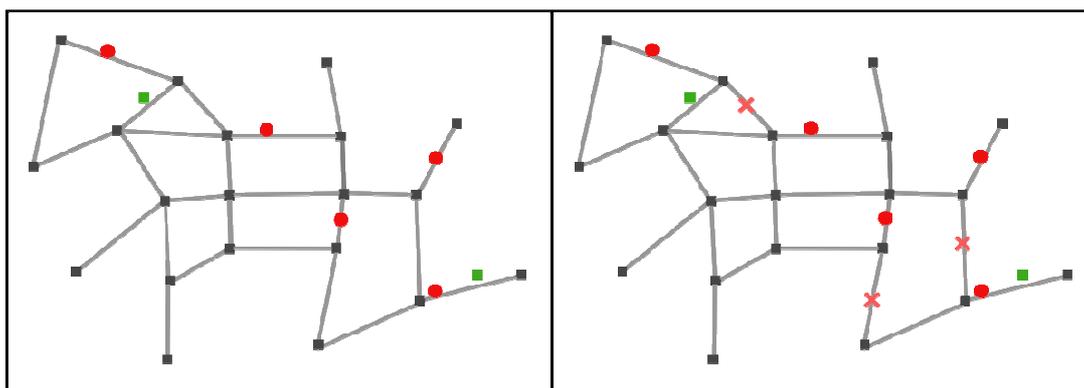


Figure 66. L'allongement comme indicateur de capacité de récupération

Sur cette figure on perçoit la différence entre une configuration à l'état normal (à gauche) et à l'état perturbé (à droite). Ici dans ce cas extrême le centre de droite n'est plus en mesure de desservir qu'un seul centre. Ainsi, l'allongement viendra caractériser cette difficulté supplémentaire d'accessibilité.

Enfin, des distances ou même des allongements peuvent difficilement tenir compte des spécificités de l'organisation des centres de remise en service par rapport aux perturbations (Fig. 67). Il faut tenir compte de la position des perturbations les unes par rapport aux autres.

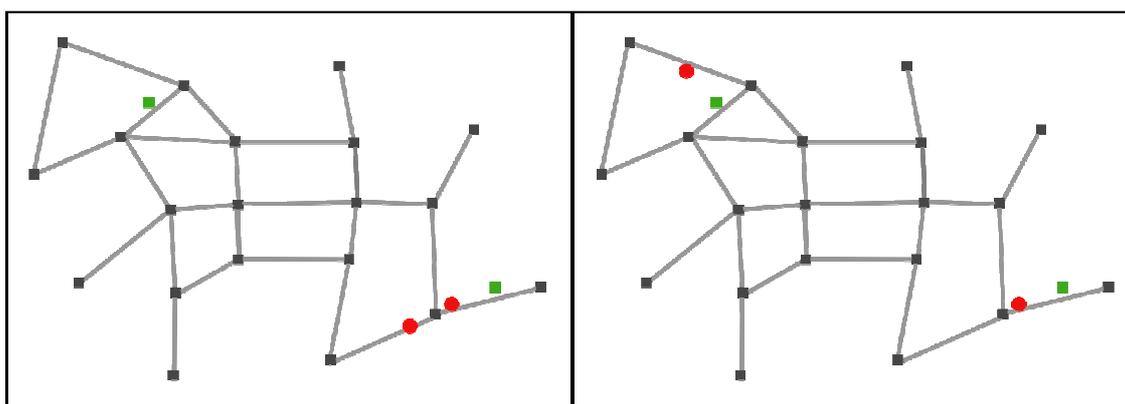


Figure 67. Une hiérarchisation des interventions nécessaire

Si l'on tenait compte uniquement des distances (mais aussi des allongements) on ne pourrait différencier ces deux cas. En effet, en termes de distance, il n'y a pas ou peu de différence entre les deux configurations. Par contre la répartition des centres par rapport aux perturbations n'est pas comparable. Une hiérarchisation des interventions est donc nécessaire.

Ainsi, dans l'hypothèse où un centre doit gérer une perturbation après l'autre, une hiérarchisation des perturbations se crée en fonction de leur distance aux centres. Nous proposons de tenir compte de cette hiérarchisation (Fig. 68).

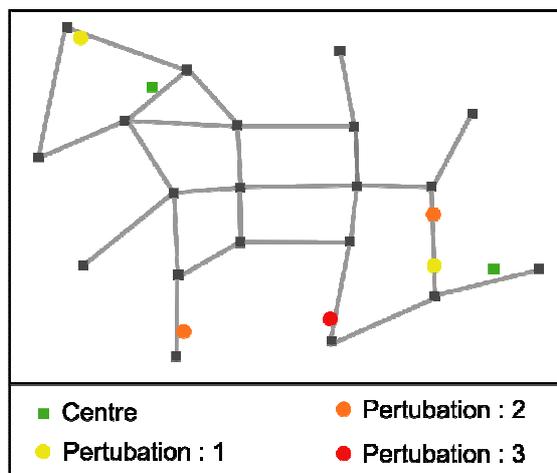


Figure 68. La hiérarchisation des interventions comme indicateur de capacité de récupération

En considérant chaque perturbation d'égale importance, nous opérons une hiérarchisation purement spatiale. Ainsi, la perturbation la plus proche d'une perturbation sera classée 1, la deuxième sera classée 2...

La seule analyse spatiale des capacités de récupération laissent alors entrevoir une réalité très complexe malgré des postulats de départ plutôt simple.

En tenant compte de ces trois indicateurs (la distance, l'allongement, la hiérarchisation), nous proposons l'indicateur ci-dessus :

$$\text{Indicateur} = \text{distance} \times \text{allongement} \times \text{hiérarchisation}$$

- distance entre la perturbation et le centre dont la hiérarchisation est la plus faible. Cette distance est calculée quand le réseau routier est perturbé ;
- l'allongement correspond à la différence entre la distance ci-dessus et la distance la plus courte au centre le plus proche quand le réseau est à l'état normal ;
- la hiérarchisation est établie pour chaque centre on peut établir un classement des perturbations les plus proches. La hiérarchisation correspond au classement minimum obtenu par une perturbation.

On obtient alors pour chaque perturbation une classification. Celle-ci peut être croisée avec la classification des zones redondantes pour obtenir une classification des zones résilientes du point de vue de leur réseau. Ainsi, les trois capacités se complètent pour assurer l'évaluation de la résilience urbaine. La capacité de résistance permet l'évaluation de la capacité de récupération, soulignant des perturbations problématiques d'un point de vue spatial. Ces résultats, que l'on peut agréger aux zones de redondance (Fig. 69), définiront des zones plus moins résilientes compte tenu de leur réseau.

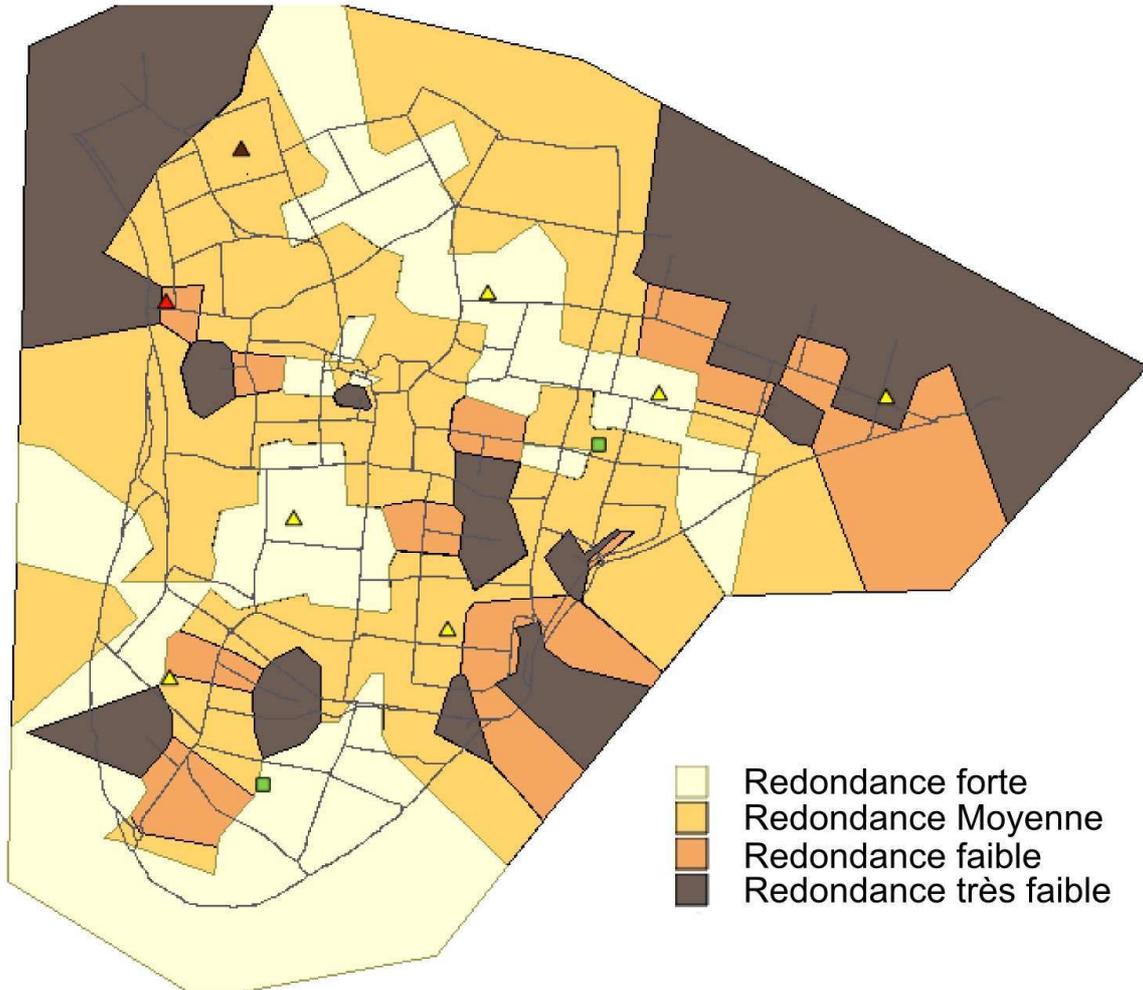


Figure 69. Superposition des zones de redondance et de l'indicateur de récupération

Les centres sont ici en vert, les perturbations sont représentées dans un dégradé de couleurs du rouge au jaune.

En synthèse, nous avons testé les méthodes provenant du géomarketing pour évaluer la capacité de récupération des réseaux techniques urbains. Les premiers résultats sont encourageants en termes de localisation de certaines ressources utiles à la remise en service des réseaux, et donc de la ville. Toutefois, des recherches plus approfondies doivent être menées pour obtenir d'autres résultats en utilisant par exemple d'autres méthodes d'analyse spatiales. La dernière année de thèse de Serge Lhomme permettra cet approfondissement.

5. Bilan et perspectives

Dans un premier temps, à l'aide des méthodes de la Sûreté de Fonctionnement, nous avons pu modéliser la capacité de résistance des systèmes techniques urbains. L'identification des défaillances possibles de chacun de ces systèmes (digues et réseaux) a pu être réalisée. Ensuite, les interactions entre réseaux ont été prises en compte pour modéliser non seulement l'effet d'une défaillance d'un réseau sur le réseau lui-même, mais aussi sur d'autres réseaux interconnectés. Un outil permettant d'exploiter au maximum les résultats de l'AMDE a été produit. Il permet l'automatisation de l'exploitation de l'exhaustivité de l'AMDE.

Nous avons souligné ensuite l'importance de la redondance des réseaux techniques pour la résilience urbaine, puis nous nous sommes concentrés sur la détermination et l'évaluation d'indicateurs permettant de quantifier cette redondance. Ainsi, la définition de la résilience, l'utilisation de celle-ci dans un cadre théorique clairement défini (mise en relation avec les concepts préexistants notamment) et la définition d'indicateurs pour son évaluation contribuent à justifier l'utilisation de la résilience en gestion des risques. En effet, cette conceptualisation permet la construction d'un socle théorique sur lequel s'appuyer afin de rendre ce concept opérationnel. Ainsi, les indicateurs développés, contribuent à caractériser la résilience des réseaux techniques et mettent en évidence des structures urbaines peu redondantes qui, dans un contexte de risques, pourront perturber la résilience d'une ville.

Enfin des premières pistes de recherche concernant la capacité de récupération des réseaux techniques urbains ont été déployées. Les recherches sont encore en cours par rapport à l'évaluation de cette capacité pour l'obtention de résultats plus précis.

Ces travaux constituent donc le socle d'un futur système d'information à référence spatiale permettant de caractériser différents indicateurs de résilience urbaine.

Toutefois, bien que l'apparition du concept de résilience en gestion des risques implique la création de nouveaux indicateurs, ainsi qu'une nouvelle méthodologie afin de déterminer ces indicateurs, ce concept ne constitue pas nécessairement un nouveau paradigme. En effet, ce concept est étudié ici dans la continuité de travaux concernant la vulnérabilité structurelle des réseaux de transport. Ainsi, les indicateurs développés sont à mi-chemin entre des indicateurs de résilience et des indicateurs de vulnérabilité, car les capacités d'absorption étudiées par le biais des indicateurs de redondance sont elles-mêmes à la frontière de ces deux concepts. Ainsi, les indicateurs développés peuvent compléter les recherches concernant la vulnérabilité structurelle des réseaux dans un contexte de risques.

Cette étape de recherche visait la production de connaissances pour l'augmentation de la résilience des systèmes techniques urbains. Cette étape constitue le premier volet de la stratégie définie en introduction pour l'amélioration de la résilience des villes aux inondations.

Cependant, au vu des développements méthodologiques et des résultats produits, le développement d'outil d'aide à la décision en termes de résilience urbaine devient fondamental. Ainsi, la seconde partie de ce mémoire sera consacrée aux outils d'aide à la décision pour la résilience urbaine. Ainsi, les systèmes d'information à référence spatiale, une fois opérationnels, devraient aboutir à accompagner des réflexions concernant l'aménagement urbain, en plaçant au centre de ces réflexions les questions liées à la place des systèmes techniques dans la ville.

Aussi, l'évaluation de la résilience des systèmes techniques urbains apporte des réponses intéressantes en termes de gestion du risque inondation en milieu urbain et de nombreux gestionnaires de digues et de réseaux d'une part, mais aussi des risques d'autre part sont sensibles à ces avancées scientifiques. En outre, des perspectives de développements apparaissent permettre des suites à cette recherche :

- les gestionnaires de réseaux doivent aujourd'hui prendre en compte la question des risques dans leurs démarches de gestion de leurs ouvrages. Evaluer la résilience de leur réseau, les effets de leurs actions de maintenance sur leur propre réseau, puis, les effets de ces actions sur les autres réseaux peut constituer une démarche productive en termes de management des risques et d'amélioration du fonctionnement urbain. Pour

cela, une thèse CIFRE avec le groupe EGIS a démarrée en Septembre 2010 afin de proposer la mise en place d'outils multi acteurs d'évaluation de la résilience ;

- enfin, nous voyons dans cette méthodologie d'évaluation de la résilience des réseaux une opportunité pour réfléchir à l'aménagement urbain résilient. Concevoir la ville durable passe nécessairement par la prise en compte des changements globaux et de leurs effets, transcrits ici en termes de risques inondation. Or, lors de la conception d'éco-quartiers, la question du risque inondation est peu prise en compte. Une thèse en cotutelle Université de Mons, Faculté d'Architecture d'un côté, et à l'EIVP de l'autre, va démarrer en Décembre 2011 pour faire de la résilience un critère important de l'aménagement urbain durable.

Partie 2

Conception de Systèmes d'Information à Référence Spatiale pour l'amélioration de la résilience urbaine face aux inondations

Cette partie est consacrée à la conception d'outils d'aide à la décision en matière de résilience urbaine vis-à-vis du risque inondation. Nous intégrons ici les méthodes développées dans la première partie : évaluation de la capacité de résistance des systèmes techniques urbains et évaluation des capacités d'absorption et de récupération des réseaux techniques urbains.

La conception de ces outils d'aide à la décision constitue l'aboutissement de nos recherches. L'exploitation des résultats méthodologiques fournis dans la première partie de ce mémoire est rendue possible par la conception de ces outils.

La dimension spatiale est fondamentale dans la production de nos outils : les phénomènes que nous analysons se matérialisent dans l'espace urbain. Les digues et les réseaux sont des ouvrages à fort linéaire : les positionner dans la ville, analyser leurs structures, leurs maillages... n'est possible qu'à l'aide de Systèmes d'Information à Référence Spatiale (SIRS).

Ainsi, les Sciences de l'Information Géographiques, comme les sciences liées à l'aide à la décision sont omniprésentes dans cette partie. Nous les utilisons en liens avec les sciences que nous avons utilisées dans la première partie de ce mémoire.

Nous analysons donc initialement la place des SIRS comme outils d'aide à la décision, notamment grâce, d'une part, à l'apport des méthodes multicritères, d'autre part à la mutualisation de l'information par le web. Enfin, nous proposons des outils capables de fournir une évaluation de la résilience urbaine pour ensuite produire de l'aide à la décision intégrée en termes de résilience urbaine, puisque ces outils analysent d'un côté la capacité de résistance des systèmes techniques urbains, de l'autre les capacités d'absorption et de récupération des réseaux techniques urbains.

Enfin, en s'appuyant sur les méthodes et outils d'évaluation de la résilience technico-fonctionnelle des systèmes urbains, nous proposons des résultats préliminaires de recherches en vue de la production d'outils d'aide à la gouvernance des services urbains en réseaux.

1. Le concept d'outil d'aide à la décision

Notre objectif en termes d'outils d'aide à la décision pour la résilience urbaine est double. Nous devons premièrement disposer d'outils capables d'intégrer des indicateurs d'aide à la décision : nous étudions donc les possibilités de couplage entre des systèmes d'information à référence spatiale et nos indicateurs de résilience. 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.

1.1. SIRS/SIG et intégration d'indicateurs de décision

Les SIG ont reçu des définitions très variées, allant de l'approche technologique jusqu'à des définitions ayant une perspective plus organisationnelle et institutionnelle visant l'aide à la décision. Ce panel de définitions est à l'origine de certaines confusions. En effet, sous le vocable de SIG, nous ne savons pas si le terme entend désigner simplement le logiciel spécifique ou le système en tant que structure organisationnelle, ou encore l'ensemble des disciplines de la géomatique (Laaribi, 2000).

Afin de clarifier cette situation, nous allons situer les SIG par rapport à la géomatique et aux SIRS.

La géomatique (terme formé du préfixe géo et du mot informatique) peut être définie comme la discipline ayant pour objet la gestion des données géographiques et qui fait appel aux sciences et aux technologies reliées à leur acquisition, leur stockage, leur traitement et leur diffusion (d'après l'Office Québécois de la Langue Française).

Il s'agit donc d'une approche scientifique moderne qui met à profit l'intégration de plusieurs moyens d'acquisitions (topométriques, géodésiques, photogrammétriques, de télédétection...) et de gestion des données sur le territoire. Ce néologisme est né à Québec : il est aujourd'hui utilisé dans de nombreux pays tels que la Suisse, l'Australie, les Etats-Unis... (Laaribi, 2000).

Pour sa part, le SIRS est, d'après le Ministère des Affaires Municipales du Québec, une organisation structurée de ressources humaines, d'équipements, de procédures et de données qui se coordonnent pour réaliser l'acquisition et la gestion de données et fournir l'information sur le territoire.

Cependant, le SIRS moderne gagnerait, en terme d'efficacité, à se doter d'outils informatiques puissants pour gérer un volume important, et sans cesse croissant, de données sur le territoire et pour faire face à la complexité de leur traitement. Ainsi, le terme SIG désigne le système informatique utilisé dans un SIRS pour effectuer ces tâches (Laaribi, 2000).

Pour notre recherche, nous préférons le terme de SIRS. Il intègre la dimension logicielle et organisationnelle, c'est-à-dire les liens avec les acteurs utilisateurs du logiciel.

Concernant le terme SIG, nous proposons de retenir la définition de (Fischer *et al.*, 1993) : « un SIG comme un système de gestion de base de données conçu pour saisir, stocker, manipuler, analyser et afficher des données à référence spatiale en vue de résoudre des problèmes complexes de gestion et de planification ».

Un tel système inclut les composantes relatives (Fig. 70) :

- à l'acquisition des données d'entrée ;
- au stockage, à la récupération et à la gestion de bases de données ;
- à la manipulation et à l'analyse des données ;

- à l'affichage et à la génération de produits ;
- à une interface pour l'utilisateur.

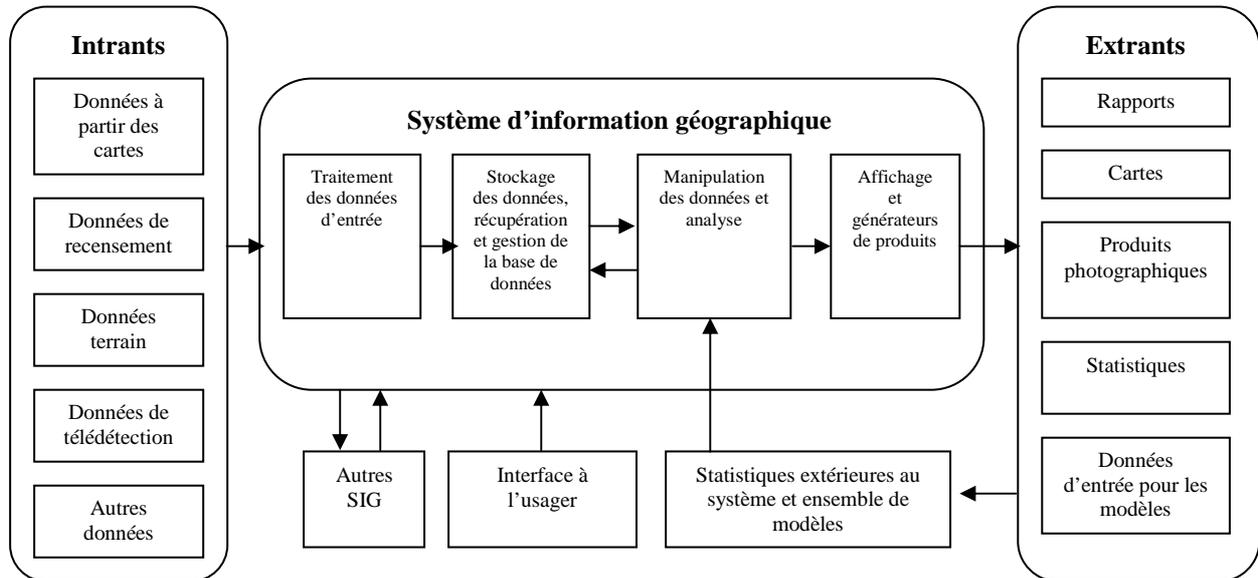


Figure 70. Composantes d'un SIG (Fischer *et al.*, 1993)

Tous les auteurs s'accordent sur la puissance des SIG et donc sur leur excellence en tant qu'outils de gestion des données à référence spatiale. Mais la caractéristique fondamentale qui distingue les SIG des logiciels graphiques, notamment de cartographie numérique, est leur capacité d'effectuer des analyses spatiales (Laaribi, 2000).

L'analyse spatiale peut être définie comme raisonnement qui permet de déduire les caractéristiques d'un phénomène en faisant intervenir des données géographiques (d'après l'Office Québécois de la Langue Française). L'analyse spatiale exploite l'information topologique et l'information métrique. Les SIG offrent des fonctions d'analyse spatiale utilisant des opérateurs dont au moins un est spatial.

Toutefois, malgré le caractère fondamental de l'analyse spatiale dans les SIG, plusieurs auteurs soulignent les limites des SIG dans ce domaine (Laaribi, 2000).

Ces limites concernent en premier lieu le manque de fonctionnalités analytiques. En effet, les fonctionnalités incorporées au sein des SIG du marché répondent, généralement, aux besoins immédiats du marché, relativement peu sophistiqués, et qui sont beaucoup plus axés sur la gestion des données que sur leur analyse (Burrough, 1990, Fischer *et al.*, 1993).

Ensuite, on note des difficultés d'intégration de l'analyse spatiale aux SIG : un modèle d'analyse spatiale tend à mettre l'accent sur les traitements de phénomènes de la réalité spatiale qu'illustrent les fonctions d'analyse effectuées sur des mesures et par des calculs, alors qu'un SIG se préoccupe plus de la structure du système, c'est à dire des composantes ou des éléments qui représentent cette réalité. De plus, la discrétisation spatiale est explicite dans les SIG, alors qu'elle est implicite dans la plupart des formes d'analyse spatiale : plusieurs fonctions d'analyse spatiale sont conçues pour des phénomènes continus dans l'espace. Ces fonctions ne parviennent donc pas à traiter ces phénomènes à cause des incertitudes introduites par le processus de discrétisation des SIG (Goodchild, 1992).

Ces limites sont problématiques dans certains cas. Par exemple, les praticiens des SIG ont besoin d'une meilleure compréhension des besoins des décideurs en rapport avec leur environnement. Un besoin crucial des décideurs consiste à disposer de capacités analytiques

de prédiction, de manière à ce qu'ils puissent commencer à explorer les effets de leurs décisions. Un SIG du marché ne permet pas cette analyse. De plus, les SIG manquent de capacités de modélisation et de simulation, ce qui les empêche de remplir leur rôle d'outil d'aide à la décision (Clarke, 1990, Dumolard, 1992).

Ce constat met en évidence le fait que, malgré leur énorme potentiel, les SIG ne contribuent que fort peu à la solution des problèmes spécifiques des décideurs (Laaribi, 2000).

Il semble donc qu'une simple intégration de nouvelles fonctionnalités dans les SIG ne comblerait pas les lacunes des SIG en termes d'aide à la décision. Ces fonctionnalités analytiques supplémentaires sont bien sûr nécessaires mais pas suffisantes pour tenir compte des préférences des décideurs devant raisonner à partir de nombreux critères ou indicateurs (Laaribi, 2000).

Une solution appropriée pour combler les lacunes des SIG dans le domaine de l'aide à la décision consisterait à développer une théorie relative aux données à référence spatiale ainsi qu'une théorie de l'analyse spatiale, qui permettraient d'appréhender les problèmes décisionnels (Aangeenbrug, 1991). Mais cette solution est difficile à envisager car elle s'inscrit sur le long terme, pourtant elle est indispensable pour la reconnaissance de la Science de l'Information Spatiale (Laaribi, 2000).

Ainsi, il serait intéressant de proposer une solution intermédiaire. Cette solution consiste à intégrer les SIG et les méthodes d'analyse ayant pour finalité l'aide à la décision à référence spatiale (Laaribi, 2000).

En synthèse, les SIG représentent le cœur logiciel d'un SIRS. Un SIRS rassemble autour de son SIG les organisations et les acteurs du système d'information. La capacité des SIRS actuelle est limitée par les fonctionnalités des outils du marché. Pour produire une analyse spatiale plus poussée et donner au SIRS des fonctionnalités d'aide à la décision, il est nécessaire de les coupler avec des critères ou indicateurs de décision.

Nous présenterons donc le couplage d'un SIRS existant pour les digues avec une modélisation multicritère de la performance (capacité de résistance) des digues.

1.2. Des SIRS en partage sur le web

L'utilisation des SIG pour la gestion des risques s'est répandue chez l'ensemble des acteurs du risque pour deux raisons principales. Premièrement, les SIG se sont démocratisés, car ils sont désormais technologiquement et économiquement accessibles à la plupart des acteurs du risque. Deuxièmement, le risque est reconnu 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).

Nos recherches se focalisent plus particulièrement sur le développement des outils web SIG. En tant qu'outil de télécommunication, internet 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. 71).

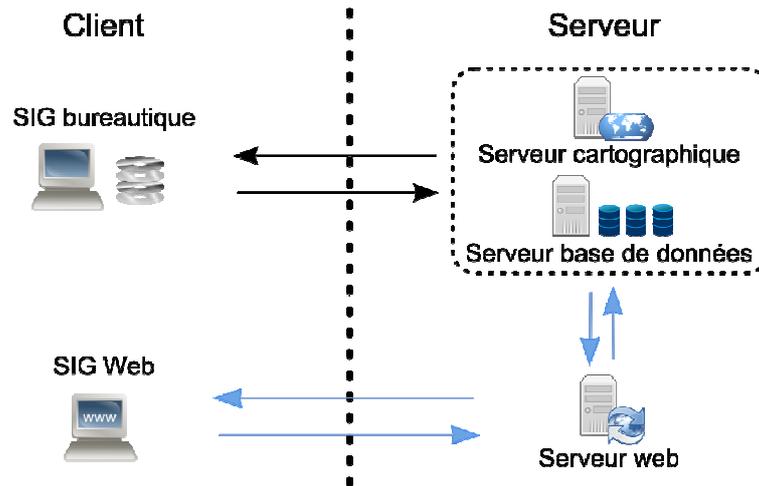


Figure 71. Architecture client serveur dans le cadre du développement d'un Web SIG ou d'un Internet SIG

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 nous apparaît comme une réponse possible à notre objectif scientifique.

2. Un SIRS pour l'amélioration de la résistance des digues

2.1. Objectifs scientifiques et principes

Nous allons produire un SIRS pour l'amélioration de la capacité de résistance des digues de protection contre les inondations. Ce SIRS vise l'aide à la décision pour les gestionnaires de digues. Il devra permettre aux gestionnaires de prendre des décisions fondées sur la capacité de résistance (niveau de performance) des digues par rapport à l'ensemble des mécanismes de rupture de ces ouvrages. Le SIRS combine un SIG existant, le SIRS Digues, et les méthodes multicritères d'évaluation de la performance des digues. Nous présentons d'abord le SIRS Digues avec ses fonctionnalités initiales, puis nous présentons le SIRS dans sa version enrichie du modèle multicritère d'évaluation de la capacité de résistance des digues.

Pour développer le SIRS dédié aux digues, nous nous appuyons sur les possibilités de couplage entre les SIRS et des critères de décision, ou des modèles multicritères.

Ce travail a été engagé dans un premier temps dans le cadre de ma thèse de doctorat (Serre, 2005), puis poursuivi par la thèse de Marc Vuillet, surtout en ce qui concerne la modélisation multicritère de la capacité de résistance des digues. Deux stages de Master ont contribué à cette recherche (Berthaud, 2004) et (Prévot, 2005). Ces stages ont porté sur le développement du SIRS Digues avec l'intégration des nouvelles fonctionnalités d'aide à la décision.

2.2. Un SIRS Dignes initial pour la gestion des données

Le SIRS Dignes a été développé et mis à la disposition des gestionnaires de digues (Maurel *et al.*, 2004). Le SIRS Dignes permet notamment de consulter plus aisément et plus rapidement les données relatives aux digues par une recherche thématique et/ou cartographique, des analyses croisées des données (structure interne et externe, géométrie, altimétrie, travaux, désordres, réseaux de voirie, travaux, ...), de compléter l'expertise de terrain, d'aider au diagnostic, de garder la mémoire des événements passés, de centraliser et de conserver de façon pérenne le patrimoine de données, et de faciliter la production de cartes multi-thématiques et de rapports à différentes échelles géographiques (toute ou partie de cours d'eau, commune, syndicat, ...).

La digue est vue par les gestionnaires comme un ouvrage de génie civil. Cette vue, commune à tous les gestionnaires, sert de base au modèle de données générique du SIRS Dignes. La base de données se caractérise par un contenu informationnel et un niveau de précision compatibles avec l'échelle du 1:10000. Transversalement, la digue a été modélisée par une analyse structurelle : l'ensemble des composants identifiés permet de représenter tous les types de digues. Longitudinalement, la technique SIG dite de « segmentation dynamique » a été retenue car elle est bien adaptée à la gestion d'information pour des ouvrages linéaires. Un système de repérage linéaire est appliqué sur la digue, elle-même géoréférencée dans un système de projection cartographique. Chaque information est ensuite localisée par un PR de début et un PR de fin (ou un seul PR pour une information ponctuelle). Ces attributs PR sont alors utilisés pour découper « à la volée » le tracé de la digue en tronçons homogènes pour un attribut donné.

Le modèle conceptuel de données (Fig. 72) est organisé en quatre groupes de classes (appelés « paquetages » en langage UML⁶). La version actuelle du modèle de données compte environ cent cinquante classes d'objets.

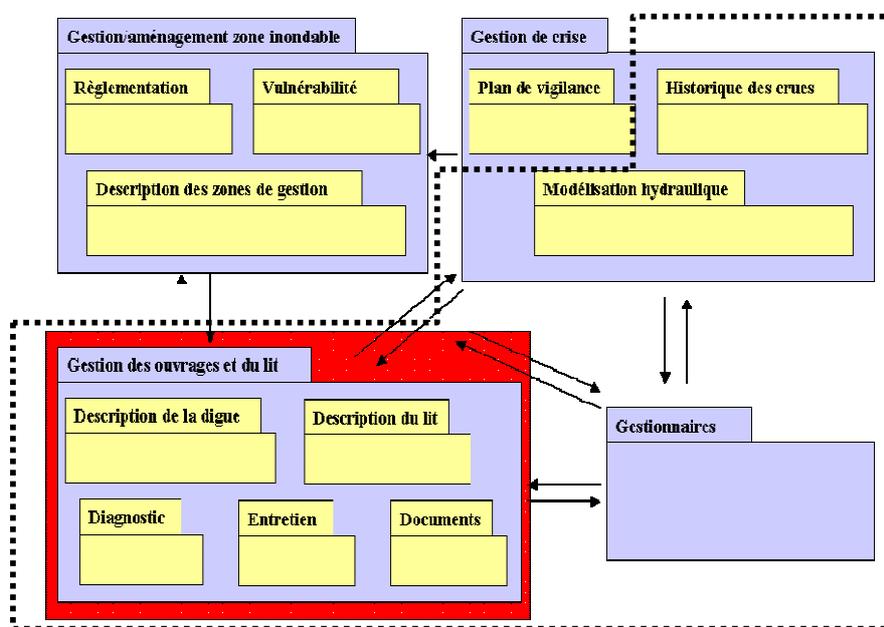


Figure 72. Le modèle conceptuel de données du SIRS (Maurel *et al.*, 2004)

⁶ UML : Unified Modeling Language

La partie du modèle de données couverte par la première version de l'application SIG est délimitée par les lignes en pointillés. Elle inclut deux paquetages principaux, « gestion des ouvrages et du lit » et « gestionnaires » et deux sous-paquetages, « modélisation hydraulique » et « historique des crues ». Cela correspond à la partie générique commune à tous les systèmes endigués français. Les paquetages « gestion/aménagement zone inondable » et « gestion de crise » pourront être développés dans des versions ultérieures, selon les attentes des gestionnaires (Moins, 2005).

Le développement de l'application repose sur les logiciels ArcGIS (© ESRI) et Access (© Microsoft). Un exemple de l'interface utilisateur est présenté figure 73, où le gestionnaire de digues a la possibilité d'exploiter les données du SIRS Digues. Il peut, par exemple, être intéressé par la cartographie des désordres qu'il vient de saisir dans la base de données. Pour cela, il lui suffit de choisir le thème à représenter dans l'application cartographique du SIRS Digues. Grâce à cette interface, le gestionnaire s'aperçoit qu'entre le PR 453 et 454 se trouvent deux désordres relatifs à la digue en rive droite de l'Isère :

- un désordre ponctuel symbolisé par un triangle rouge signifiant « danger » ;
- un désordre linéaire symbolisé par un trait rouge en crête de digue.

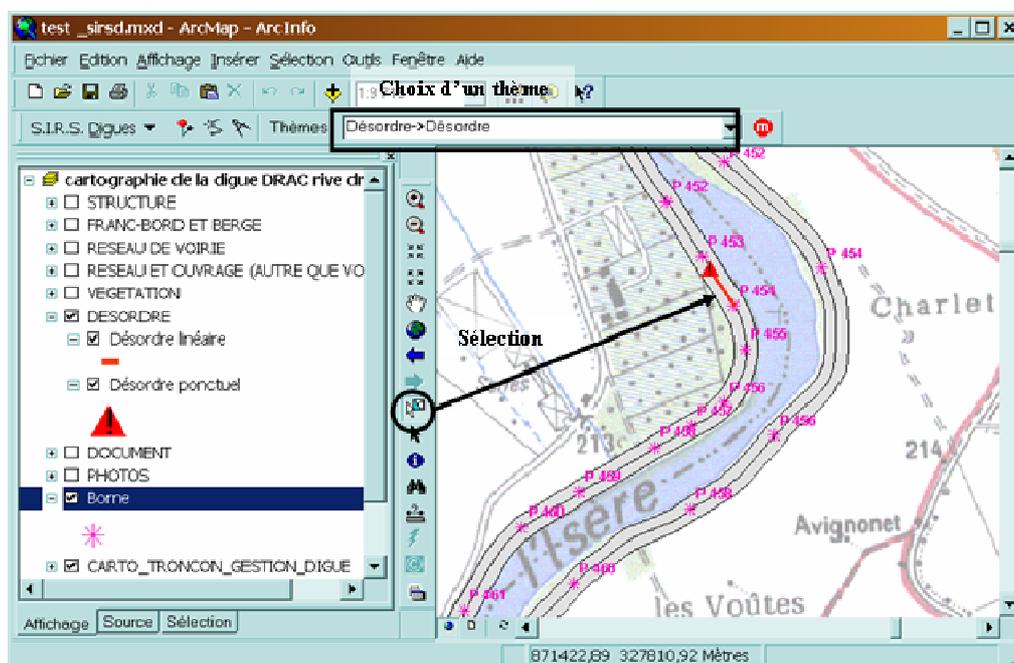


Figure 73. Interface utilisateur du SIRS Digues

Le SIRS Digues intègre des fonctionnalités spécifiques, comme la gestion de plusieurs systèmes de repérage linéaire sur un même tronçon de digue, la mise à jour de la base de données liée à une évolution de la géométrie du tronçon de digue, la synchronisation entre des bases autonomes (par exemple celles des gardes digues) et la base principale, la conversion entre systèmes de repérage cartographiques et linéaires, la projection automatique sur la digue de relevés GPS approximatifs, la gestion de la temporalité pour certaines données (exemple des désordres), l'utilisation d'outils et de bibliothèques de symboles pour optimiser la représentation cartographique multivariée sur des linéaires (paramétrage de décalages graphiques latéraux lors de l'affichage), les fonctions avancées d'édition de rapports et l'utilisation de modèles de mise en page cartographique.

2.3. Un SIRS Digues pour l'évaluation de la capacité de résistance

Dans la première partie de ce mémoire nous avons proposé une méthode pour évaluer la capacité de résistance des digues. Le modèle fonctionnel nous permet d'identifier les composants des digues à l'origine de leurs défaillances, ainsi que les causes et conséquences de ces défaillances. Il résulte de cette analyse, l'identification de nombreux critères à prendre en considération lors pour l'évaluation de la capacité de résistance des digues. Nous proposons, à l'instar de ce qui existe sur d'autres ouvrages de génie civil, d'employer une méthode multicritère pour aboutir à une évaluation de la capacité de résistance des digues pour chaque type de digues et pour chacun des mécanismes de rupture existants. C'est ce modèle multicritère que le SIRS Digues devra intégrer pour devenir un outil spatial d'aide à la décision.

Nous présentons notre modélisation multicritère, puis son intégration dans le SIRS Digues initial.

En génie civil, les méthodes multicritères sont souvent utilisées pour la gestion des ouvrages à grands linéaires : les réseaux d'eau potables (Le Gauffre *et al.*, 2004), les réseaux d'assainissement (Diab, 2000). L'objectif de ces méthodes est l'évaluation des conditions de fonctionnement du système étudié. Notre problématique est analogue : à partir des mécanismes de rupture modélisés précédemment, nous souhaitons développer une méthode pour, à partir des processus fonctionnels identifiés en première partie de ce mémoire, évaluer la capacité de résistance des digues dans un SIRS.

La démarche mise en œuvre repose sur l'utilisation de méthodes d'analyse multicritère (Roy *et al.*, 1993) : la capacité de résistance d'une digue dépend de plusieurs critères que nous cherchons à évaluer à partir de combinaisons d'indicateurs et qu'il nous faudra ensuite agréger pour obtenir la capacité de résistance d'un tronçon de digue. Une fois les tronçons de digues évalués, ils sont affectés dans des classes prédéfinies, reflétant l'état de l'ouvrage (excellent, bon, passable...). Les critères retenus pour l'analyse multicritère correspondent aux phénomènes apparaissant dans les scénarios, ces critères (ou phénomènes) étant eux-mêmes renseignés par les indicateurs (Fig. 74).

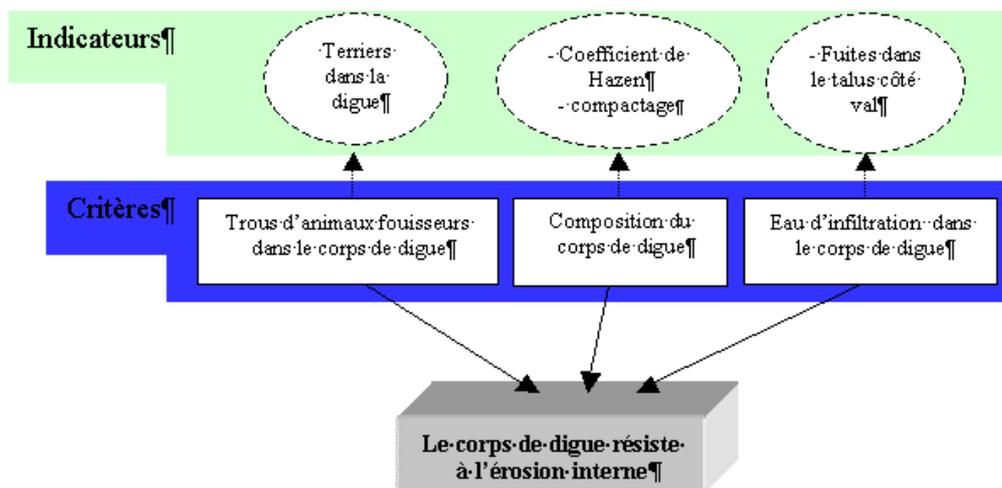


Figure 74. Exemple de « critères » et « indicateurs » intervenant dans l'analyse de la performance d'une fonction

Il existe trois grandes catégories de méthodes multicritère (Vincke, 1989) : l'utilité multiattribut, les méthodes de surclassement et les méthodes interactives. Le choix a été fait d'utiliser une méthode interactive où alternent des étapes de calculs et des étapes de dialogue

avec le décideur. La méthode retenue est adaptée aux contextes d'agrégation complexe : c'est l'affectation (le tri) par l'établissement de règles (Azibi, 2003). Un processus d'agrégation par règles consiste en une base de règles de type « si... alors... » et proches du langage naturel pour exprimer des principes d'agrégation. Cette méthode apparaît bien adaptée à notre problématique de décision : les règles permettent d'intégrer les préférences des experts du domaine et les synergies et compensations entre critères peuvent facilement être prises en compte.

A titre d'exemple, nous appliquons la méthode d'agrégation multicritère à base de règles au mécanisme d'érosion interne des digues à étanchéité amont. Afin de mieux montrer la contribution de chaque critère à ce mécanisme, le scénario est simplifié et représenté sous forme d'un arbre de défaillance (Fig. 75).

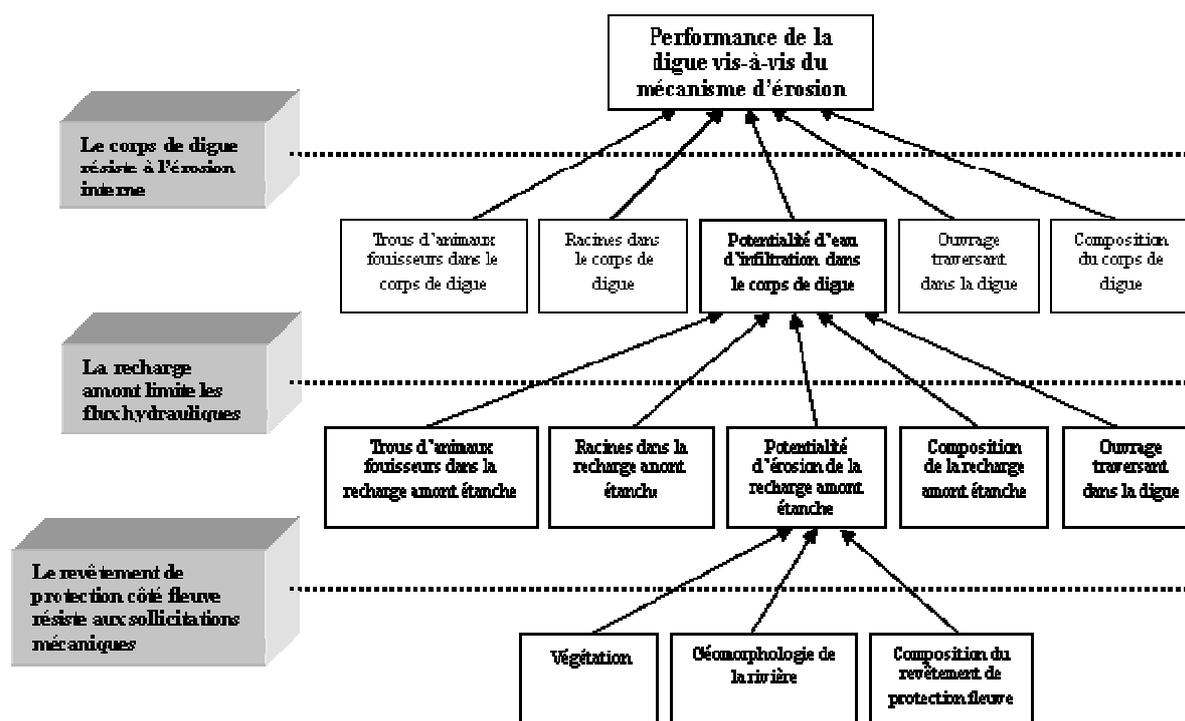


Figure 75. Arbre de défaillance issu du scénario d'érosion interne sur les digues à étanchéité amont

Un modèle pour représenter les mécanismes de rupture des digues est disponible et une méthode multicritère pour évaluer leur performance a été choisie. Les règles d'affectation et d'agrégation des indicateurs et des critères doivent être renseignées. Pour cela, un groupe d'experts du domaine des digues a été constitué : son rôle est de fixer l'ensemble des règles permettant de rendre la méthode opérationnelle. Les séances de travail du groupe d'experts ont été menées essentiellement sur la base d'interviews structurées : des schémas tels que présentés sur la figure 75 ont servi de guide lors des discussions.

Tout d'abord, une échelle des scores applicable aux indicateurs et critères est proposée. Une échelle discrète de scores comprise entre de 0 à 10 est adoptée : 0 correspond à la situation idéale et 10 à la situation la plus critique (Fig. 76). Cette échelle unique pour toutes les mesures permet d'introduire, dès la mesure, une hiérarchie dans les indicateurs et les critères.

Ensuite, les experts constituent les règles générales applicables à l'ensemble des indicateurs : les notes 0 et 10 sont fixées ainsi que les jalons intermédiaires. Pour chacun d'entre eux, les règles d'évaluation sont fixées, faisant correspondre aux différents indicateurs des scores

dépendant des observations relevées sur les digues. Enfin, le groupe d'experts propose une règle d'agrégation des indicateurs pour obtenir une évaluation de chaque critère.

A titre d'exemple, le cas de l'évaluation du critère « racines dans la recharge amont étanche » est présenté : ce critère intervient dans la séquence de défaillance correspondant à la perte de performance de la fonction d'étanchéité de la recharge amont (Figure 75 - scénario d'érosion interne). La règle générale proposée par les experts indique que la végétation examinée pour ce critère est celle située sur la digue (talus côté fleuve et crête) et à ses abords (sur une emprise de 2 mètres de part et d'autre de la recharge amont). Ce critère est évalué à partir de trois sous-critères : « grands arbres », « petits arbres » et « buissons », chacun de ces sous-critères étant eux-mêmes évalué à partir de trois indicateurs : « végétation en contact avec le dispositif d'étanchéité », « végétation hors dispositif d'étanchéité » et « pas de végétation ».

score	qualification	code couleur	Critère "Racines dans la recharge amont étanche"												
			sous-critère	indicateur	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	excellent														
1	bon		grands arbres	contact étanchéité									X	X	X
2	bon			hors étanchéité			X	X	X	X					
3	passable			pas végétation	X										
4	passable														
5	médiocre														
6	médiocre		petits arbres	contact étanchéité								X	X	X	
7	mauvais			hors étanchéité			X	X							
8	mauvais			pas végétation	X										
9	mauvais														
10	inacceptable		buissons	contact étanchéité			X	X							
				hors étanchéité		X	X								
				pas végétation	X										

Figure 76. Grilles des scores et d'analyse du critère « Racines dans la recharge amont étanche »

La condition d'excellence (score 0) est obtenue si aucun arbre ou buisson ne se situe sur la digue ou à proximité (sur une emprise de 2 mètres de la digue). La condition inacceptable (score 10) est atteinte dès qu'un seul grand arbre mort est observé au contact de la recharge amont étanche ou à proximité (à moins de 2 mètres de la recharge). Les règles d'affectation de scores sont précisées (Fig. 76). Puis, l'agrégation des trois sous-critères pour l'évaluation du critère est obtenue en adoptant le score le plus défavorable (opérateur MAX). Cette démarche est menée pour l'ensemble des critères intervenant dans le scénario d'érosion interne (13 critères au total).

En terme de résultats, les principaux mécanismes de rupture des digues ont été modélisés, soit 17 scénarios pour 3 types de digues représentant l'essentiel du parc d'ouvrages en France, et, pour chaque scénario, les critères (environ 150 critères au total) permettant l'évaluation de la performance des digues ont été déterminés.

A ce stade, nous disposons de règles pour l'évaluation des indicateurs et critères intervenant dans les scénarios de rupture des digues. Il reste à proposer des règles d'agrégation entre les critères pour l'évaluation de la capacité de résistance de la digue vis-à-vis du mécanisme étudié. Les critères sont agrégés à chaque séquence fonctionnelle des arbres de défaillance, les résultats étant ensuite reportés successivement au niveau supérieur de l'arbre jusqu'à l'évaluation de la capacité de résistance de la fonction principale correspondant à l'événement

final au sommet de l'arbre. De façon analogue, la méthode adoptée est l'agrégation multicritère à base de règles et ces règles ont été fixées par le groupe d'experts.

Ce travail d'agrégation des critères est réalisé sur l'exemple du mécanisme d'érosion interne sur les digues à étanchéité amont. La première séquence du scénario, correspondant à la performance de la fonction de résistance du revêtement amont, fait intervenir trois critères : « végétation », « géomorphologie de la rivière » et « composition du revêtement côté fleuve ». L'opérateur MAX a été retenu pour l'obtention d'un critère à partir de plusieurs indicateurs, ce qui se justifie pleinement par l'introduction d'une hiérarchie dès la mesure. Le score de l'indicateur « érosion de la recharge amont » apparaissant dans la deuxième séquence de défaillance est ainsi obtenu. De façon analogue, cette même règle est utilisée pour évaluer le critère « potentialité d'eau d'infiltration dans le corps de digue » de la deuxième séquence de défaillance.

Pour évaluer la capacité de résistance de la digue vis-à-vis du mécanisme d'érosion interne correspondant à l'événement final au sommet de l'arbre de défaillance, deux séries de critères sont agrégées :

- le critère « potentialité d'eau d'infiltration dans le corps de digues » obtenu ci-dessus ;
- l'agrégation par l'opérateur MAX des quatre critères « trous d'animaux fouisseurs dans le corps de digues », « racines dans le corps de digue », « ouvrage traversant dans la digue » et « composition du corps de digue ».

Cette agrégation est proposée par la mise en place d'une table de vérité (Fig. 77), établie par le groupe d'experts.

eau d'infiltration	MAX(Trou, Racine, OT, Comp)										
	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
10	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
9	9	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
8	8	8	8	7	6	5	4	3	2	1	0
7	7	7	7	7	6	5	4	3	2	1	0
6	7	7	7	6	6	5	4	3	2	1	0
5	6	6	6	6	5	4	4	3	2	1	0
4	6	6	6	5	4	4	3	3	2	1	0
3	6	5	5	4	4	4	3	3	2	1	0
2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	0
1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	0
0	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	0

Figure 77. Table de vérité experte (Serre *et al.*, 2009)

Pour l'application de ces règles, un module de calcul de la capacité de résistance des digues a été développé (Fig. 78). Il intègre les règles d'agrégation définies par les experts et leurs combinaisons (opérateur MAX, tables de vérité).

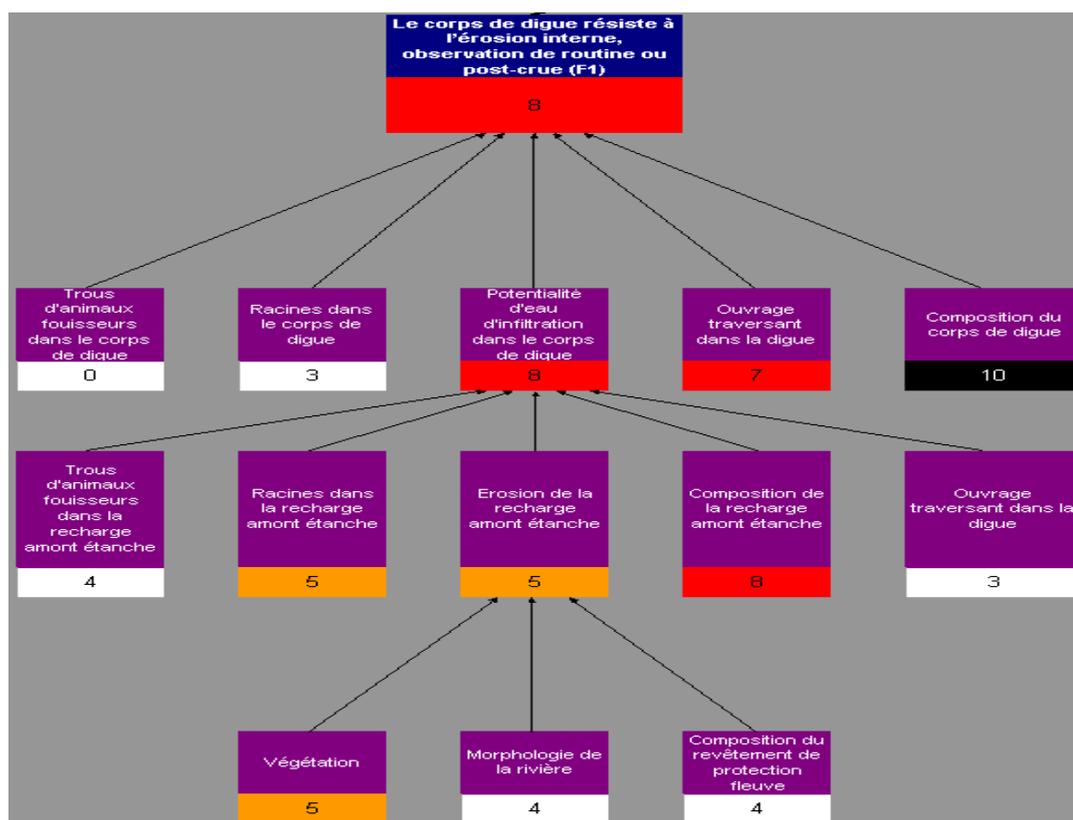


Figure 78. Module de calcul de la capacité de résistance des digues intégrant les règles d'agrégation multicritère (Serre, 2005)

Notre objectif ici est d'intégrer dans le SIRS Digues le modèle multicritère d'évaluation de la capacité de résistance des digues. Ainsi, les gestionnaires de digues pourront évaluer plus facilement la capacité de résistance de leur parc d'ouvrages et localiser les tronçons de digues les plus fragiles. Ainsi, des priorités d'intervention pourront être réalisées en faveur de la résilience urbaine aux inondations.

Un premier développement en Visual Basic a permis de commencer à coupler le SIRS Digues et le modèle multicritère (Berthaud, 2004). Les valeurs des critères et sous-critères du modèle sont lues dans la base du SIRS Digues à l'aide de requêtes SQL⁷. Ces valeurs décrivent des tronçons ponctuels et/ou des tronçons linéaires de digue dont la position est exprimée dans un système de repérage linéaire par défaut. L'application informatique calcule alors les scores pour chaque sous-critère puis critère : on obtient à ce stade du calcul une première segmentation de la digue pour chacun des critères.

Prenons ici, à titre d'exemple, le cas du critère « racines dans la recharge amont étanche » (Fig. 79). Sur cette figure est représentée l'information « végétation » relevée par le garde digue. Divers types d'arbres, correspondant à des scores différents, s'intersectent sur ce tronçon de digue. L'opération consiste à fusionner ces scores pour n'obtenir qu'un seul objet linéaire par critère, ce qui aboutit à générer des tronçons de digues selon le score du critère « racines dans la recharge amont étanche ». On obtient ainsi, à partir d'une situation réelle observée sur le terrain, des objets linéaires découpés selon le score du critère.

⁷ SQL : System Query Language

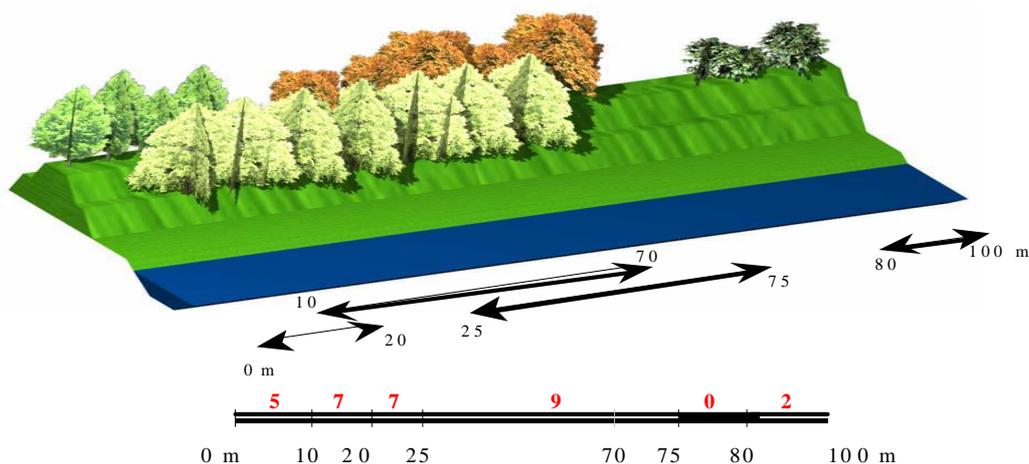


Figure 79. Segmentation de la digue pour le critère « végétation » (Serre *et al.*, 2006)

Une fois calculés les scores des 3 sous-critères, ils sont agrégés dans des nouveaux sous-tronçons homogènes représentatifs du score du critère végétation. Cette opération de segmentation automatique multicritère est réalisée avec une fonction spécifique d'ArcInfo appelée « superposition d'événements d'itinéraires ». Le score du critère est alors calculé en appliquant ici l'opérateur MAX.

La même procédure est appliquée à l'ensemble des critères. La digue est ainsi segmentée selon le score de chaque critère. Pour le cas de la rupture de digue par érosion interne, 13 « objets digues » différents sont obtenus, tels que présentés sur la figure 79, segmentés selon leurs scores.

Pour calculer la performance de la digue, les 13 critères sont agrégés (Fig. 80). Cette opération permet d'obtenir un découpage de la digue en tronçons représentatifs du niveau de performance calculé, pour un mécanisme de rupture donné.

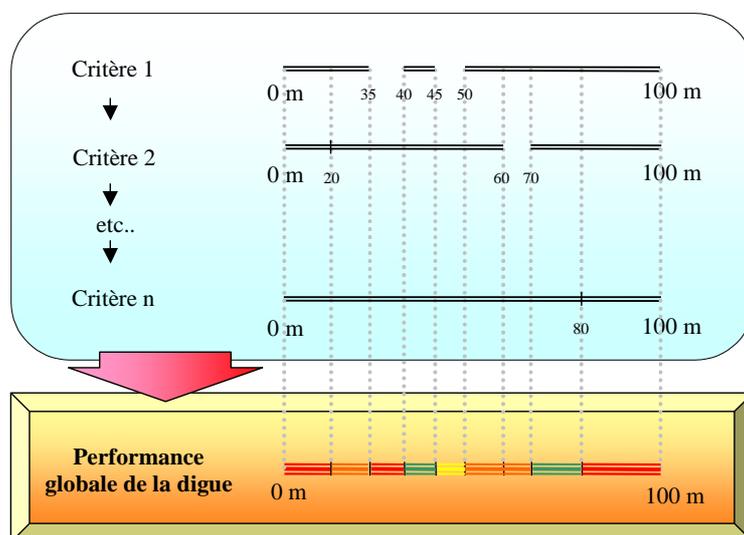


Figure 80. Evaluation de la performance globale de la digue (Berthaud, 2004)

La capacité de résistance des digues peut alors être visualisée dans le SIRS Digues (Fig. 81).

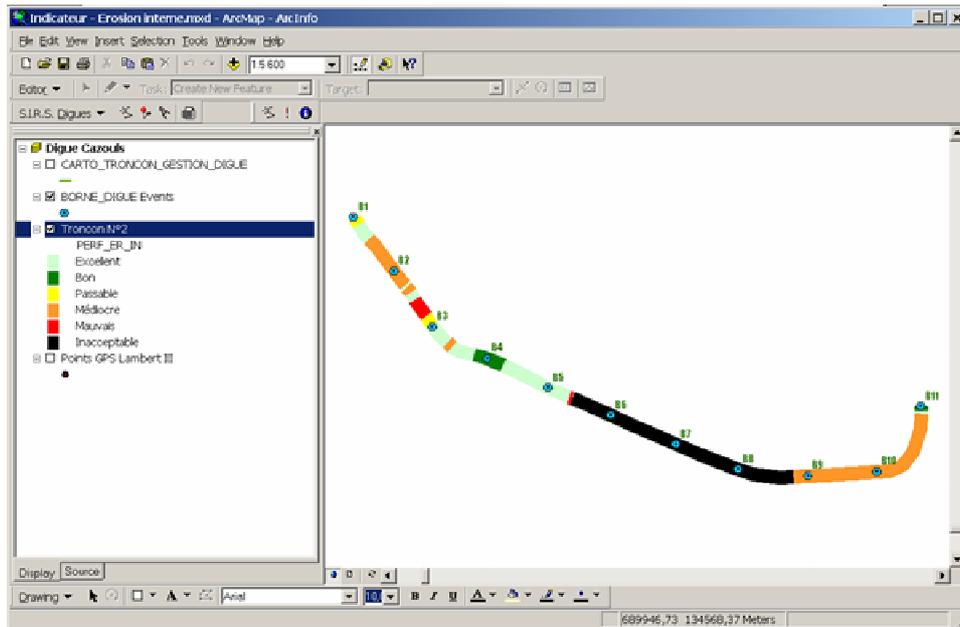


Figure 81. Visualisation de la capacité de résistance des digues dans le SIRS Digues (Serre *et al.*, 2008)

En synthèse, notre recherche a consisté à produire une méthode d'analyse de la performance des digues destinée à être utilisée dans un SIRS.

Dans une première étape (partie 1), une analyse fonctionnelle des digues et des méthodes de la Sécurité de Fonctionnement : l'analyse des modes de défaillance et de leurs effets et une représentation par des Arbres de Défaillance ont été mises en œuvre. Ces méthodes ont permis de modéliser la structure des digues, de connaître les fonctions de conception des digues et de leurs composants, et de définir leurs modes de défaillance, leurs causes et leurs effets. A partir du recueil et de la formalisation de la connaissance experte, ont été modélisés les principaux mécanismes de rupture des digues sous forme de scénarios. Pour chaque mécanisme, nous obtenons ainsi les différents indicateurs et critères qui interviennent dans l'évaluation de la capacité de résistance des digues. En termes de résultats, les principaux mécanismes de rupture des digues (17 scénarios pour 3 types de digues représentant l'essentiel du parc d'ouvrages en France) ont été modélisés et, pour chaque scénario, les critères (environ 150 critères au total) permettant l'évaluation de la capacité de résistance des digues ont été déterminés.

L'étape suivante a consisté à agréger les indicateurs et critères pour évaluer la capacité de résistance des digues. La méthode utilisée est une méthode multicritère d'affectation à base de règles, alternant des étapes de discussions avec un groupe d'experts et des étapes de calcul. Cette démarche a permis d'établir les règles d'évaluation et d'agrégation des critères pour chaque scénario de rupture, permettant d'évaluer ainsi la performance d'une digue.

Nous avons ensuite intégré au SIRS Digues existant conçu par le Cemagref les règles multicritères d'évaluation de la performance des digues. Un premier prototype est maintenant disponible. Il permet de cartographier les digues selon leur capacité de résistance. Les gestionnaires peuvent ainsi déterminer un premier niveau de priorité pour leurs interventions en faveur de la ville résiliente aux inondations.

3. Un Web SIRS pour l'amélioration de la résilience des réseaux

3.1. Objectifs scientifiques et principes

Compte-tenu des innovations technologiques dans le domaine des Web SIG, nous envisageons d'élaborer 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. L'objectif est de présenter l'outil développé, d'en justifier le choix et de présenter les premières applications.

Le choix d'un Web SIRS plutôt que d'un SIG classique s'explique ici par le cadre dans lequel ces recherches s'effectuent. En effet, ces recherches sont notamment le fruit de réflexions menées dans le cadre du projet FloodResilienCity. Ce projet européen regroupe huit villes. Une solution web est alors apparue nécessaire pour ce projet, car cette solution permet la mise en place d'une plateforme commune à chaque partenaire. Ainsi, pour ce projet, qui met notamment en avant une collaboration transnationale, la mutualisation possible des données permise par une application web semble pertinente. En outre, comme tous les acteurs de ce projet ne disposent pas tous des mêmes outils, une application indépendante des SIG propriétaires existants semblent être la meilleure option (outil libres).

Ce Web SIRS est en cours de développement. Il vise l'évaluation de la résilience des réseaux techniques urbains selon les trois capacités présentées dans la première partie de ce mémoire (capacités de résistance, d'absorption et de récupération). Il s'agit d'un Web SIRS qui permettra aux acteurs de la gestion des risques de prendre des décisions fondées sur les niveaux de résilience des réseaux, et de pouvoir partager ces informations via le web pour une meilleure gouvernance des risques.

Pour la conception de ce Web SIRS, la thèse de doctorat de Serge Lhomme constitue l'essentiel de l'avancement de cette recherche. Aussi, la thèse de Marie Toubin consacrée au développement d'outils de gouvernance des risques contribue à cette recherche. Enfin, deux stages de Master ont appuyé cette recherche (Rakotonirina, 2010), (Gomez, 2011).

3.2. Développement technique du Web SIRS pour l'évaluation des capacités de résistance, d'absorption et de récupération des réseaux techniques urbains

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. 82). 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.

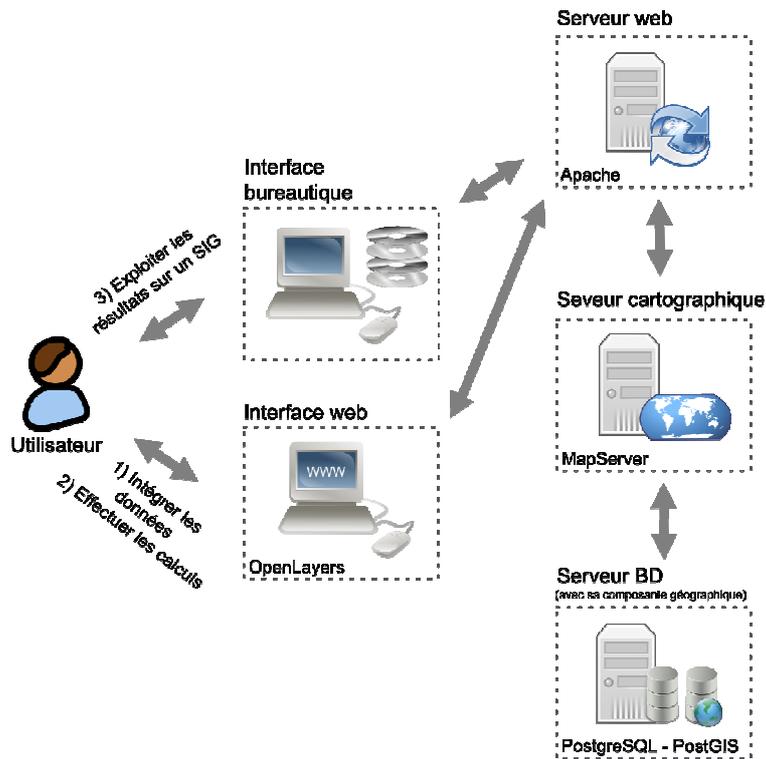


Figure 82. L'intérêt du service WMS/WFS

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.

Un premier prototype est en cours d'élaboration. Il permettra 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. 83). Cette carte constitue l'élément central de ce prototype.

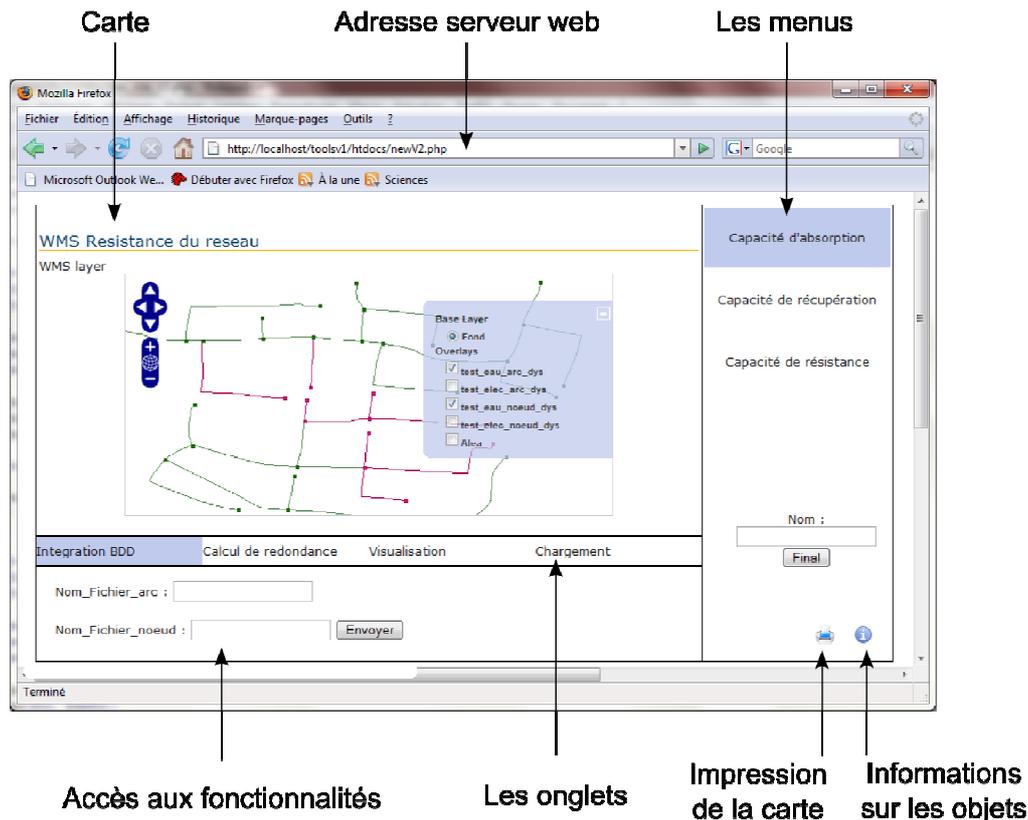


Figure 83. Description du Web SIRS

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. 83).

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. 84).

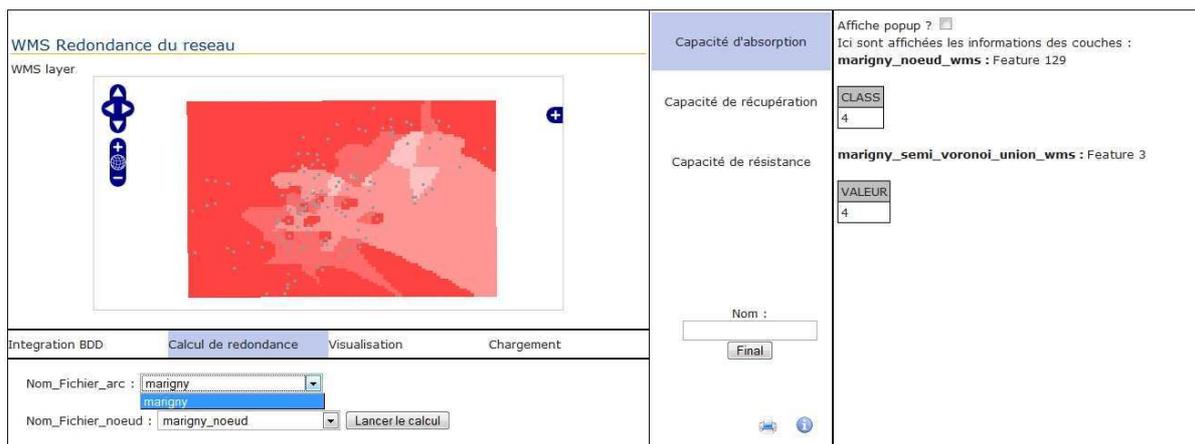


Figure 84. Interface montrant l'onglet calcul de redondance où l'on sélectionne le réseau que l'on souhaite évaluer et le panneau d'informations

Une fois le calcul réalisé, l'affichage d'une cartographie des résultats (requête GetMap) est alors proposée (Fig. 84). 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. 84). L'impression des éléments affichés sur la carte est également permise par l'outil (Fig. 85). 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.

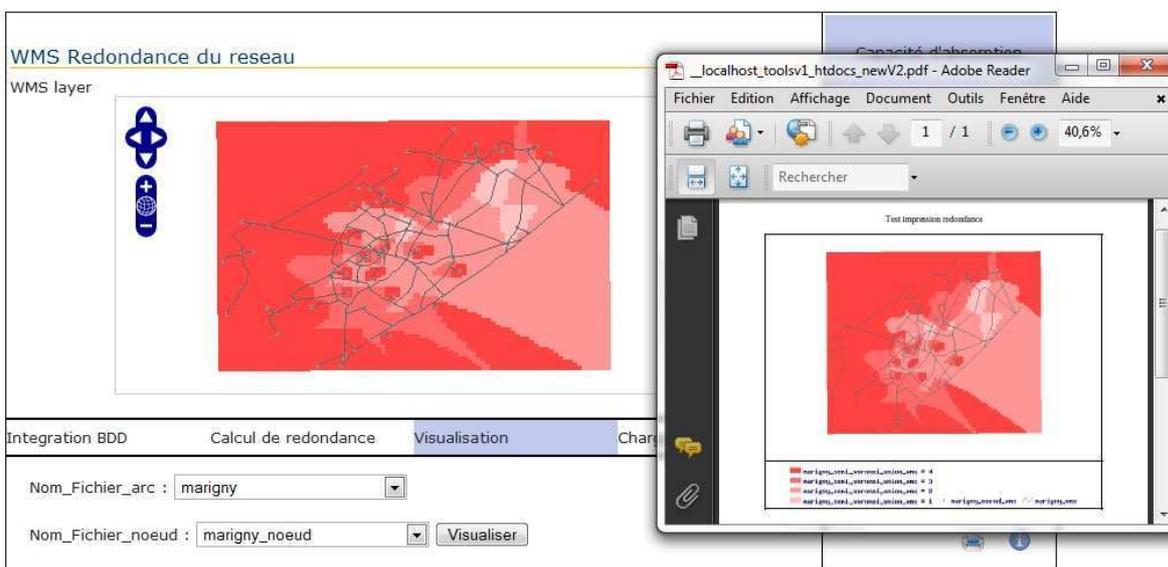


Figure 85. Interface montrant sa fonctionnalité d'impression cartographique

En synthèse, un Web SIRS encore en cours de développement permettra à terme l'évaluation de la résilience des réseaux techniques urbains selon les trois capacités. L'outil existe d'un point de vue technique, mais n'est pas encore partagé à l'heure actuelle sur le web. La mise en ligne de l'outil constituera l'étape suivante, en 2012.

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. Maintenant, une recherche en cours via la thèse de Marie Toubin

visé, à la fois en s'appuyant sur ce Web SIRS et en développant des outils additionnels, l'évaluation de la résilience aux inondations d'un point de vue organisationnel. Nous présentons maintenant quelques résultats préliminaires de cette recherche qui permettra d'enrichir les fonctionnalités de ce Web SIRS.

3.3. Vers un Web SIRS participatif pour la gouvernance des services urbains en réseaux

3.3.1. Contexte et objectifs

Pour parvenir à mener une véritable politique d'amélioration de la résilience à l'échelle d'une ville, l'ensemble des acteurs de la ville doivent être impliqués et surtout adhérer à la démarche. C'est pourquoi, tout comme dans d'autres domaines auparavant, notamment la gestion des ressources communes, l'aménagement du territoire ou la préservation des écosystèmes, les approches collaboratives s'imposent.

En effet, la résilience peut être appréhendée comme une acceptation plus large de la gestion de l'environnement dans la mesure où la préservation des ressources, l'usage du sol ou les modes de construction sont différents aspects de l'amélioration de la résilience. Alors la mise en œuvre d'une démarche d'amélioration de la résilience concerne bien l'ensemble des parties prenantes qui se sont rassemblées déjà depuis quelques décennies pour défendre leur qualité de vie et leur environnement (Olsson *et al.*, 2004). Devant la multiplicité de formes et d'objectifs des outils développés pour répondre à ce besoin de participation, il convient d'identifier d'abord les objectifs à remplir dans l'amélioration de la résilience afin de positionner l'approche. Ces objectifs et la manière de les atteindre fixera ensuite le champ des acteurs à impliquer et amorcera donc les grandes orientations en matière d'outils répondant aux besoins de l'exercice.

Le recours aux démarches participatives résulte bien souvent d'une crainte du conflit. Dans ce cas, sous couvert de participation, les acteurs et le public sont impliqués dans l'élaboration d'un projet mais ne bénéficient pas réellement d'un pouvoir de décision, ni même de suggestion. Le terrain est alors préparé pour la prise de décision. Nous écarterons rapidement cette utilisation puisque l'amélioration de la résilience nécessite une véritable collaboration entre les acteurs pour augmenter la connaissance et arriver à l'identification commune des objectifs à atteindre. En effet, les démarches participatives ont bien souvent pour origine un manque de connaissances, auquel cas, la mise à contribution de nombreux participants génère le savoir utile à la suite du projet. Une fois comblée cette lacune en connaissance, plusieurs finalités se dégagent des approches collaboratives. Il peut s'agir de la définition d'un problème, ou bien directement de la résolution d'un problème déjà identifié (Ramsey, 2009). Ces deux objectifs ne sont pas nécessairement incompatibles, mais la manière de les remplir diffère largement et la plupart des approches développées récemment restent floues quant au véritable but à atteindre. Ainsi, la recherche de problème doit se faire de manière ouverte et souple alors que l'identification des solutions implique un outil déjà orienté. Dans tous les cas, l'objectif final doit être clair pour les participants.

Les réseaux sont identifiés comme le système nerveux de la ville dans lesquels la moindre défaillance entraîne des conséquences importantes sur l'ensemble du système ville. Une ville ne peut donc être résiliente sans des réseaux résilients. Dans ce contexte, l'objectif est d'identifier les points critiques qui entraînent un impact majeur sur le réseau, les populations ou les activités lors de leur perturbation. C'est donc bien la recherche de problème qui nous intéresse ici. L'identification des points noirs doit se faire sans a priori afin de ne pas tomber

dans les logiques d'infrastructures critiques qui aboutissent à des lieux communs (le réseau électrique est agressif vis-à-vis des autres réseaux), voire même à des croyances erronées (les événements sont en réalité largement isolés et rarement du fait de l'interdépendance entre infrastructures (Roe, 2010)). En effet, l'intérêt même de l'approche résilience est qu'elle vise à évaluer précisément et dans un contexte donné les points critiques afin d'apporter une réponse adaptée. S'il est admis que la criticité des infrastructures varie suivant l'échelle d'analyse, le temps et la perception de l'acteur (Bouchon, 2006), l'acceptation aujourd'hui de ce concept et la confusion qui règne toutefois dans sa définition (Galland, 2010) nécessite une autre approche.

Une approche canadienne répond en partie aux enjeux identifiés pour notre recherche, mais présente également quelques défauts à solutionner. La recherche menée par Benoit Robert au Centre Risque et Performance de Montréal se focalise sur la résilience organisationnelle et vise à augmenter la résilience des douze secteurs essentiels identifiés par le gouvernement canadien (Robert *et al.*, 2009b). La méthode est fondée sur une analyse entrant-sortant des ressources utilisées et produites par chaque organisation. Les interdépendances entre organisations sont ainsi mises en avant et caractérisées par un degré de criticité ainsi qu'une notion temporelle indiquant le délai avant lequel la défaillance de la ressource devient critique pour le fonctionnement de l'organisation (Pairet, 2009). La méthodologie comporte un volet de mise en pratique avec les acteurs des secteurs essentiels canadiens. Rassemblés par secteur, ils doivent réaliser le portrait sectoriel de leur organisation suivant la méthode du CRP et ainsi parvenir à identifier leur dépendances vis-à-vis des autres secteurs (Pinel, 2009). L'analyse reste toutefois sectorielle et gagnerait probablement en légitimité et en efficacité si le diagnostic était mené par l'ensemble des acteurs.

3.3.2. Vers une méthodologie d'aide à la de gouvernance des réseaux techniques urbains

Etant clarifiés les objectifs de l'amélioration de la résilience dans ces travaux, il convient de recadrer l'intérêt des approches participatives afin d'y positionner un futur outil. On peut en effet distinguer la participation et la collaboration. D'après (Joliveau, 2004), dans un processus participatif, la décision est « *ouverte à des individus et des groupes qui ne sont pas en charge d'un pouvoir de décision formalisé* », alors que la collaboration est la « *[mobilisation] non plus [d']un seul mais plusieurs individus ou groupes, intégrés sur un pied d'égalité* ». Le haut niveau d'expertise requis par l'approche proposée ici semble donc exclure les populations et les représentants d'intérêts publics ou privés qui ne détiennent pas, dans leur ensemble, les connaissances suffisantes. Le champ de notre recherche couvrira donc bien la collaboration et non la participation. Les acteurs à impliquer seront donc « ceux qui savent » : experts, techniciens, spécialistes, scientifiques et « ceux qui décident » : responsables, gestionnaires, élus, politiques (Joliveau, 2004). Pour améliorer la résilience des réseaux, et donc de la ville, la collaboration entre les experts et les décideurs permet d'apporter une connaissance fine des phénomènes et des impacts afin de dessiner des solutions avec tous les acteurs impliqués. La question du passage du niveau de l'expertise à celui du décideur est donc centrale ici.

De la même manière, l'échange entre les différents acteurs cités ci-dessus constitue un réel enjeu pour la réussite de l'approche proposée. Les différents gestionnaires de réseaux, les services techniques de la ville, les décideurs et les scientifiques échangent en effet rarement sur leur connaissance, et encore moins leurs problèmes. trois niveaux dans le degré de participation des acteurs peuvent alors être distingués (Jankowski *et al.*, 2001) :

- La communication est le degré le plus faible dans lequel les acteurs se parlent mais n'ont pas le souci d'harmoniser leurs actions. Si ce degré est déjà indispensable et souvent délicat à atteindre entre les acteurs de la ville, il n'est pas suffisant dans l'amélioration de la résilience car au-delà de l'échange d'information, c'est la réflexion commune qui doit être favorisée ;
- Le second degré est la coordination qui permet aux acteurs de travailler sur des tâches différentes et de partager les résultats, sans pour autant partager une même vision du travail et des méthodes. La coordination peut limiter des mesures contradictoires ou optimiser un processus mais il manque une notion d'intérêt commun, qui apparaît dans le troisième degré ;
- La coopération : lorsque les acteurs acceptent de coordonner les résultats de leurs efforts à propos de certaines tâches bien délimitées, la mutualisation des connaissances et des moyens est améliorée, mais le but final n'est pas nécessairement partagé par tous. Finalement, c'est le plus haut degré de participation, la collaboration, dans laquelle « les acteurs acceptent de travailler à des réalisations communes sur la base d'objectifs qui dépassent ces réalisations » qui favorise l'acceptation commune des points critiques par un travail conjoint d'évaluation.

Il est important de permettre à chacun d'appréhender ses propres défaillances, et celles des autres acteurs afin que le niveau de connaissance soit le même pour tous et que les problèmes soient pris en charge d'une manière globale et non plus chacun suivant ses propres objectifs. L'objectif commun doit être la résilience du système ville, qu'il convient donc de caractériser.

L'analyse des points faibles du système ville ne peut pas se faire de manière isolée et sans une solide assise scientifique car alors, les résultats peuvent être influencés par des croyances erronées, ou tout au moins incomplètes. Ainsi, l'expertise des analyses scientifiques caractérisant le fonctionnement des réseaux, ainsi que la connaissance de terrain des techniciens et des gestionnaires doivent se compléter pour améliorer le savoir. Comme l'a théorisé Callon (Callon *et al.*, 2006), la controverse socio-technique permet de favoriser cet apprentissage croisé et amener à l'identification de problèmes. Toutefois, s'il préconise la construction des groupes d'acteurs par la recherche de la controverse, le champ se limitera pour nous aux acteurs cités ci-dessus : les experts et les décideurs. L'expertise doit donc bien se positionner comme un outil de réflexion et non pas comme une démarche écrasante de ceux qui savent vers ceux qui décident et n'ont généralement pas le même degré de connaissance. L'analyse scientifique et surtout les outils permettant de la représenter et de la traduire sont plus efficaces s'ils sont élaborés en collaboration avec tous les acteurs qui s'approprient alors la démarche et adhèrent plus facilement aux résultats produits (Joliveau, 2004).

La question de l'utilisation du Web SIRS pour évaluer les points critiques des réseaux techniques est donc délicate puisque l'acceptation par les parties prenantes peut en être compromise. Les utilisateurs ne doivent pas se sentir dépassés ou manipulés par les experts maîtrisant le modèle, mais ils doivent pouvoir y contribuer, le critiquer et l'améliorer pour mieux en saisir les tenants et aboutissants. Il faudra donc résoudre ici la question de la place de l'outil expert dans la démarche d'amélioration de la résilience.

Les méthodes d'analyse servant de base à une réflexion multi-acteurs ont déjà été testées dans le domaine de la gestion de la ressource en eau par le projet NAPTIC (Petit, 2002). La modélisation du fonctionnement de la nappe phréatique de Beauce devait permettre l'identification des problèmes concernant sa gestion par le travail collaboratif des agriculteurs irrigants, des services de l'Etat et des protecteurs de la nature. Cependant, si l'utilisation du

jeu de rôle pour amener chacun à comprendre les objectifs des autres parties prenantes, semble efficace et génératrice d'apprentissage mutuel, la simulation support a limité son efficacité en suscitant des critiques sur les hypothèses choisies et les paramètres implémentés. Le modèle utilisé doit donc être au préalable compris et approuvé par tous, si ce n'est élaboré conjointement par les participants. La démarche en est alors conséquemment rallongée et compliquée mais son efficacité devrait en être améliorée.

La base experte est constituée par l'outil d'analyse des points critiques des réseaux. Les nombreux autres outils passés en revue dans la littérature et la classification qu'il peut en être fait suivant la distinction participation/collaboration, et suivant la finalité poursuivie de recherche ou résolution de problème permettent d'identifier plusieurs formes de travail collaboratif qui pourront favoriser la meilleure appropriation des points noirs révélés par l'analyse scientifique. La collaboration peut avoir lieu en face à face ou à distance, elle peut être en temps réel ou asynchrone (Rinner, 2006). Ainsi, pour répondre aux trois situations différentes découlant de cette distinction, de nombreux outils peuvent être utilisés. Dans le cas de la recherche des points critiques des systèmes techniques de la ville, la collaboration en face à face et en temps réel semble préférable dans un premier temps pour dynamiser le processus et ne pas gêner les échanges qui doivent être nombreux pour combler les lacunes en communication accumulées par une longue tradition de sectorisation. Ainsi, les ateliers entre experts, acteurs de la ville et gestionnaires de réseaux seront la forme privilégiée de travail. Ensuite, les supports au travail d'identification des problèmes peuvent être de nature très différente : de la simple photo au modèle de simulation, voire de réalité virtuelle. Les outils d'analyse peuvent aussi être complexes : SIG, analyse multicritère, systèmes multi-agents, voire une combinaison de plusieurs outils comme les cartes d'argumentation (Rinner, 2006) ou les systèmes d'aide à la décision spatialisés (Spatial Decision Support Systems) (Jankowski *et al.*, 1997).

Le caractère spatial des analyses scientifiques effectuées sur les réseaux techniques et la nécessaire localisation des mesures à prendre amène naturellement la réflexion vers les SIRS. Un outil d'argumentation et de confrontation des connaissances semble approprié pour garantir un fort degré de controverse et donc une exploration plus profonde de la situation afin d'en distinguer les problèmes. C'est pourquoi les jeux de rôle d'une part et les cartes d'argumentation d'autre part pourraient répondre à cet objectif tout en instaurant une autre manière de collaborer. Le jeu de rôle pourrait être utilisé pour échanger les rôles des parties prenantes et les amener à prendre des décisions suivant les objectifs de leur nouveau rôle. Tout en gardant en tête leurs véritables préoccupations de gestionnaire ou d'agent de la collectivité, ils doivent ainsi se mettre à la place d'un responsable d'une organisation habituellement perçue comme concurrente ou antagoniste.

D'une autre manière, le recours aux cartes d'argumentation paraît intéressant dans un deuxième temps. Elles sont généralement utilisées pour permettre aux citoyens d'exprimer des besoins, des critiques, des avis à propos d'une problématique donnée et de les lier à une représentation géographique du territoire concerné (Kessler, 2004). On pourrait les utiliser dans la recherche pour permettre à chacun de renseigner et surtout de localiser ses points faibles et ses attentes, puis d'en discuter en construisant une argumentation basée sur la représentation géographique. L'articulation avec la première phase d'apprentissage partagé doit être précisée, mais une autre forme de collaboration, à distance et de manière asynchrone, peut être favorisée par ce type d'outil.

En synthèse, sur le principe des approches collaboratives utilisées pour la gestion des ressources ou l'aménagement du territoire, une approche collaborative pour l'amélioration de la résilience permet de répondre aux enjeux de la problématique. Le manque de démarche globale et d'adhésion des acteurs au concept et aux solutions à mettre en œuvre est ainsi comblé par un travail conjoint d'augmentation de la connaissance et de partage d'un diagnostic commun des points faibles de la ville. Le premier enjeu est alors l'acceptation des méthodes d'évaluation de la résilience avec notamment une bonne compréhension de la méthode scientifique proposée dans ce mémoire. Une meilleure appropriation de l'outil peut être favorisée par des jeux de rôles utilisant le modèle expert. Ainsi, la démarche permet à la fois la manipulation de l'outil et l'échange de rôles pour améliorer la compréhension des objectifs et contraintes de chaque partie prenante. Cette première étape devrait donc se dérouler lors d'ateliers rassemblant les scientifiques maîtrisant les méthodes d'analyse de la résilience des réseaux, des agents des services techniques de la ville et des gestionnaires des réseaux. Pour accroître encore la connaissance, pour préparer la mise en œuvre de solution répondant aux problèmes identifiés précédemment, ou pour compléter la démarche par des outils collaboratifs à distance et asynchrones, on pourra envisager l'utilisation des cartes d'argumentation. Chaque acteur peut y localiser des informations et des commentaires accessibles par tous les autres membres. Ils peuvent alors les compléter, répondre aux commentaires et construire ainsi un discours argumenté sur les points noirs, les interdépendances (Fig. 86) et les éventuelles mesures envisagées.

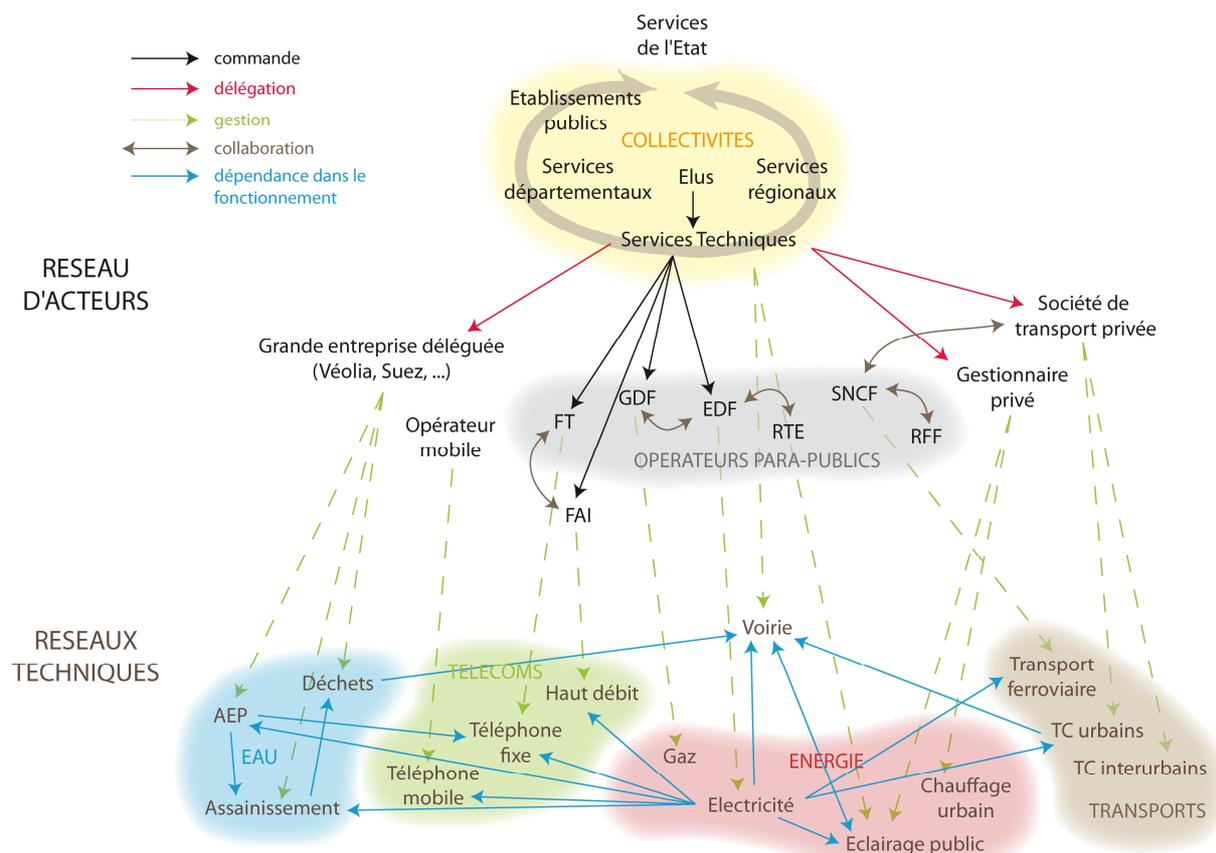


Figure 86. Cartographie de l'interdépendance des acteurs et des réseaux techniques urbains (Toubin *et al.*, 2011)

3.3.3. Les premiers outils de sensibilisation des acteurs à la gouvernance des réseaux techniques urbains

Après avoir positionné nos pistes de recherche au sein des nombreuses formes de participation et de collaboration, les objectifs propres à l'amélioration de la résilience urbaine ont situé les futurs outils complémentaires au Web SIRS existant. Il s'agira ici de faire collaborer des experts et des décideurs afin de favoriser une prise de conscience des enjeux liés à l'amélioration de la résilience et les amener ensuite à mener une véritable politique conjointe d'amélioration du système urbain.

L'objectif de l'analyse est donc l'identification des points noirs de ces systèmes techniques, c'est-à-dire les points critiques où la perturbation est importante, amplifiée ou propagée. Le Web SIRS a été développé et permet d'étudier avec les gestionnaires le comportement de leur réseau suivant des scénarios de perturbation. Toutefois, les concepts méthodologiques utilisés pour analyser les réseaux sont complexes et a priori peu compréhensibles pour les opérationnels qui ont une connaissance souvent plus empirique de leur réseau. C'est pourquoi l'utilisation de cet outil doit se faire avec précaution et pédagogie pour en assurer l'acceptation par les utilisateurs. L'idéal aurait été de le développer avec les gestionnaires mais le temps mobilisable des gestionnaires est limité. Cette analyse se fonde également sur la topologie des réseaux, les équipements présents et les besoins à assurer et nécessite donc une connaissance fine du système. Cet autre point sensible de l'approche requiert un partage des données entre gestionnaires afin de quantifier et localiser précisément les interdépendances. Alors, la réticence des gestionnaires à fournir ces informations, pour des raisons de concurrence, de sécurité ou même de méconnaissance peut remettre en question la faisabilité de l'analyse.

C'est pourquoi on propose finalement ici une première approche de sensibilisation à l'amélioration de la résilience qui palliera les difficultés précédentes et préparera la mobilisation des acteurs à la méthode détaillée permise par le Web SIRS.

La réticence des gestionnaires à partager des données détaillant le fonctionnement de leur système doit être prise en compte dans la première approche. Ils craignent en effet de voir ces données entre de mauvaises mains, permettant alors des actions malveillantes aux conséquences néfastes, ou ils ne souhaitent pas communiquer sur les défaillances de leur réseau, qui pourraient pointer du doigt un défaut de compétence, de moyen ou de gestion. Il s'agit ainsi de faire prendre conscience aux gestionnaires de l'intérêt qu'ils auront à partager ces informations, de manière sécurisée, en démontrant les liens d'interdépendances entre les réseaux et les conséquences d'une perturbation sur le système global. On propose donc une approche qualitative dans laquelle le système est considéré comme une « boîte noire » que le gestionnaire n'a pas à expliciter et dont les composants ne sont pas géolocalisés (Fig. 87). On ne décrit donc que le système par une approche de type intrant-extrant (Pairet, 2009) qui identifie ainsi les ressources utilisées et les ressources produites celui-ci, et donc utilisées par d'autres systèmes.



Figure 87. Description intrant-extrant du système

La première étape de l'analyse consiste donc en un auto-diagnostic du système par le gestionnaire qui doit identifier les ressources dont il a besoin pour faire fonctionner son système et les ressources qu'il produit ensuite. La grille à renseigner par le gestionnaire est pré-remplie avec les ressources types utilisées par ce genre de système (Pinel, 2009) mais la liste peut être complétée par l'utilisateur. On distingue les ressources « internes » comme le personnel, les biens, les ressources financières et les infrastructures internes et les ressources externes comme l'eau, l'électricité, les infrastructures externes... Cette distinction permet au gestionnaire de visualiser rapidement les ressources internes sur lesquelles il pourra agir a priori plus facilement. Des listes déroulantes permettent de caractériser qualitativement l'importance de la ressource pour le fonctionnement du système. Le but est d'amener le gestionnaire à passer en revue l'ensemble de ses besoins et d'en apprécier l'importance pour la production de son système pour faire émerger des liens de dépendances qu'il pourrait méconnaître ou négliger. Pour cela, on l'amène à analyser divers aspects liés à l'approvisionnement de la ressource, son utilisation à l'intérieur du système ou les conséquences de sa défaillance sur le fonctionnement du système, afin de synthétiser l'importance de la ressource dans un indicateur qualitatif de criticité. La ressource peut ainsi être indispensable au fonctionnement du système, importante mais non indispensable, peu importante ou enfin négligeable.

La mise en commun de ces portraits sectoriels met ensuite en avant les liens existants entre les systèmes par le biais des ressources produites par l'un et utilisées par l'autre. Une représentation graphique montre bien la complexité de ces liens d'interdépendances et fait ressortir les systèmes centraux (qui fournissent une ressource à de nombreux autres systèmes) ou alors dépendants (qui nécessitent de nombreuses ressources pour fonctionner). Les grilles d'auto-diagnostic amènent à identifier des ressources utiles très variées (de l'énergie au personnel, en passant par des besoins matériels ou financiers) mais pour des raisons de lisibilité, la représentation graphique se limitera aux grands systèmes fournissant les ressources principales : électricité, gaz, eau potable, eaux usées, déchets, personnel, télécoms,... On représente ainsi (Fig. 88) les liens entre les systèmes en utilisant une épaisseur de flèche variable en fonction de la criticité perçue par l'utilisateur de la ressource (la couleur de la flèche correspond donc à la couleur de l'utilisateur de la ressource).

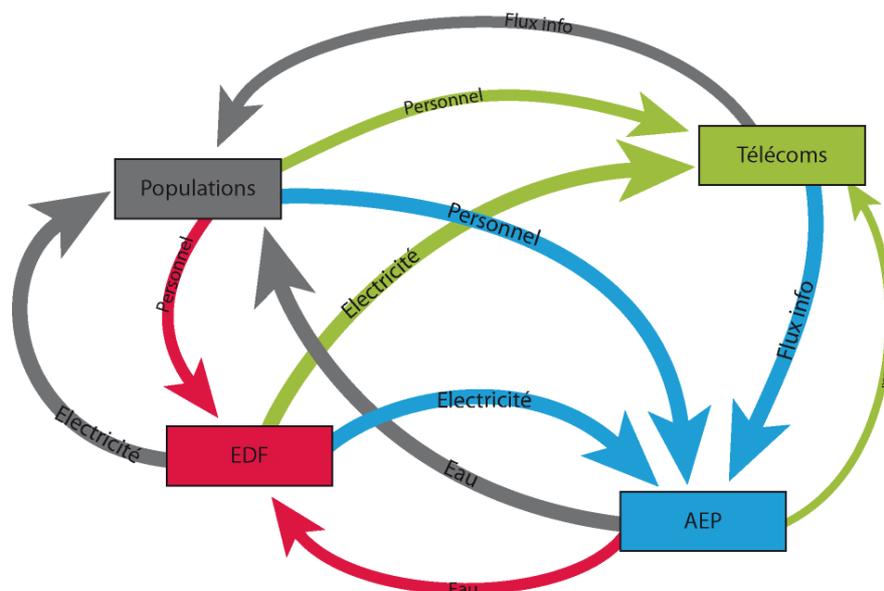


Figure 88. Exemple de représentation des liens d'interdépendance entre 4 systèmes

Cette première étape peut alors être enrichie par une évaluation plus poussée des liens d'interdépendances, toujours sans besoin de données précises localisées.

On ajoute dans la grille d'auto-diagnostic des notions temporelles rendant plus finement compte du fonctionnement du système afin de mettre en avant l'intérêt d'une action conjointe sur les interdépendances. On distingue deux types de grandeurs temporelles : celles décrivant la propagation de la défaillance, i.e. le temps au bout duquel une ressource entrante défaillante entraîne la perturbation de la production en sortie, celles rendant compte du temps de rétablissement, i.e. le temps au bout duquel le réapprovisionnement d'une ressource se traduit par la remise en marche de la production.

Certains gestionnaires peuvent avoir anticipé la défaillance potentielle de l'un de leurs fournisseurs en créant un dispositif de stockage de la ressource. On peut alors considérer qu'ils disposent d'une certaine autonomie face à la ressource mais qu'à partir d'un certain délai, la défaillance n'est plus compensée par le stock et est donc source de perturbation pour le système. On cherche donc à savoir, pour chaque ressource, le temps d'autonomie du système. De la même manière, on prend en compte le fait que la défaillance du système n'entraîne pas forcément immédiatement la défaillance de la production : délai d'inertie du système (Fig. 89). Pour une usine d'eau potable par exemple, une ressource importante est le chlore pour le traitement de l'eau, approvisionné par une entreprise extérieure. L'usine dispose d'un certain stock qui lui permet de tenir 7 jours sans être approvisionné par l'entreprise : elle a une autonomie de 7 jours. Puis, on sait que si une ressource entrante, l'électricité par exemple, est défaillante, l'eau continue d'être fournie durant 2h : inertie du système.

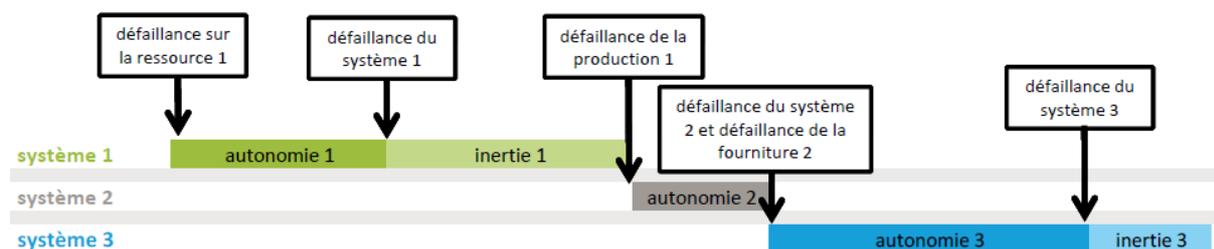


Figure 89. Chronogramme de la propagation d'une perturbation dans 3 systèmes

L'ajout de ces deux notions temporelles, qui restent qualifiées grossièrement par l'utilisateur (liste déroulante pour l'autonomie : aucune, <12h, quelques jours, plusieurs semaines ou inconnu), apportent des informations sur le délai de réaction qu'a un gestionnaire avant de perturber le système global. En effet, à partir d'une perturbation sur une ressource, le système n'est pas nécessairement immédiatement défaillant, puis sa défaillance n'entraîne pas immédiatement la défaillance d'un autre système qui lui serait dépendant. Par exemple, la défaillance du système 1 entraîne la défaillance du système 2 qui utilise une ressource du système 1 dans le temps t_1 (Fig. 90) se calculant comme la somme de l'inertie 1 (temps au bout duquel la défaillance du système 1 entraîne effectivement la défaillance de la production 1) et de l'autonomie 2 (temps au bout duquel le système 2 ne peut plus compenser le manque sur la ressource 1).

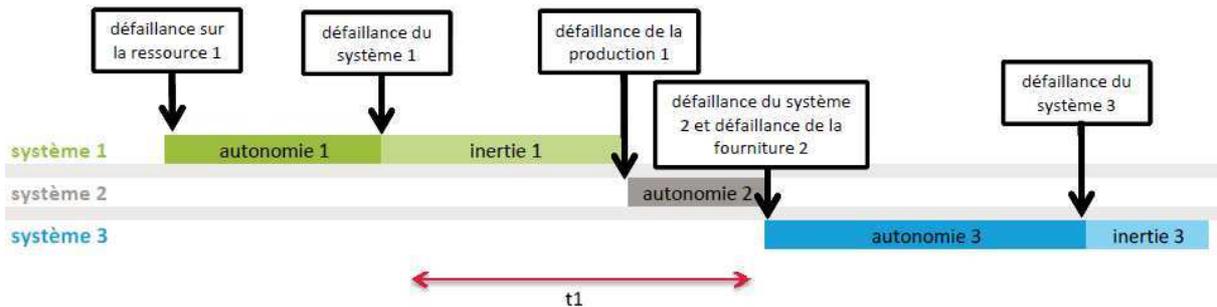


Figure 90. Temps de propagation de la défaillance du système 1 vers le système 2

La compilation de ces informations met ainsi en avant les modes de gestion à mettre en œuvre et les priorités à donner aux actions afin de limiter au maximum la propagation des défaillances. En cas de perturbation des systèmes, le rétablissement peut ensuite être ralenti par un fonctionnement peu flexible des systèmes, ce que l'on peut évaluer temporellement grâce aux notions de délai de remise en marche.

On distingue pour cela deux temps de remise en marche, qu'il conviendra de confondre pour certains systèmes : le temps de remise en marche du système et le temps de remise en marche de la production. On peut en effet considérer que pour certains systèmes, la remise en marche du système correspond à la production de la ressource, mais l'introduction de ces deux grandeurs permet d'identifier, pour une station d'épuration par exemple, le temps où l'ensemble des ressources sont fournies normalement, la station a repris un fonctionnement normal mais ne parvient pas encore à traiter correctement les eaux du fait de la perturbation des systèmes bactériens par exemple (fonctionnement en mode dégradé). Le premier délai correspond donc au temps au bout duquel le système se remet en marche après le rétablissement de l'approvisionnement de la ressource entrante défaillante. Puis le délai de remise en marche production est le temps au bout duquel la production est à nouveau assurée (Fig. 91).

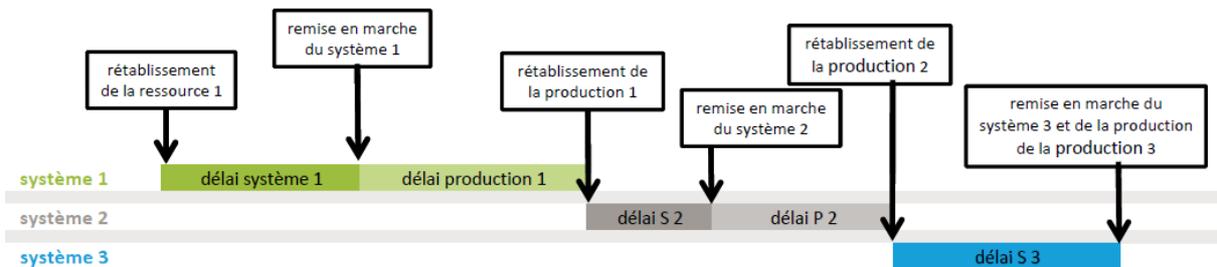


Figure 91. Chronogramme du rétablissement de 3 systèmes interdépendants

La qualification de ces délais s'effectue de la même manière que pour les délais de propagation, et l'on peut en déduire le même type d'analyse : le temps au bout duquel le rétablissement d'un système entraîne le rétablissement d'un système dépendant (temps t_2 sur la (Fig. 92).

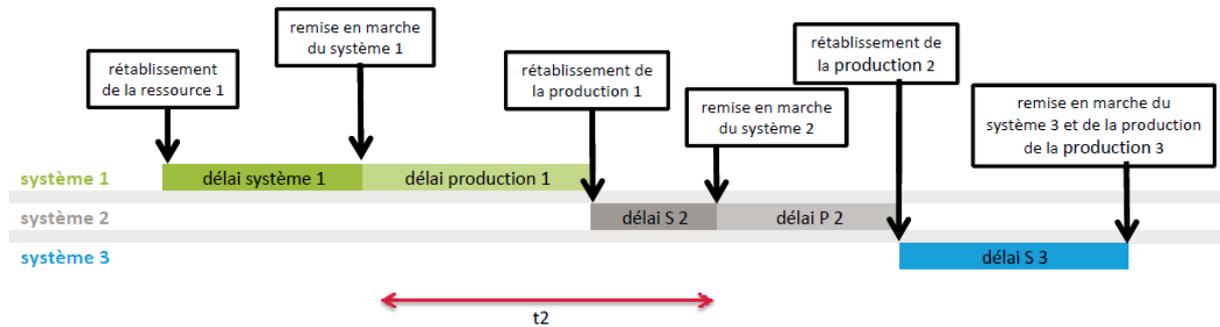


Figure 92. Temps de rétablissement du système 1 vers le système 2

Ces délais permettent également au gestionnaire de renseigner la criticité de la ressource. En effet, si une défaillance entraîne une perturbation qui mettra plusieurs jours, voire semaines à être résorbée, il paraît judicieux d'en sécuriser l'approvisionnement. Pour préciser ici le type d'analyse qui peut être effectué, si l'on considère la ressource « infrastructure » qui comprendrait les bâtiments, les voies d'accès, les réseaux, ou toute autre partie physique du système, on peut caractériser le temps de remise en service de l'infrastructure et le mettre en regard des pertes de fonctionnement. Ainsi, au vu du temps de remise en état du réseau de métro parisien, la RATP adopte comme stratégie la protection intégrale du réseau contre toute pénétration d'eau. Alors la caractérisation de ce temps de remise en service dépend de la perturbation subie (équipements inondés, bâtiments détruits par un séisme, ...).

La mise en relation des temps de propagation et des temps de rétablissements doit également soulever des enjeux liés à la gestion de crise et donc à la préparation des systèmes. Ainsi, si le délai de remise en service est suffisamment réduit, il se peut que la défaillance d'un système soit transparente pour les systèmes dépendants. La nécessité d'échanger sur ces propagations est donc mise en avant par ce type d'analyse et par les représentations en chronogrammes. Ils doivent être le support de débat entre les experts qui peut-être contesteront leurs liens avec les autres systèmes ou minimiseront leurs impacts sur les autres. C'est pourquoi une autre caractéristique est ajoutée à cet auto-diagnostic afin de confronter les perceptions mutuelles des gestionnaires.

Dans l'optique de faire émerger des contradictions dans l'articulation globale des systèmes et pour convaincre les gestionnaires de l'intérêt de la prise en compte de leurs interdépendances, on demande au gestionnaire de donner sa perception de la criticité de la ressource qu'il fournit à ses utilisateurs. Sur le même mode que la criticité qu'il perçoit lui pour les ressources dont il a besoin, il doit caractériser la criticité de sa production pour les systèmes qui en dépendent. Cette évaluation lui permet également de hiérarchiser les utilisateurs et donc de prioriser les interventions en cas de défaillance. Finalement, on peut utiliser une représentation globale ajoutant la confrontation des perceptions par des liens de dépendances illustrant la criticité de la ressource (Fig. 93).

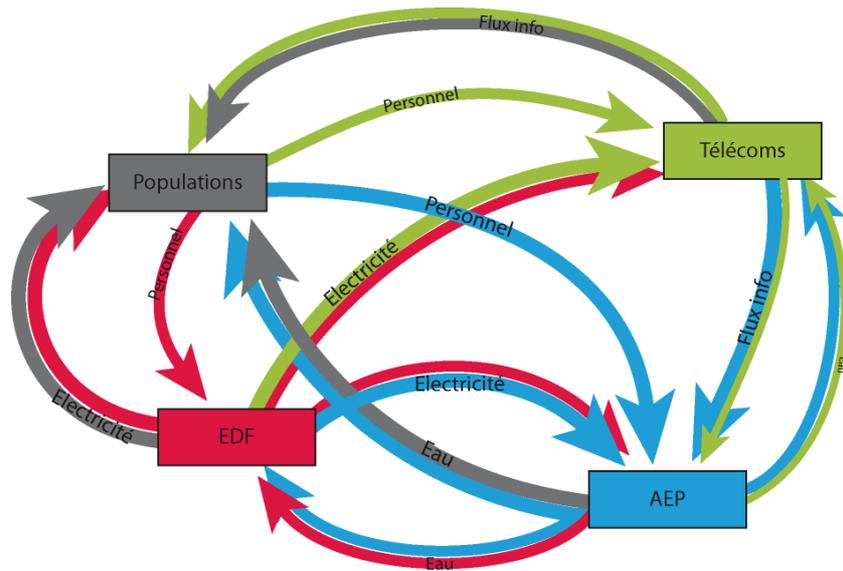


Figure 93. Représentation des liens d'interdépendance perçus entre 4 systèmes

Les éventuelles distorsions de perception sont alors mises en avant, comme par exemple ici, les télécommunications utilisées par le réseau d'eau potable (pour commander des équipements à distance) : la ressource est jugée indispensable par le gestionnaire AEP et perçue comme peu importante pour ce dernier par le gestionnaire télécom. On pourrait avoir à l'inverse (mais donc beaucoup moins problématique) des ressources jugées indispensables par un fournisseur, et finalement pas si importante pour l'utilisateur. Le but est là encore de susciter des échanges entre les gestionnaires sur la base de ces représentations afin d'identifier les interdépendances négligées (unilatéralement ou bilatéralement) ou inconnues. Pour y parvenir, la grille d'auto-diagnostic se présente finalement en 2 tableaux à remplir par le gestionnaire : l'un concernant les ressources, l'autre concernant les productions, avec à chaque fois une partie d'état des lieux et une partie d'évaluation (Fig. 94).

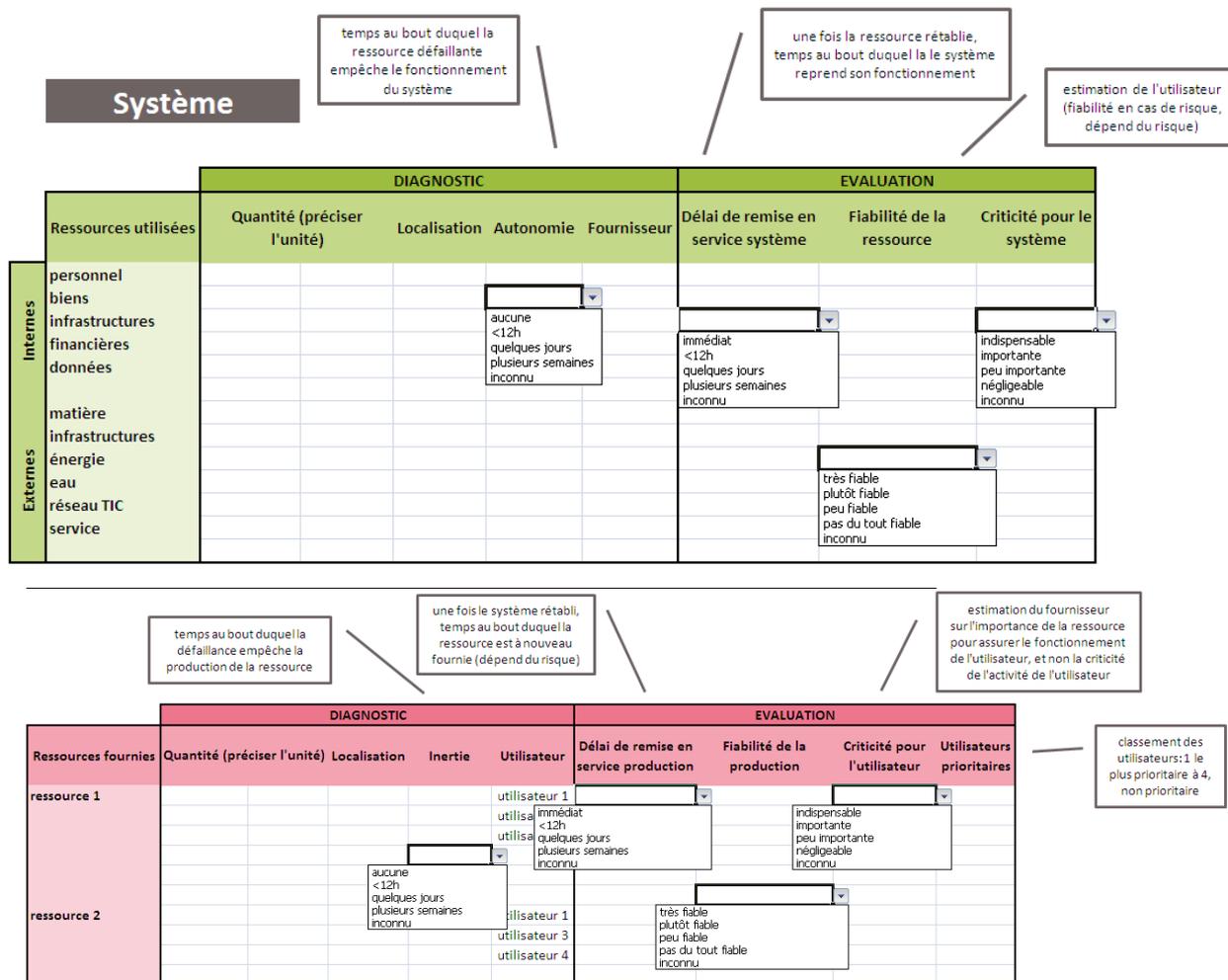


Figure 94. Grille d'autodiagnostic sectoriel

Pour les caractéristiques dépendantes du risque, il faut préciser la perturbation envisagée. On peut alors utiliser deux approches aux résultats différents. Soit le scénario de perturbation est fournie au gestionnaire qui se place alors dans la situation décrite et évalue la réaction de son système, soit il lui est demandé de renseigner lui-même le niveau de perturbation qu'il envisage. La première approche présente l'avantage de placer tous les gestionnaires sur le même plan et de pouvoir comparer le fonctionnement des systèmes. La deuxième approche permet quant à elle de faire émerger la perception du risque par les gestionnaires. Ainsi, certains seront catastrophistes quand d'autres envisageront des scénarios de perturbation normaux, pour lesquels ils ont planifié la gestion de crise et auront alors du mal à évaluer les conséquences d'un évènement plus grave sur leur système. La confrontation des perturbations envisagées amènera ainsi les gestionnaires à remettre en question leurs plans de gestion et à réaliser leur manque de préparation face à des évènements majeurs. Par exemple, le gestionnaire du réseau d'eau potable peut avoir négligé le fait qu'en cas d'inondation, la plupart de ses employés ne pourront pas se rendre sur le site de l'usine d'eau potable par exemple, et que sa gestion de crise en serait rendue inopérante. Ou bien, les niveaux de risque peuvent être sous-estimés par une partie des gestionnaires et pointer des dysfonctionnements ou des contradictions dans les mesures de continuité mises en place.

Le choix de mener une analyse sectorielle à l'échelle du système, sans entrer dans son fonctionnement interne pallie certaines difficultés liées au partage des informations entre gestionnaires, mais elle fait perdre une grande part d'information sur les capacités internes des

systèmes à gérer une perturbation. Par exemple, un système de production d'eau potable peut reposer sur deux usines de traitement. Ainsi, la défaillance de l'une peut être palliée par la marche forcée de la deuxième. Si le gestionnaire a connaissance de cette possibilité et l'a planifié dans sa gestion de crise, elle n'apparaît pas dans la grille d'autodiagnostic proposé et ne peut donc pas faire l'objet d'échanges avec les autres gestionnaires. Pourtant, si la défaillance de la première usine est due à une défaillance dans l'approvisionnement électrique, il est probablement plus intéressant de gérer en premier cette dépendance avant de faire appel à des moyens supplémentaires.

En synthèse, l'objectif de sensibilisation à la prise en compte des perturbations et des interdépendances entre systèmes est atteint dans un premier temps par l'utilisation d'un autodiagnostic simple qui, une fois mis en commun, est le support de discussions sur les interrelations entre les gestionnaires et n'exige pas un engagement trop grand (sur le plan des données, pas sur la motivation) des gestionnaires. On propose des analyses plus poussées pour alimenter les débats et susciter des réactions (confrontation des perceptions) mais il apparaît assez rapidement qu'il est nécessaire de préciser les ressources internes du système et de localiser les équipements pour affiner les liens d'interdépendances. Ainsi, une telle approche devrait inciter les gestionnaires à partager des informations sur leur fonctionnement et à mettre en commun leurs données dans le but d'améliorer la résilience de leur système et donc du système ville.

La deuxième étape dans l'amélioration de la résilience de la ville sera donc la modélisation du comportement des réseaux grâce au Web SIRS. Suivant divers scénarios la propagation des perturbations dans le réseau et les impacts sur le service sont finement analysés et localisés. Les mesures à mettre en place préventivement par les gestionnaires sont donc plus faciles à identifier, évaluer et hiérarchiser et elles peuvent également être testées par le modèle. Cette étape est donc indispensable, l'approche ne peut pas s'arrêter à la première sensibilisation puisqu'il faut donner les moyens aux gestionnaires de mettre en œuvre des solutions adaptées, i.e. propres au contexte, au coût maîtrisé et à l'efficacité certaine. Les politiques de résilience sont pour l'instant floues et parfois mal utilisées et souvent peu opérationnelles, il faut donc favoriser des approches concrètes en collaboration avec les acteurs de la ville afin de garantir la durabilité des solutions apportées.

Aussi, le Web SIRS, à terme, sera enrichi de ces outils de gouvernance. Dans le même temps, le Web SIRS sert de support à cette démarche participative. Le contexte des projets FloodResilienCity et FloodProBE dans lesquels plusieurs villes collaborent à la ville résiliente aux inondations, facilite notre démarche tant sur le plan de la sensibilisation que sur le plan de la collecte de données.

4. Bilan et perspectives

Nous disposons de deux SIRS d'aide à la décision pour le renforcement de la résilience urbaine face au risque d'inondation.

Le premier outil est destiné aux gestionnaires de digues de protection contre les inondations. Il permet aux gestionnaires de digue de prendre des décisions relatives aux opérations d'inspection, de maintenance et de réparation en fonction du niveau de résistance des digues. La capacité de résistance des digues est spatialisée, ainsi, les gestionnaires de digues sont à même de repérer les tronçons de digues les plus dangereux et de prendre les bonnes décisions en faveur de la résilience urbaine.

Le deuxième SIRS permet la localisation des niveaux de résilience des réseaux techniques urbains. En particulier, les questionnaires de ces réseaux, et les questionnaires des risques peuvent mettre en place des stratégies pour augmenter la résilience des réseaux face à l'inondation, selon les capacités de résistance, d'absorption et de récupération. Cet outil, ouvert sur le web (Web SIRS) devra permettre à terme la mutualisation de l'information pour une meilleure gouvernance des réseaux techniques urbains à l'origine de la diffusion du risque inondation en ville. Cet outil est en cours de développement.

A terme, avec la recherche menée par Marie Toubin, ce Web SIRS sera enrichi de nouvelles fonctionnalités intégrant la dimension participative pour l'amélioration de la résilience urbaine.

Le développement de SIRS renvoie alors à l'étude des développements des capacités SIG. Les théories et les concepts maniés ne constituent pas à eux seuls l'originalité des travaux présentés, la solution SIG retenue, couplée à nos modèles d'évaluation de la résilience y contribue bien plus. Pour conclure, le choix des outils permettant l'exploitation des recherches thématiques développées ne peut être dissocié de nouvelles pratiques sociales et institutionnelles. En effet, l'outil développé est en partie une création permise par la géomatique classique mais aussi par le développement de la néogéographie.

La recherche en cours concernant ces outils d'aide à la décision, au fur et à mesure de son avancement, fait naître de nouveaux besoins auxquels nous allons répondre :

- finaliser l'outil d'évaluation de la résilience des réseaux techniques urbains en testant les trois capacités à des cas réels. La fin de la thèse de Serge Lhomme sera dédiée à cette tâche. Des tests de ces outils sur des villes ou des quartiers sont envisagés. Ainsi, l'Agglomération d'Orléans devrait bénéficier de ces tests, sur les digues d'un côté et sur les réseaux de l'autre dans le cadre du projet FloodProBE. D'autres villes en Europe comme Dublin et Dordrecht bénéficieront de ces tests dans le cadre de FloodProBE et de FloodResilienCity.;
- les questionnaires de digues ne peuvent pas décider des interventions sur leurs ouvrages uniquement en fonction de la capacité de résistance des digues. Connaître les niveaux de résilience des espaces urbains protégés par les digues doit être un critère essentiel pour les politiques de maintenance des digues. Il semble aujourd'hui intéressant de pouvoir disposer d'un outil d'aide à la décision intégré croisant la performance de la digue, la vulnérabilité sociale et la résilience des réseaux technique urbain. Le projet FloodProBE apporte des éléments de réponse, mais une thèse EIVP – Cemagref est à envisager sur cette question ;
- compléter ces SIRS d'outils participatifs est une option intéressante du point de vue d'une évaluation holistique de la résilience urbaine, c'est-à-dire une approche technico-fonctionnelle de la résilience enrichie par une approche organisationnelle de la résilience. La thèse de Marie Toubin devrait être une contribution significative en ce sens.

Perspectives pour les prochaines années

La recherche menée jusqu'alors a visé l'évaluation de la résilience urbaine face au risque d'inondation. Mon choix méthodologique 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 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 mise en œuvre d'outils a été rendue possible par l'utilisation de méthodes provenant de diverses disciplines. Outre le génie urbain, transdisciplinaire par nature, des méthodes provenant de la géographie des risques, des sciences de l'aide à la décision et des sciences de l'information géographique ont été mobilisées.

Même si nos 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 type 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. La thèse de Marie Toubin, démarrée en novembre 2010 contribue à cette recherche. Nous avons présenté en partie 2 les premiers résultats ;
- l'évaluation de la résilience urbaine face à d'autres aléas naturels et technologiques, pour une amélioration holistique de la résilience des villes et de la gouvernance urbaine. Le projet RESILIS contribue à l'atteinte de cet objectif ;
- l'amélioration de la connaissance des réseaux techniques urbains en termes de fonctionnement et de gestion. La thèse d'Angel Paterna-Hidalgo contribuera à cet objectif.

Ces recherches vont conduire à des méthodes et outils pour l'évaluation de résilience urbaine. Les questionnaires des systèmes techniques urbains seront ainsi équipés pour concevoir la résilience à l'échelle de leurs réseaux, en coordonnant leurs actions avec l'ensemble des questionnaires de réseaux. Mais ces méthodes et outils doivent aussi pouvoir permettre la conception de la ville résiliente face aux risques : c'est l'hypothèse que nous faisons pour

initier un nouvel axe de recherche. En effet, ces outils reposent sur des SIRS, où les réseaux techniques sont localisés. Mais, de la même manière, nous pouvons localiser d'autres composants urbains tels que les bâtiments, l'espace public, les activités... Ainsi, en s'appuyant d'une part sur ces méthodes et outils, d'autre part sur des sciences liées à l'architecture, à l'urbanisme, et aux sciences sociales au sens large, nous envisageons un axe de recherche en conception de la ville résiliente.

L'atteinte des objectifs scientifiques liés à la conception de la ville résiliente passe par une recherche à initier dans les deux domaines suivants :

- l'intégration de la résilience urbaine dans la conception de la ville durable. Mireia Balsells Mondejar réalise actuellement un mémoire de Master Recherche sur la résilience post Katrina de quartiers urbains de la Nouvelle Orléans. Elle analyse la reconstruction d'un quartier particulier de la ville et cherche à analyser comment le concept de résilience est pris en compte dans la reconstruction. En décembre 2011, elle démarre une thèse co-dirigée par l'EIVP et la faculté d'architecture de l'Université de Mons ;
- l'intégration de la résilience urbaine et de la mixité des fonctions urbaines pour concevoir la ville durable. Il s'agit ici d'appréhender la complexité urbaine au travers d'analyses systémiques pour réussir la construction de la ville dense et adaptée aux risques. Des projets de recherche en partenariat seront proposés en ce sens en 2012, avec l'avantage d'intégrer les compétences des autres chercheurs de l'EIVP.

Enfin, des applications opérationnelles, à destination de la société civile, sont prévues dans les prochains mois, dans plusieurs villes, avec les acteurs de la gestion des risques.

1. Evaluer la résilience urbaine : un axe de recherche à poursuivre

1.1. Evaluation de la résilience multirisque : coordination scientifique du projet RESILIS

Le projet RESILIS répond à 4 objectifs scientifiques et techniques. Le premier objectif scientifique est une caractérisation pluridisciplinaire de la résilience de la ville envisagée de manière complémentaire comme un système humain et un système de systèmes techniques. Le second objectif scientifique est d'élaborer une représentation du système urbain utile à l'analyse, l'évaluation et la gestion des risques. Le troisième objectif scientifique est d'identifier, pour les aménageurs et concepteurs - gestionnaires de réseaux techniques, un cahier des charges pour l'adaptabilité des équipements et systèmes techniques considérés. Le quatrième objectif scientifique est d'identifier les conditions techniques, organisationnelles et politiques, d'une valorisation optimale de l'information, au service de la population, de la gestion des risques et de la résilience de la ville.

Une analyse des conditions actuelles de gestion des risques fait apparaître un certain nombre de difficultés face à un nouvel environnement d'aléas et aux exigences des populations. En particulier l'analyse des nombreux outils de gouvernance et des plans de prévention des risques actuellement disponibles fait ressortir un certain nombre de faiblesses. Il est donc nécessaire de proposer des solutions innovantes. C'est ce que nous nous attachons à faire dans le cadre de RESILIS, notamment grâce à une approche permettant :

- de travailler à partir du concept de résilience dans sa composante de moyen et long terme en intégrant gouvernance et technique ;
- d'apporter une réponse intégrée et systémique à des sollicitations accidentelles devenues interconnectées en s'appuyant en premier lieu sur les systèmes humains – dont la population.

La réactivité (des organisations, des populations), suite à une catastrophe, est un des indicateurs de résilience. La capacité des réseaux techniques à assurer un niveau de service suffisant, en mode dégradé et après un incident, accident, ou catastrophe, est par exemple, un autre indicateur du niveau de résilience du système considéré. RESILIS cherchera à définir sur le long terme des outils d'adaptation et de conception pragmatiques et utilisables permettant de doter les systèmes humains et techniques de la capacité de se cicatrifier plus rapidement après une catastrophe, et d'absorber sans crise majeure les multiples aléas susceptibles de remettre en cause le fonctionnement de la ville et de ses réseaux. Autrement dit, la résilience est à concevoir au croisement de l'aléa, de la vulnérabilité et de la réactivité. Les résultats du projet sont destinés aux acteurs de la gouvernance territoriale, aux services techniques, à la population et aux acteurs économiques afin de développer une politique de résilience globale.

Une analyse des conditions actuelles de gestion des risques fait apparaître un certain nombre de difficultés face au nouvel environnement d'aléas et aux exigences des populations. En effet, les nombreux outils de gouvernance et les plans de risques sont souvent spécifiques à un risque, à un aléa ou à un type d'installation. De plus, ils ne prennent pas nécessairement en compte les dernières évolutions dans la caractérisation des aléas, et surtout des multi-aléas, et traduisent des approches réglementaires sectorisées ou des approches techniques spécifiques selon des aléas précis. En outre, peu de projets abordent la notion de réactivité/résilience, indispensable pour aborder l'après accident et la reconstruction. Enfin, les questions de la gestion durable des crises, à moyen et long terme est peu traitée. RESILIS vise la levée de ces verrous scientifiques.

Produits finaux suivants sont attendus :

- les spécifications d'outils serviront, après le projet, à des réalisations industrielles d'outils au service des maires, des préfets. Ces réalisations pourront conduire à des retombées économiques fortes, des bénéfices importants ;
- les méthodologies et cahiers des charges développés seront directement utilisables et seront complétés par un Guide à destination des acteurs sur les méthodes et outils pouvant être utilisés pour rendre la ville plus résiliente. Un site web permettra de diffuser et de vulgariser les connaissances sur le sujet ;
- au-delà de la conception elle-même et des tests de faisabilité associés, le projet proposera des maquettes des principales composantes du futur système. Il constituera ainsi un point d'accrochage original pour tous ceux qui souhaitent apporter, dans le cadre de futurs programmes à définir, des contributions spécifiques à l'une ou l'autre des tâches essentielles concourant à l'amélioration de la gouvernance et de la résilience ;
- enfin le projet dans son rapport final de synthèse apportera une véritable réflexion originale sur l'ensemble des méthodes et moyens de collecte et de validation des données, d'état des connaissances, d'état des pratiques, d'état des réglementations, d'information et de communication, de mobilisation d'une participation citoyenne susceptible d'améliorer la résilience d'une ville face aux nouveaux aléas.

Les livrables consistent en conseils, méthodes, cahier des charges d'outils, moyens de formation et de sensibilisation. Ces livrables – pratiques et pragmatiques – pourront être rapidement utilisés par un grand nombre de Territoires et d'acteurs industriels et de conseil pour construire la résilience des territoires urbains. La culture du risque des populations et des acteurs de la gestion des risques, leurs modes de gouvernance et d'organisation seront fortement impactés par ces livrables. Leur opérationnalité étant validée grâce à une phase d'expérimentation sur le terrain, ils ouvriront la voie à des réalisations concrètes. En termes économiques, on peut estimer des baisses du taux des polices d'assurance (diminution des impacts des risques) ou de réduction des remboursements versés par les assurances. Ceci constitue un premier indicateur lourd.

Pour réaliser ses objectifs, RESILIS fait le choix d'une recherche pluridisciplinaire appliquée associant des chercheurs de divers domaines (juridiques, techniques, sociologiques, économiques...), des ingénieristes (aménageurs, hydrauliciens, spécialistes des transports, de l'énergie, de l'eau, etc.) et des praticiens (élus, responsables de services techniques, responsables de la sécurité) dans de grandes villes. Durant le projet RESILIS, les partenaires feront en sorte de dégager :

- une démarche globale d'analyse de risques en milieu complexe : plusieurs méthodes, comme la cindynique ou la Sûreté de Fonctionnement, seront mobilisées pour approcher de façon systémique la situation des villes. L'analyse purement technique d'un système social ne peut suffire à approcher les sources des risques, et il est indispensable d'y inclure les approches des Sciences Humaines et Sociales au travers de l'analyse des jeux d'acteurs, avec leurs finalités, leurs valeurs et leurs règles...
- une réflexion sur les éléments juridiques de l'action doit être menée : cette analyse complète et raisonnée sera indispensable pour définir des méthodes et des outils de gestion plus pertinents des risques sur les territoires. Elle comportera un état des lieux de la situation et des pratiques.
- un examen des diverses pratiques des acteurs de la gestion des risques sur les territoires sera mené, indispensable pour élaborer les cahiers des charges d'outils ou de méthodes d'aide au développement de la résilience des territoires (par exemple un outil d'aide à la délibération des collectivités locales). Une enquête - recherche sur les pratiques des Collectivités Territoriales sera ainsi conduite avec des spécialistes de la sécurité publique urbaine, de la santé publique, des divers risques naturels et technologiques, de l'aménagement et de l'urbanisme⁷. Une analyse des meilleures pratiques en matière d'organisation pour traiter de ces questions au niveau d'une collectivité sera aussi menée.

1.2. Amélioration de la connaissance des réseaux techniques urbains : co-direction de la thèse d'Angel Paterna-Hidalgo

Cette thèse concerne la gestion patrimoniale des ouvrages de génie civil de la RATP (Régie Autonome des Transports Parisiens). La RATP est un exploitant de réseau de transport. Avec près de 10 millions de voyages par jour, c'est l'un des réseaux les plus chargés au monde. La ligne A du RER transporte à elle seule l'équivalent de 1,2 million de voyageurs par jour, la ligne B : 900 000 voyageurs par jour.

Mais la RATP est aussi gestionnaire d'infrastructures, et à ce titre, elle se doit d'assurer la sécurité et la pérennité de ses ouvrages. Cette mission doit être réalisée de manière transparente pour le voyageur et avec un minimum d'impact sur les autres concessionnaires.

Dans ce contexte, les contraintes sont nombreuses et touchent à tous les domaines (voyageurs, tiers, géologie, économie...).

Le Patrimoine RATP est très varié à la fois en terme d'âge (162 ans d'amplitude), mais aussi en terme de variété de structures. Cette diversité, si elle présente un intérêt technique, impose une politique de surveillance et d'entretien de proximité avec des stratégies rarement adaptables à l'ensemble du réseau. L'entretien des infrastructures de génie civil, tout comme la surveillance, a connu plusieurs périodes que l'on peut distinguer comme suit :

- jusqu'aux années 1960, entretien courant suite aux visites et inspections et suite aux signalements émis par les différents services d'exploitation et de maintenance. Des opérations ponctuelles d'importance (reconstruction partielle d'ouvrages, chantiers ponctuels d'injection et de régénération) ;
- dans les années 1960, les grandes opérations de création du RER intra-muros ont permis à l'occasion des travaux exécutés à proximité des ouvrages du Métro, de constater l'état de l'extrados des maçonneries existantes. Suite à ces constats, des travaux de régénérations de maçonneries ont débuté ;
- en 1974, en parallèle au groupe de travail mis en place au niveau national, suite à l'effondrement du tunnel de Vierzy (ligne Paris-Laon dans l'Aisne), un groupe de travail RATP rendait son rapport « Entretien des ouvrages souterrains » ;
- deux ans après ce rapport, une instruction technique provisoire, définissait de nouvelles règles de surveillance (avec reconnaissances destructives des maçonneries) et un programme pluriannuel de régénération des maçonneries et de collage au terrain a été instauré. Ce programme est, dans ses grandes lignes, toujours en cours ;
- à partir des années 1990, en complément des politiques existantes, naît le schéma directeur de maintenance qui définit des politiques de maintenance projetées sur des périodes de dix ans et qui sont remises à jour régulièrement ;
- En 2008, une instruction technique propre à l'entreprise, fruit de l'évolution, depuis 1908, de cinq réglementations internes voit enfin le jour. Elle s'inspire fortement de l'Instruction Technique du 19 octobre 1979 établie pour la surveillance et l'entretien des ouvrages d'art des routes, révisée en 1995.

La RATP s'appuie sur une équipe d'une quarantaine de personnes (techniciens et ingénieurs) pour décliner cette réglementation. La politique de surveillance des ouvrages d'art s'articule principalement autour de deux évènements :

- les inspections détaillées, d'une périodicité quinquennale, qui sont une étape fondamentale dans la surveillance organisée des ouvrages d'art. Elles permettent d'établir un inventaire détaillé et exhaustif des désordres affectant l'ouvrage, un bilan minutieux de leur évolution et d'attribuer une note de santé caractéristique de l'état structurel de l'ouvrage. Une attention particulière est accordée aux ouvrages établis dans des contextes environnementaux défavorables (remblais compressibles, formations sensibles à la dissolution ou au fluage, zones soumises aux battements de nappe...);
- les visites qui consistent en un examen rapide de l'ouvrage, destiné à caractériser l'évolution des désordres relevés lors des inspections détaillées. Leur périodicité est adaptée en fonction de l'importance des pathologies relevées sur les ouvrages.

Chaque action de surveillance donne lieu à l'établissement d'un procès verbal validé et enregistré dans la base de données de gestion de la surveillance, MARION (Maintenance Assistée du Réseau, Inspections des Ouvrages et Notations), une note d'état pour chaque partie d'ouvrage présentant un désordre, ainsi que pour le lieu (station, interstation ou ouvrage d'art...) est attribuée.

Aujourd'hui, la pression économique et le contexte politique (création du gestionnaire d'infrastructures) induisent un besoin de plus en plus important de critères autres que techniques d'aide à la décision dans le choix et la justification des ouvrages à traiter voire des politiques plus globales à mettre en œuvre (traitement anti-corrosion de toutes les tranchées couvertes métalliques, reprise des passages en bâches fuyards, etc.). On rencontre en effet de réelles difficultés à présenter l'intérêt d'interrompre le trafic pour des travaux sur un ouvrage qui ne se voient pas et dont le report d'une voire de plusieurs années ne semble pas entraîner de conséquences visibles en terme de dégradation. Il devient donc nécessaire de mettre au point un système de notation qui permette non seulement d'identifier rapidement les types d'ouvrages nécessitant des travaux d'entretien, avec une notion de délai, qui permette ensuite de mesurer l'effet des travaux, et qui de fait donne la possibilité de tester en amont l'effet de différentes solutions techniques en faisant des simulations a priori sur les bases des programmations souhaitées.

Les outils actuellement utilisés abordent la problématique sous deux angles :

- un angle « risque », avec le Schéma directeur de la Maintenance (SdM), mais dont la mise à jour est réalisée ponctuellement sur une base essentiellement « humaine » (les connaissances et l'expérience des rédacteurs étant la principale source de mise à jour) ;
- un angle « technique », avec un système de notation d'état de l'ouvrage et un outil informatique de saisie des procès verbaux de visite et d'inspections des lieux qui permet de générer des demandes de travaux (outil MARION). Le choix des demandes de travaux se fait ensuite sur la base des échanges avec les agents qui ont mené les inspections et les ingénieurs de l'entité CPMO (Contrôle du Patrimoine et Maîtrise d'Ouvrage) qui assure la maîtrise d'ouvrage des infrastructures.

Dans ce contexte, l'objectif de cette thèse est de concevoir et mettre en œuvre un ou des outils d'aide à la décision, sous forme d'indicateurs de performance des investissements réalisés sur les infrastructures. Au-delà de l'apport de la recherche pour la gestion patrimoniale des ouvrages de la RATP, un apport important lié à la connaissance du fonctionnement des ouvrages est attendu en matière de risques.

2. Concevoir la ville résiliente : un axe de recherche à initier

2.1. Résilience et conception de la ville durable : co-direction de la thèse de Mireia Balsells Mondejar

Le risque inondation est un risque majeur. Cependant, force est de constater que les réponses et les études menées sont souvent sectorielles et ne prennent pas suffisamment en compte la complexité des systèmes urbains. En effet, ces études cherchent généralement à évaluer la vulnérabilité des espaces et/ou des « objets » urbains. Si cette étape menée depuis plusieurs années a permis de mieux connaître les fragilités face aux inondations, on constate que

l'exploitation de ces travaux reste difficile et consiste, au mieux, à établir des plans de secours et à tenter d'accroître la résistance des espaces inondables. Le projet de thèse « résilience et évaluation des systèmes techniques face à l'inondation » s'oriente vers une approche novatrice en gestion des risques qui introduit la notion de résilience et l'applique au génie urbain.

Nous retenons ici comme définition de la résilience « la capacité d'un système à pouvoir intégrer dans son fonctionnement une perturbation, sans pour autant changer de structure qualitative » (Holling, 1973). Selon cette approche, la perturbation n'est pas forcément un « traumatisme », mais au contraire une partie prenante du fonctionnement du système. Le changement et la perturbation qui déclenchent ce « traumatisme » sont des éléments inévitables et parfois nécessaires à la dynamique du système et à son maintien. Dans cette perspective, la gestion du risque ne consistera pas à résister, selon l'idée qu'il n'y a qu'une seule situation d'équilibre viable pour le système, mais au contraire, de créer d'autres situations viables qui permettent à un système de se situer loin de l'équilibre sans pour autant s'effondrer.

Cette thèse se concentre sur la résilience, l'adaptation et la conception de quartiers urbains intégrant l'inondation. Cette recherche se nourrit des travaux issus de démarches telles que HQE²R, Ecobuilding lié à la qualité environnementale, mais qui ne prennent pas en compte la résilience. La recherche s'applique à l'échelle du projet urbain et vise à faire évoluer les conceptions, les modes et pratiques de l'aménagement et de la gestion de la ville sous l'angle du génie urbain. Ainsi, ce projet de thèse est complémentaire des travaux sur les écoquartiers qui cherchent, entre autre, à stimuler la création de quartiers urbains respectueux de l'environnement, innovants et exemplaires (Fig. 95 et 96).



Figure 95. Exemple d'aménagement résilient du point de vue de l'inondation dans le processus de reconstruction de la Nouvelle Orléans : amélioration du système de drainage de surface (http://www.wbarchitects.com/research/dutch_dialogues/)



Figure 96. Elargissement des canaux de la Nouvelle Orléans permettant d'introduire la résilience dans le quartier en donnant plus de place à l'eau et en réduisant les contraintes sur les ouvrages de protection (http://www.wbarchitects.com/research/dutch_dialogues/)

Les objectifs principaux de la thèse sont :

- de fournir les spécificités d'un quartier urbain résilient ;
- de préciser comment un quartier peut se concevoir et/ou se rénover en rapport aux systèmes techniques pour atteindre le niveau voulu de résilience, tout en conservant les qualités urbaines nécessaires à un fonctionnement durable ;
- de caractériser le fonctionnement du quartier en période d'inondation.

Selon quelles configurations urbaines, techniques, morphologiques, programmatiques et sociales peut-on concevoir la résilience d'un quartier urbain inondable ? En introduisant la résilience, il s'agit de « faire la vie en ville avec » l'inondation plutôt que de chercher à s'en protéger en séparant les territoires de l'eau des territoires de la ville. Le projet de thèse propose une approche novatrice par l'échelle d'étude « le quartier » et par le concept de référence « la résilience ». Enfin cette thèse ne propose pas une évaluation globale de la résilience mais cherche à définir les actions à mettre en œuvre pour atteindre par l'évolution des systèmes techniques un niveau de résilience voulu.

La doctorante pourra s'appuyer sur des pratiques d'aménagement urbain cherchant à intégrer le risque inondation en Europe, dans le cadre des projets FloodResilienCity et FloodProBE, et aussi aux Etats-Unis, dans le cadre d'un partenariat avec l'Université de la Nouvelle Orléans.

2.2. Résilience urbaine et mixité des fonctions

Risques urbains

À des aléas plus fréquents, plus intenses et une vulnérabilité accrue des systèmes urbains s'ajoute le fait que les sociétés modernes sont devenues aujourd'hui très sensibles aux risques. Le risque induit par les défaillances des réseaux urbains (transports, énergie, communication,) se situe à l'interface entre le risque naturel, lié aux aléas, et le risque technologique, lié aux ouvrages eux-mêmes : la défaillance d'un des réseaux urbains lors d'un événement fait partie de cette catégorie de risque dorénavant difficilement accepté par les populations et les politiques concernées puisqu'elle désorganise plus ou moins longtemps le système urbain. Par ailleurs, l'attractivité des villes et l'accroissement de la démographie ont abouti à autoriser la construction dans des zones potentiellement dangereuses comme des zones inondables, des zones sismiques... Il résulte de ces phénomènes socio-naturels une vulnérabilité accrue non seulement aux événements extrêmes, mais aussi aux événements considérés comme courants par le passé.

Étalement urbain

Dans le même temps, les villes se sont développées selon le schéma de l'étalement urbain : celles-ci se sont expansées du centre vers la périphérie le long des grands axes routiers. Cet étalement est lié au phénomène de désurbanisation et s'est traduit par le développement de banlieues et de zones périphériques plus lointaines au détriment des villes centres avec des intensités variables selon les périodes. Le choix de la localisation des ménages est principalement déterminé par la possibilité d'emploi et la convivialité de l'environnement choisi tels que les espaces verts, les commerces, services ou transports en commun favorisant des lotissements toujours plus éloignés du centre-ville. Pour les activités économiques, ce sont des facteurs tels que la mobilité, le coût élevé de l'immobilier et le niveau de taxation locale qui poussent certaines entreprises à opter pour la périphérie ou les zones non urbaines. Elles s'installent dans des zones d'activités fermées sur elles-mêmes. Ce phénomène renforce la monofonctionnalité des zones périphériques et provoque l'étalement urbain.

Ces deux constats portent matière à réflexion. Comment gérer le risque ? Comment devancer ce gaspillage d'espace ? Comment fournir les bases d'une théorie intégrée de l'organisation et de la complexité ?

La recherche envisagée s'élabore sur le constat que les outils et méthodes existants de la planification de projets urbains ne sont plus compatibles avec la complexité croissante du territoire, comme la ségrégation ou l'étalement urbain et la maîtrise des risques. En outre, plus les territoires urbains s'étendent et se complexifient, plus ils dépendent de leurs écosystèmes et plus ils deviennent vulnérables aux changements.

Notre recherche a pour objectif principal de proposer une méthodologie d'évaluation permettant aux acteurs de l'aménagement urbain d'évaluer leurs actions par rapport aux enjeux du développement durable pour orienter leur projet dans le sens de la mixité des fonctions urbaines et de la résilience. En effet, la méthode utilisée pour étudier un système est la double caractérisation par l'aspect structural et l'aspect fonctionnel. L'aspect structural correspond à l'organisation spatiale du système alors qu'à travers l'analyse fonctionnelle, il s'agit plus particulièrement de caractériser les phénomènes temporels : flux, échanges, rétroactions...

La complexité accessible

L'approche sectorielle de l'urbanisme correspond à la structuration classique des acteurs de la fabrication et de la gestion des villes ; elle permet de mettre en avant de bonnes pratiques comme par exemple la mise en œuvre de solutions performantes de mobilité, de gestion des eaux ou encore énergétiques d'un projet urbain. Intéressantes en soi, celles-ci ne doivent cependant pas constituer la stratégie politique et décisionnelle occultant les démarches systémiques intégrant la complexité et les nombreuses composantes de la ville.

Les bonnes pratiques et les formes de conseil « technique » de l'aménagement urbain sont aujourd'hui limitées par une sectorisation forte que déterminent les spécialisations : énergie, transports, environnement, sociologie, Elles mettent en jeu des expertises verticalisées et insuffisamment connectées qui ne prennent pas en compte l'interdépendance des éléments, des relations et des actions de transformation constituant un système urbain. L'objet « ville », encore récemment, était le plus souvent abordé par des méthodes très analytiques, caractérisées par le cloisonnement des études et rares sont les tentatives de croisement de ces différentes approches dans une perspective transversale appréhendant la complexité.

L'analyse de l'aménagement urbain a ainsi souligné l'importance du passage d'une vision linéaire à un urbanisme intégré visant un système inter-relié traitant la ville comme un objet complexe susceptible d'être envisagé sous un angle systémique. La systémique est intrinsèquement liée à la prise de conscience de la complexité croissante de la ville.

L'approche systémique est une façon d'interpréter le monde réel. Elle permet d'émettre des hypothèses sur l'organisation des villes en supposant des critères qui composent la structure fonctionnelle de la ville. Structure et fonction sont donc deux concepts inséparables intégrant la mixité et la résilience urbaine. Cela demande une évaluation globale et transversale développant la relation de critères, et capables de juger de la faisabilité d'un projet autour de stratégies de résilience et de mixité urbaine. Résilience et mixité urbaine sont les deux mots formant la particularité d'une situation complexe.

Notre recherche aura pour objectif l'organisation de la ville complexe au travers des concepts de mixité et de résilience. L'urbanisme résilient et mixte est rendu possible grâce à la modélisation qui regroupe les critères de la matrice complexe composant la ville moderne. Si l'approche par projets intègre la complexité, l'approche zonée et sectorielle la rejette, réduisant la ville à des divisions simplistes et monofonctionnelles. La ville est une matrice complexe et changeante des activités humaines et de l'environnement physique. Planifier une ville nécessite une plus grande compréhension des relations entre ses composantes.

Aux différents niveaux d'échelle de planification se pose la question des outils pour intégrer le concept de résilience et fabriquer la mixité fonctionnelle. Car on ne peut plus s'appuyer seulement sur des plans de zonage et des réglementations, il faut développer des outils efficaces dans les processus urbains actuels : ces outils constitueront les livrables de nos recherches.

3. Applications opérationnelles

Les résultats de nos recherches vont être testés dans plusieurs villes. L'objectif de ces tests consiste :

- à vérifier sur le terrain des méthodes choisies pour l'évaluation de la résilience urbaine ;
- à calibrer les outils d'aide à la décision développés ;

- à permettre l'appropriation de ces avancées scientifiques par les gestionnaires des risques (gestionnaires de réseaux, gestionnaires de digues, communes, agglomérations, départements, régions et établissements publics territoriaux de bassins) ;
- à analyser avec les bénéficiaires de ces outils leurs besoins présents et futurs en termes d'aide à la décision pour la gestion des risques en milieu urbain.

Ces tests grandeur nature vont être réalisés dans le cadre des projets de recherche FloodResilienCity, FloodProBE, RESILIS et Paris Résiliente.

L'année 2011 a été consacrée à la collecte des données nécessaires pour réaliser ces tests. Ainsi, nous avons pu collecter des données du Val de Loire (Orléans et Agglomération d'Orléans), Dublin, Bradford, Dordrecht, Trondheim et Paris. La collecte des données peut paraître simple au premier abord, mais comme nous avons besoin de données relatives à plusieurs réseaux, à l'occupation du sol, à l'état des digues... il est plutôt difficile de les obtenir, surtout en France. Quand nous obtenons les données ou une partie de ces données, des post traitements sont aussi nécessaires pour faire fonctionner nos outils d'aide à la décision. Cette étape de collecte est généralement chronophage.

Durant l'année 2012 des tests des méthodes et outils seront réalisés :

- sur le Val de Loire dans le cadre de FloodResilienCity, FloodProBE et RESILIS. Ces tests viseront à la fois l'évaluation de la résilience des réseaux de l'AggLO d'Orléans et l'évaluation de la performance des digues de la Loire, du fait de l'implication dans FloodProBE de la DREAL Centre (Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement) chargée de la gestion des digues ;
- à Dublin et Bradford dans le cadre de FloodResilienCity. Ici, les tests concerneront les réseaux. Notons que l'obtention des données a été relativement simple car ces deux villes sont aussi gestionnaires de leurs réseaux ;
- à Dordrecht et Trondheim dans le cadre de FloodProBE. Les données sont en cours de collectes, des tests sur les réseaux seront réalisés, et nous ne savons pas à l'heure actuelle si des tests sur les ouvrages de protections seront réalisés ;
- à Paris dans le cadre de Paris Résiliente concernant la résilience des réseaux. L'étendue des tests dépendra de la localisation des données obtenues ;
- à la Nouvelle Orléans grâce au mémoire de Master de Mireia Balsells Mondejar. Ces tests sont réalisés hors projet pour l'instant, mais des accords devraient voir le jour avec l'Université de la Nouvelle Orléans. Notons que ces tests consistent en une évaluation de la résilience d'un quartier spécifique, intégrant déjà des questions d'urbanisme et d'architecture.

Les résultats de ces tests seront publiés courant 2012 et 2013.

Références bibliographiques

- Aangeenbrug, R. T. 1991. A critique of GIS. In *Geographical Information System: Principles and Applications*, eds. D. J. Maguire, M. F. Goodchild & D. Rhind, 101-107. Longman.
- Ahern, J. (2011) From fail-safe to safe-to-fail: Sustainability and resilience in the new urban world. *Landscape and Urban Planning*, In Press, Corrected Proof.
- 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.
- Azibi, R. 2003. Construction de critères en aide à la décision : aspects méthodologiques, techniques et pratiques. In *UFR Sciences Des Organisations*, 160. Paris: Thèse de doctorat, Université Paris Dauphine.
- Barroca, B. 2006. Risque et vulnérabilités territoriales - Les inondations en milieu urbain. 340 p.: Marne-la-Vallée.
- Barthélémy, M., R. Setola & A. Vespignani (2011) Réseaux vitaux : attention fragile. *Science et Vie*, Juillet 2011, 82-95.
- Berry, B. J. L. (1964) Cities as systems within systems of cities. *Regional Science Association*, vol. 13, pp. 147-163.
- Berthaud, C. 2004. Proposition d'une méthode d'intégration d'indicateurs de performance des digues dans le SIRS Dignes. 66. Rapport de stage pour l'obtention de la Maîtrise de Sciences et Techniques de Cartographie, Université d'Orléans.
- Blanksby, J., R. Ashley & D. Serre. 2009. A user focused portal for awareness raising and knowledge dissemination for flood risk management. In *International Conference on Urban Flood Management, Road map towards a flood resilient urban environment Session*, 8. UNESCO, Paris.
- 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.
- Bouchon, S. (2006) L'application du concept de vulnérabilité aux infrastructures critiques: quelles implications pour la gestion territoriale des risques? *Annales des Mines - Responsabilité & Environnement*, 43, pp. 35-41.
- Brand, F. S. & K. Jax (2007) Focusing the meaning (s) of resilience: resilience as a descriptive concept and a boundary object. *Ecology and Society*, 12, 23-23.
- Britton, N. R. & G. J. Clark (2000) From response to resilience: emergency management reform in New Zealand. *Natural Hazards Review*, 1, 145-145.
- Bruneau, M., S. E. Chang, R. T. Eguchi, G. C. Lee, T. D. O'Rourke, A. M. Reinhorn, M. Shinozuka, K. T. Tierney, W. A. Wallace & D. Von Winterfeldt (2003) A framework to quantitatively assess and enhance the seismic resilience of communities. *Earthquake Spectra*, 19, pp. 733-752.
- Burrough, P. A. (1990) Methods of spatial analysis in GIS. *International Journal of Geographical Information System*, vol 4, 221-223.
- Callon, M. & M. Ferrary (2006) Les réseaux sociaux à l'aune de la théorie de l'acteur-réseau. *Sociologies pratiques*, 13, 37-44.
- Campanella, T. (2006) Urban Resilience and the Recovery of New Orleans. *Journal of the American Planning Association*, 72, 141-146.

- Cardona, O. D. (2003) The Need for Rethinking the Concepts of Vulnerability and Risk from a Holistic Perspective : A Necessary Review and Criticism for Effective. *Development*.
- Carpenter, S., B. Walker, J. M. Anderies & N. Abel (2001) From Metaphor to Measurement: Resilience of What to What? *Ecosystems*, 4, 765-781.
- CEA. 2000. A guide to dam risk management. Canadian Electricity Association - Dam Safety Interest Group.
- Clarke, K. R. & R. M. Warwick (1998) Quantifying structural redundancy in ecological communities. *Oecologia*, 113, 278-289.
- Clarke, M. 1990. Geographic Information System and model based analysis: toward effective decision support. In *Geography in America*, eds. H. J. Scholten & J. C. H. Stillwell, 165-175. Kluwer, Dordrecht.
- Coeveld, E. M., J. G. Knoeff, A. Bizarri & M. Klein Breteler. 2004. Residual strength of a dike after failure of cover layer. In *29th ICCE conference proceedings*, 14. Lisbon, Portugal.
- Correc, O. 2005. Approche probabiliste de prédiction des risques de dégradation des réseaux de distribution d'eau à l'intérieur des bâtiments. Thèse de doctorat, Université de Marne la Vallée.
- COST22. 2008. Prof. Richard Ashley, Dr. Andreas Vassilopoulos, Prof. Erik Pasche, Prof. Chris Zevenbergen, UNESCO: Advances in Urban Flood Management.
- Cremona, C. 2002. *Application des notions de fiabilité à la gestion des ouvrages existants*. Association Française de Génie Civil.
- Cutter, S., L. Barnes, M. Berry, C. Burton, E. Evans, E. Tate & J. Webb (2008) A place-based model for understanding community resilience to natural disasters. *Global Environmental Change*, 18, 598-606.
- Dague, P. & L. Travé-Massuyès. 2004. Raisonement causal en physique qualitative. 32. Rapport LAAS 04322.
- Daly, F., C. De La Personne & L. Chapital. 2004. Etat des lieux patrimonial des digues de canaux de navigation en France. In *Sécurité des digues fluviales et de navigation, CFGB - MEDD*, ed. Cemagref, 21-45. Orléans, France.
- Daskin, M. S. 1995. *Network and Discrete Location - Models, Algorithms and Applications*. New York: John Wiley and Sons.
- Dauphiné, A. & D. Provitolo. 2004. Résilience, risque et SIG.
- (2007) La résilience: un concept pour la gestion des risques. *Annales de géographie*, 2007/2, 11.
- Davidson-Hunt, I. J. & F. Berkes. 2003. Nature and society through the lens of resilience: toward a human-in-ecosystem perspective. In *Navigating Social-Ecological Systems: Building Resilience for Complexity and Change*, ed. C. U. Press, pp. 53-82. Cambridge: In F. Berkes, J. Colding and C. Folke (eds.).
- Denègre, J. & F. Salgé. 2004. *Les systèmes d'information géographique*. Que sais-je ?, PUF.
- Diab, Y. 2008. *La ville durable, urgences et utopies*. Paris: EIVP, Les Carrefours du Génie Urbain.
- Domingo, S. 2010. Urban road network resilience to flood assessment: proposition of a methodology 121 p. Paris - Barcelona: M.Sc. Student, EIVP, Paris, France - Escola Tècnica Superior d'Enginyers de Camins, Canals i Ports de Barcelona (ETSECCPB), Universitat Politècnica de Catalunya (UPC).
- Dovers, S. R. & J. W. Handmer (1992) Uncertainty, sustainability and change. *Global Environmental Change*, Vol 2, pp. 262-276.
- Dueñas-Osario, L. 2005. Interdependent Response of Networked Systems to Natural Hazards and Intentional Disruption Georgia Institute of Technology.

- Dumolard, P. 1992. Les fonctions d'analyse dans les SIG du futur. In *Conférence de l'information géographique numérique MARI 92*, ed. CNIT. Paris, France.
- 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.
- EIVP. 2009. La recherche à l'EIVP, bilan 2008 - 2009 58. Paris.
- Felts, L. 2005. Vulnérabilité des réseaux urbains et gestion de crise. 78 p.: CERTU.
- Figeac, N. 2003. Ecriture des scénarios de vieillissement des barrages en remblai à partir d'une méthodologie basée sur la modélisation fonctionnelle et de l'analyse d'expertise. 199. Mémoire présenté pour l'obtention du diplôme d'ingénieur en génie civil, CUST, Université Blaise Pascal Clermont 2.
- Fiksel, J. (2003) Designing resilient, sustainable systems. *Environmental science & technology*, 37, 5330-9.
- Fischer, M. M. & P. Nijkamp. 1993. design and use of geographic information system and spatial models. In *Geographic information system, spatial modelling, and policy evaluation*, eds. M. M. Fischer & P. Nijkamp. EDS.
- Folke, C., S. Carpenter, T. Elmqvist, L. Gunderson, C. S. Holling & B. Walker. 2002. *Resilience and sustainable development: building adaptive capacity in a world of transformations*.
- Fontaine, M. & A. C. Steinemann (2009) Assessing Vulnerability to Natural Hazards: Impact-Based Method and Application to Drought in Washington State. *SCE Natural Hazards Review* A10(1), p.11-18.
- Galland, J.-P. (2010) Critique de la notion d'infrastructure critique. *Flux*, 81, pp. 6-18.
- Galvao, R. D. (1993) Use of Lagrangean Relaxation in the Solution of Uncapacited Facility Location Problems. *Location Science*, Vol 1, pp. 57-70.
- Garvin, S. L. 2005. Flood damage to buildings. In *Urban Flood Management*. London: Taylor and Francis Group.
- Gervais, R., L. Peyras, D. Serre, L. Chouinard & Y. Diab (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, pp. 335-356.
- Gleyze, J.-F. 2005. La vulnérabilité structurelle des réseaux de transport dans un contexte de risques. In *Laboratoire COGIT*, 848 p. Paris: Paris VII-Denis Diderot.
- Gleyze, J.-F. & M. Reghezza (2007) La vulnérabilité structurelle comme outil de compréhension des mécanismes d'endommagement. *Géocarrefour*, 82, pp. 17-26.
- Godschalk, D. R. (2003) Urban hazard mitigation: creating resilient cities. *Natural Hazards Review*, 4, pp. 136-143.
- Gomez, S. 2011. Potentiality of a GIS open source software for urban flood resilience assessment. Paris: M.Sc. Student, Escuela Técnica Superior de Ingeniería Geodésica, Cartográfica y Topográfica (ETSIGCT), Universidad Politécnica de Valencia.
- Goodchild, M. F. (1992) Geographical Information Science. *International Journal of Geographical Information System*, vol 6, 31-45.
- Gorman, S. P., L. Schintler, R. Kulkarni & R. Stough (2004) The Revenge of Distance: Vulnerability Analysis of Critical Information Infrastructure. *Science*, 1-43.
- 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.
- Gunderson, L. H. & C. S. Holling. 2002. *Panarchy: Understanding Transformations in Human and Natural Systems*. Washington DC: Island Press.

- Hakimi, S. L. (1965) Optimum Distribution of Switching Centers in a Communication Network and Some Related Graph Theoretic Problems. *Operations Research*, Vol 13, pp. 462-475.
- Handler, G. Y. & P. B. Mirchandani. 1979. *Locations on Networks*. Cambridge, MA: MIT Press.
- 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, pp. 124-138.
- Holling, C. S. (1973) Resilience and stability of ecological systems. *Annual Review of ecology and systematics*, 4, 23 p.
- Holme, P., B. J. Kim, C. N. Yoon & S. K. Han (2002) Attack vulnerability of complex network. *Physical Review. E*, 65, 15 p.
- IPCC. 2007. Summary for Policymakers, 4th Assessment Report.
- ISDF. ? AMDEC- Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité - guide pédagogique. 36. Ed. ISDF - Institut de la Sûreté de Fonctionnement.
- Jankowski, P. & T. Nyerges (2001) GIS-Supported Collaborative Decision Making: Results of an Experiment. *Annals of the Association of American Geographers*, 91, pp. 48-70.
- Jankowski, P., T. L. Nyerges, A. Smith, T. J. Moore & E. Horvath (1997) Spatial group choice: a SDSS tool for collaborative spatial decision-making. *International Journal of Geographical Information Science*, 11, pp. 577-602.
- Johnson, P. A. (1999) Fault tree analysis of bridge failure due to scour and channel instability. *Journal of infrastructure system*, Vol 5, 35-36.
- Joliveau, T. 2004. Géomatique et gestion environnementale du territoire - Recherches sur un usage géographique des SIG. In *CRENAM Saint-Etienne*: Université Jean Monnet.
- Kempenaar, A. 2010. Strategies to enable Urban Communities to respond to a Changing Environment and Shift to Sustainability, Proposal for a Collaborative Project (large scale integrating project) - PART B Topic FP7 ENV. 2011.2.1.5 Sustainable and Resilient Green Cities. 92.
- Kessler, C. 2004. Design and implementation of argumentation maps. In *IFGI*, 94 p.: University of Münster.
- Klein Breteler, M., K. W. Pilarczyk & R. Hart. 2000. Influence of ageing and wide wave spectra on stability of placed block revetments. In *International conference on coastal engineering*, 13. Sydney, Australia.
- Klein, R., R. Nicholls & F. Thomalla (2003) Resilience to natural hazards: How useful is this concept? *Global Environmental Change Part B: Environmental Hazards*, 5, 35-45.
- Laaribi, A. 2000. *SIG et analyse multicritère*. Paris: Hermès Editions.
- Laffréchine, K. 1999. Base de données urbaine pour la gestion des réseaux d'assainissement non-visibles. 170. Thèse de doctorat, Université Bordeaux 1.
- Lair, J. 2000. Evaluation de la durabilité des systèmes constructifs du bâtiment. 213. Thèse de doctorat, Université Blaise Pascal - Clermont 2.
- . 2003. Méthodes opérationnelles pour la prise en compte de la durabilité dans la norme ISO 15686 "Service Life Planning". In *21ème Rencontres de Génie Civil*, 381-388. Université de La Rochelle, France.
- Lamarre, D. 2008. *Climat et risques, changements d'approches*. Lavoisier.
- Lepetit, L. 2002. Etude d'une méthode de diagnostic des digues avec prise en compte du risque de liquéfaction. 207. Thèse de doctorat, Université Blaise Pascal - Clermont 2.
- Lhomme, S. 2009. Systemic approach to model urban environment and urban linear infrastructures. Use of safety methods to assess the vulnerability of the urban system and sub-systems Paris: M.Sc. student, Ecole Nationale des Sciences Géographiques, Marne la Vallée, France.

- Lhomme, S., D. Serre, Y. Diab & R. Laganier (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.
- . 2011. A methodology to produce interdependent networks disturbance scenarios. In *International Conference on Vulnerability and Risk Analysis and Management*, ed. A. S. o. C. Engineers, 10 p. University of Maryland, Hyattsville, MD, USA.
- Manojlovic, N. & E. Pasche (2008) Integration of resiliency measures into flood risk management concepts of communities. *Flood Recovery, Innovation and Response I*, 118, 235-245.
- Maret, I. & T. Cadoul (2008) Résilience et reconstruction durable : que nous apprend La Nouvelle-Orléans ? *Annales de géographie*, 663, pp. 104-124.
- Maurel, P., D. Serre & R. Tourment. 2004. Towards a generic GIS for dike management in flood plain areas: from conceptual design to real applications. In *AGILE 2004 conference on Geographic Information Science*, 14. Heraklion, Greece.
- Mayunga, J. S. 2007. Understanding and applying the concept of community disaster resilience: a capital-based approach. In *Summer academy for social vulnerability and resilience building*, 16 p. Munich, Germany.
- 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.
- Mériaux, P. & C. Folton. 2005. Sécurité de la digue de Cazouls d'Hérault. Recommandations pour le traitement de la végétation. Compléments de diagnostic génie civil. 12. Rapport de mission Cemagref.
- Mériaux, P., P. Royet & C. Folton. 2001. *Surveillance, entretien et diagnostic des digues de protection contre les inondations*. Cemagref Editions.
- Mériaux, P., R. Tourment & M. Wolff. 2004. Le patrimoine de digues de protection contre les inondations en France. In *Sécurité des digues fluviales et de navigation, CFGB - MEDD*, ed. Cemagref, 9-20. Orléans, France.
- Mileti, D. 1999. *Disasters By Design*. Washington, DC: Joseph Henry Press.
- Moins, I. 2005. Le SIRS Dignes, un Système d'Information pour les gestionnaires locaux de digues. In *colloque SIRNAT/JPRN*, 7. Montpellier, France.
- Olsson, P., C. Folke & F. Berkes (2004) Adaptive Comanagement for Building Resilience in Social-Ecological Systems. *Environmental Management*, 34, pp. 75-90.
- Pairat, J.-Y. 2009. Méthodologie d'évaluation de la résilience. In *Centre Risque et Performance*, 164 p.: Montréal.
- Parrochia, D. 2008. *La Forme des Crises, logique et épistémologie*. Paris: eds Champ Vallon.
- Pasche, E. & T. R. Geisler. 2005. New strategies of damage reduction in urban areas prone to flood. In *Urban flood management*, pp 101-117. London: Taylor and Francis Group.
- Pelling, M. 2003. *The Vulnerability of Cities: social resilience and natural disaster*. London.
- Petit, O. 2002. De la coordination des actions individuelles aux formes de l'action collective: une exploration des modes de gouvernance des eaux souterraines. In *C3ED*, 410 p.: Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines.
- Peyras, L. 2003. Diagnostic et analyse de risques liés au vieillissement des barrages, développement de méthodes d'aide à l'expertise. 199. Thèse de doctorat, Université Blaise Pascal - Clermont 2.
- . 2009. Evaluation de la performance et des risques des ouvrages hydrauliques de génie civil, Habilitation à Diriger des Recherches. 152 p. Clermont Ferrand: Université Blaise Pascal.

- Pigeon, P. 2005. *Géographie critique des risques*. Paris.
- Pilarczyk, K. W. 1998. *Dikes and revetments. Design, maintenance and safety assessment*. Rotterdam, Netherlands: A.A. Balkema.
- . 2003. Integrated approach and future needs in coastal engineering: general remarks. In *International conference on estuaries and coasts*, 363-371. Hangzhou, Chine.
- Pinel, W. 2009. La résilience organisationnelle : concepts et activités de formation. In *Centre Risque et Performance*, 142 p.: Montréal.
- Pomero, C. 2001. Ecriture des scénarios de vieillissement des barrages poids à partir d'une méthodologie basée sur la modélisation fonctionnelle et de l'analyse d'expertise. 99. Mémoire présenté pour l'obtention du diplôme d'ingénieur en génie civil, CUST, Université Blaise Pascal - Clermont 2.
- Prévoit, C. 2005. Evaluation de l'état des digues. Couplage d'une méthode multicritère avec un SIG. 91. Rapport de stage de Master Pro 2 IMST (Image, Multimédia et Sciences de la Terre) Université de Nice.
- Provitolo, D. 2009. Vulnérabilité et résilience : géométrie variable de deux concepts. In *séminaire résilience de l'ENS*. Paris, 2009.
- Pumain, D., L. Sanders & T. Saint-Julien. 1995. *Villes et auto-organisation* Economica.
- Rakotonirina, J. 2010. A GIS based solution to evaluate urban network sensitivity to flood Paris: M.Sc. Student, Geographic Information Sciences, Paris Est University, France.
- Ramsey, K. (2009) GIS, modeling, and politics: On the tensions of collaborative decision support. *Journal of Environmental Management*, 90, pp. 1972-1980.
- Reghezza, M. 2006. Réflexions autour de la vulnérabilité métropolitaine : la métropole parisienne face au risque de crue centennale. In *Ecole doctorale Milieux, cultures et sociétés du passé et du présent*, 384 p. Nanterre: Paris X.
- ResilienceAlliance. 2007. Urban resilience research prospectus. eds. C. Australia, A. S. U. USA & S. U. Sweden, 24 p.
- Revelle, C. & R. Swain (1970) Central Facilities Location *Geographical Analysis*, Vol 2, pp. 30-40.
- Rinner, C. 2006. Argumentation mapping in collaborative spatial decision making. In *Collaborative GIS*, eds. S. Dragicevic & S. Balram, pp. 85-102. Idea Group Publishing.
- Robert, B. & L. Morabito. 2009a. *Réduire la vulnérabilité des infrastructures essentielles*. Lavoisier.
- Robert, B., W. Pinel, J.-Y. Pairet, B. Rey & C. Coeugnard. 2009b. Résilience organisationnelle - Concepts et méthodologie d'évaluation. 48 p. Université Polytechnique de Montréal: Centre Risque & Performance.
- Roe, E. 2010. Terms, Definitions and Concepts Related to Critical Infrastructures, Chokepoints & Services. In *RESIN Working Paper*, ed. C. f. C. R. Management, 24 p. Berkeley: University of California.
- Roy, B. & D. Bouyssou. 1993. *Aide multicritère à la décision : méthodes et cas*. Paris: Editions Economica.
- Sanders, L. 1992. *Système de villes et synergétique*. Economica, Anthropos.
- Serre, D. 2005. Evaluation de la performance des digues de protection contre les inondations. 366 p.: Marne-la-Vallée.
- Serre, D., P. Maurel, L. Peyras, R. Tourment & Y. Diab (2006) Methods and solutions to control flooding risk in dyked up systems. Levee failure models linked with a GIS. *European Journal of GIS and Spatial Analysis*, vol n°16/3-4, pp. 479-498.
- Serre, D., L. Peyras, P. Maurel & Y. Diab (2009) A spatial decision support system aiding levee managers in their repair and maintenance planning. *Lavoisier, Journal of Decision Systems*, vol 18, pp. 347-373.

- Serre, D., L. Peyras, R. Tourment & Y. Diab (2008) Levee performance assessment: development of a GIS tool to support planning maintenance actions. *ASCE, Journal of Infrastructure System*, Vol. 14, pp. 201-213.
- Sianipar, P. R. M. & T. M. Adams (1997) Fault-tree model of bridge element deterioration due to interaction. *Journal of infrastructure system*, september 1997, 103-110.
- Simon, H. A. 1991. *Sciences des systèmes Sciences de l'artificiel*. Paris: Dunod.
- 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. 2011. An auto-diagnosis tool to improve urban resilience: the RATP case study. In *How the concept of resilience is able to improve urban risk management? A temporal and spatial analysis*, 8. Paris.
- Toubin, M., D. Serre, Y. Diab & R. Laganier. 2011. Improve urban resilience by a shared diagnostic integrating technical evaluation and governance. In *European Geoscience Union (EGU)*. Vienna, Austria.
- Travé-Massuyès, L., P. Dague & F. Guerrin. 1997. *Le raisonnement qualitatif pour les sciences de l'ingénieur*. Paris: Hermes.
- 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.
- UN/ISDR. 2002. Living with Risk: A Global Review of Disaster Reduction Initiatives. Preliminary version prepared as an interagency effort co-ordinated by the ISDR Secretariat Geneva, Switzerland.
- UNIT. 2011. Les méthodes d'analyse de risques. In *Cyberrisques*.
- Valadas, E. 2003. Identification des scénarios de dégradations des chaussées bitumineuses épaisses. 148. Mémoire présenté pour l'obtention du diplôme d'ingénieur en génie civil, CUST, Université Blaise Pascal Clermont 2.
- Van, M. 2008. Technologies for the cost-effective Flood Protection of the Built Environment. 84 p. Deltares.
- van Ree, C. C. D. F., M. A. Van, K. Heilemann, M. W. Morris, P. Royet & C. Zevenbergen (2011) FloodProBE: technologies for improved safety of the built environment in relation to flood events. *Environmental Science & Policy*, In Press, Corrected Proof.
- Veyret, Y. 2003. *Les risques*. Paris: SEDES.
- Vigneron, 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.
- Villemeur, A. 1988. *Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels. Fiabilité - Facteurs humains - Informatisation*. Editions Eyrolles.
- Vilmin, T. 2008. Aménagement urbain en France. Une approche systémique. CERTU.
- Vincke, P. 1989. *L'aide multicritère à la décision*. Bruxelles: Editions Ellipses.
- Vinet, F. 2010. *Le risque inondation : diagnostic et gestion*. Lavoisier.
- Walker, B., S. Carpenter, J. Anderies, N. Abel, G. Cumming, M. Janssen, L. Lebel, J. Norberg, G. D. Peterson & R. Pritchard (2002) Resilience management in social-ecological systems: a working hypothesis for a participatory approach. *Conservation Ecology*, 6, 17 p.
- Watts, D. J. & S. H. Strogatz (1998) Collective dynamics of 'small-world' networks. *Nature*, Vol 393, pp. 440-442.

- Weber, A. 1909. *Über den Standort der Industrien*, Tübingen, Traduction Anglaise de Friedrich (1929) *Theory of the Location of Industries*. Chicago: University of Chicago Press.
- White, G. F. & J. E. Haas. 1975. *Assessment of Research on Natural Hazards*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Wisner, B., K. Westgate & P. O'Keefe (1976) Taking the naturalness out of the natural disaster. *Nature*, p. 566-567.
- Zevenbergen, C., A. Cashman, N. Evelpidou, E. Pasche, S. L. Garvin & R. Ashley. 2011. *Urban Flood Management*. London, UK: Taylor and Francis Group.
- Zwingelstein, G. 1995. *Diagnostic des défaillances. Théorie et pratique pour les systèmes industriels*. Paris: Hermès Editions.
- . 1996. *La maintenance basée sur la fiabilité. Guide pratique d'application de la RCM*. Paris: Hermès Editions.

Annexes : CV Damien Serre

CURRICULUM VITAE

Damien SERRE

Docteur en Sciences de l'Information Géographique

Octobre 2011

35 ans
né le 05 mai 1976
Nationalité française

Adresse permanente: 29, avenue Paul Déroulède
94300 Vincennes
FRANCE

E-mail : damien.serre@eivp-paris.fr
Tel : 00 33 6 67 90 26 42

Intérêt scientifique

Je possède un Doctorat en Sciences de l'Information Géographique. J'ai utilisé ces sciences dans le domaine du génie civil durant ma thèse, en particulier pour l'amélioration du dispositif de gestion des digues de protection contre les inondations. En effet, la particularité de ces ouvrages est leur grande longueur qui complique leur gestion. C'est pourquoi nous avons fait le choix de privilégier une recherche dans le domaine des Systèmes d'Information Géographiques (SIG). En parallèle, l'analyse systémique, la Sûreté de Fonctionnement et les méthodes d'aide à la décision multicritères ont été employées pour modéliser les mécanismes de rupture des digues et pour évaluer l'état et la performance des digues. Enfin, ces méthodes ont été couplées à un SIG pour obtenir un système d'aide à la décision à référence spatiale permettant aux gestionnaires de digues de prioriser les opérations de maintenance grâce à la visualisation du niveau de performance de leur parc de digues.

Aujourd'hui, mes recherches ont pour finalité la formalisation des connaissances utiles pour l'aide à la décision et pour l'aide à la conception de villes résilientes aux inondations. En particulier et en préliminaire, l'évaluation de la résilience urbaine vis-à-vis du risque inondation constitue l'apport principal de mes recherches pour permettre de s'appuyer sur un socle scientifique solide en vue de la fabrication de la ville résiliente, à moyen terme. Les méthodes employées et les outils développés, ou en cours de développement, ont pour objectifs d'une part d'informer sur le niveau de résilience de la ville par rapport à des scénarios d'inondation, d'autre part d'aider sur les décisions à prendre pour augmenter le niveau de résilience des territoires urbains.

Cette recherche est donc transdisciplinaire et au service de la ville. La discipline scientifique principale utilisée dans le cadre de nos recherches est le Génie Urbain, discipline par essence transversale faisant appel à d'autres disciplines, parmi lesquelles la systémique, la Sûreté de Fonctionnement, la théorie des graphes, la recherche opérationnelle, la géographie urbaine et la géographie des risques, l'aide à la décision et les Sciences de l'Information Géographique.

Cette recherche s'appuie essentiellement sur trois concepts :

- **le concept de gestion patrimoniale des ouvrages de génie civil appliqué aux digues de protection contre les inondations.** Notre apport scientifique consiste en la production d'un modèle fonctionnel déterministe de l'évaluation de la performance des digues vis-à-vis de leurs mécanismes de rupture. Les méthodes employées proviennent de la Sûreté de Fonctionnement et de l'aide à la décision multicritère.
- **le concept de résilience urbaine en réponse à une gestion des risques jusqu'alors centrée sur la gestion des aléas.** Le développement d'une méthodologie d'évaluation de la résilience des réseaux techniques urbains est l'objectif. Pour cela, nous analysons la capacité de résistance des réseaux, leur capacité d'absorption et leur capacité de récupération. Nous nous appuyons sur le modèle fonctionnel développé pour les digues, ensuite nous proposons la conception d'un indicateur de redondance des réseaux sur la base de la théorie des graphes et de travaux de géographie des réseaux.
- **le concept de système d'information à référence spatiale d'aide à la décision à destination des gestionnaires d'ouvrages de génie civil, des gestionnaires des réseaux techniques urbains, des collectivités territoriales et des services de l'Etat.** Nous utilisons les Sciences de l'Information Géographiques pour enrichir les fonctionnalités classiques des systèmes d'information existant avec les connaissances

produites en termes de performance et de résilience. Il s'agit d'améliorer les capacités d'analyse des systèmes d'information par l'incorporation de nos modèles, avec, *in fine*, un objectif d'aide à la décision pour la ville résiliente aux inondations.

La recherche entreprise est partenariale et s'opère dans plusieurs projets de recherche comme FloodProBE, FloodResilienCity, Resilis et Paris Résiliente. Les partenaires liés à cette recherche collaborative et applicative sont nombreux, internationaux et de nature différente.

Parmi les partenaires académiques, cette recherche est menée avec le Cemagref, le laboratoire PRODIG (co-directions de thèses), le LEESU (Equipe Génie Urbain), l'Université de Sheffield (UK), aussi, mais dans des objectifs plus opérationnels, avec Deltares (NL) et Sintef (N). Sur le plan industriel, les Groupe Egis et Sogreah sont impliqués côté français, tout comme HR Wallingford (UK) et Dura Vermeer (NL). Enfin, puisque notre recherche est appliquée, plusieurs collectivités territoriales participent à cette recherche et bénéficient des résultats : la Ville de Paris et les Grands Lacs de Seine en Ile de France, le Conseil Général du Loiret, l'AgglO et la Ville d'Orléans sur le Bassin de la Loire, et, à l'international, les Villes de Bradford (UK), Dublin (Irl), Mainz (D), Bruxelles et Leuven (B), Rotterdam et Dordrecht (NL), Trondheim (N), Prague (CZ), puis, La Nouvelle-Orléans (USA).

Référents

1. James Amdal, Department of Planning & Urban Studies, Director Merritt C. Becker Maritime and Intermodal Transportation Center (MITC), University of New Orleans, USA, jamdal@uno.edu
2. Pr. Richard Ashley, Urban Water, Department of Civil and Structural Engineering, University of Sheffield, and adviser to the Flood Resilience Group at UNESCO-IHE, UK, ashley@sheffield.ac.uk
3. Dr. Vincent Becue, Doyen de la Faculté d'Architecture, Université de Mons, Belgique, vincent.becue@archimons.be
4. Pr. Bernard Cervelle, Sciences de l'Information Géographique, IFG, Université Paris Est, France, cervelle@univ-mlv.fr
5. Pr. Youssef Diab LEESU, Génie Urbain, Université Paris Est, Directeur Scientifique de l'EIVP, France, ydiab@univ-mlv.fr
6. Pr. Richard Laganier, Géographe, Université Paris Diderot (Paris 7), France, richard.laganier@paris7.jussieu.fr
7. Dr. Laurent Peyras, Génie Civil, Directeur de l'Unité de Recherche « Ouvrages Hydrauliques et Hydrologie », Cemagref, France, Laurent.Peyras@aix.cemagref.fr

Prix et distinctions

2010

Le prix de l'architecte espoir : « La ville en jeu(x) »

Site de l'école d'Application de l'infanterie – EAI, Ville de Montpellier, France

http://www.montpellier.fr/TPL_CODE/TPL_ESPACEPRESSE/PAR_TPL_IDENTIFIANT/2595/2868-appel-a-idees-site-de-l-eai.htm

2005

Serre, D., 2005. Planifier les interventions d'inspection et de maintenance des digues fluviales, 23ème Rencontres Universitaires de Génie Civil, classé 4^{ème} du Prix Jeunes Chercheurs, Université Joseph Fourier, Grenoble, France, 8 p.

Emplois et qualifications

Depuis 2007-09 : EIVP, Ecole des Ingénieurs de la Ville de Paris, Paris.

Enseignant-chercheur, responsable du pôle « construction ». Coordination des enseignements au sein du pôle « construction ». Enseignements dans le domaine de la gestion patrimoniale des ouvrages de génie civil, de la gestion de crues, des impacts environnementaux et de la sensibilisation à la recherche. Montage et suivi de projets de recherche dans le domaine du génie urbain.

2007, 6 mois : HR Wallingford, Flood Group, CDI, Wallingford, Oxfordshire, UK.

Scientifique. Participation à plusieurs projets visant à mieux maîtriser le risque d'inondation en Angleterre et aux Pays de Galles : évaluation de la fiabilité des ouvrages de protection contre les crues, mise en place de méthodes de gestion patrimoniale des ouvrages, calcul de probabilités annuelles de rupture, développement d'outils spatiaux d'aide à la décision.

2006 : Cemagref, Unité de Recherche « Ouvrages Hydrauliques », CDD, Aix en Provence.

Poursuite du projet de R&D dans un cadre opérationnel : étendre, à tous les types de digues, la méthode d'évaluation de la performance des ouvrages mise au point sur le cas des digues à étanchéité amont, durant la thèse, pilotage et animation d'un groupe de 5 experts, application opérationnelle des méthodes sur des digues avec l'appui des gestionnaires.

2002 – 2005 : Doctorat en Science de l'Information Géographique (SIG), Université de Marne la Vallée.

Ecole doctorale « Ville et Environnement », rattachée à l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées. Thèse dirigée par Y. DIAB, Laboratoire de Génie Urbain, Environnement et Habitat, université de Marne-la-Vallée, financée et encadrée par le Cemagref (Aix-en-Provence et Montpellier).

Titre : « Evaluation de la performance des digues de protection contre les inondations. Modélisation de critères de décision dans un Système d'Information Géographique »

Thèse soutenue le 9 décembre 2005 à Montpellier, France, devant le jury composé de :

- Bernard CERVELLE, Pr. Emérite, UMLV, Paris
- Roger COJEAN, Pr., Ecole des Mines, Paris
- Youssef DIAB, Pr., UMLV, Paris
- Pascal LE GAUFFRE, Maître de conférences, INSA, Lyon
- Pierre MAUREL, IR, UMR TETIS, Montpellier
- Laurent PEYRAS, Docteur-Ingénieur, Cemagref, Aix en Provence
- Rémy TOURMENT, IR, Cemagref, Aix en Provence

Mention Très Honorable avec les félicitations du jury à l'unanimité.

Le mémoire de thèse est téléchargeable à l'adresse suivante :
91.121.162.160/THE/SERRE.pdf

2002 : CIRAD (Cultures Annuelles), service modélisation, Guadeloupe, Volontaire Civil de l'Aide Technique (VCAT).

Mise en place d'un Système d'Information Géographique (SIG) dédié à la modélisation de la production de la canne à sucre. Utilisation d'un GPS différentiel pour la mise à jour cartographique. Appui à la recherche en géomatique. Formation du personnel à l'utilisation des outils et encadrement lors des missions de terrain.

2001 : IRD (ex-ORSTOM), maison de la télédétection à Montpellier, stagiaire en DEA.

Stage de télédétection : élaboration à partir d'images SPOT d'un Système d'Information Environnemental (SIE) pour les zones côtières tropicales à potentialités aquacoles. Application à la côte malgache.

2001 : Etudiant du DEA SIG « Science de l'Information Géographique » (mention A-bien).

Cohabité par l'Université Marne-la-Vallée, l'Ecole Nationale des Sciences Géographiques (ENSG-IGN) et l'Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications (ENST).

2000: SODENA, Paris, France.

Scientifique du Contingent (Marine Nationale). Acquisition et traitement de données bathymétriques et sédimentologiques issues de satellites NOAA avec applications SIG (wingis et logiciel de navigation) et 3D (surfer et terramodel).

1998 : Ville de Grenoble, service environnement, stagiaire en Maîtrise.

Acquisition et traitement de données relatives aux nuisances sonores (trafic, urbanisme, météo...). Détermination du niveau sonore des voies en fonction des données avec le logiciel Cartobruit du CERTU. Réalisation d'une cartographie de la pollution sonore sous Mapinfo.

1996 – 1999 : Etudiant en IUP « Aménagement et Développement Territorial » (maîtrise mention A-bien).

UFR de géographie, université Joseph Fourier, Institut de Géographie Alpine (IGA), Grenoble.

Compétences

Aménagement du territoire

- Réseaux et systèmes territoriaux, diagnostic territorial
- Structures de territoires, gestion du territoire, stratégies d'acteurs
- Milieux anthropisés, évaluation et gestion environnementale
- Analyse des paysages urbains et ruraux, des espaces et des milieux

Génie civil

- Modélisation fonctionnelle de ruptures d'ouvrages hydrauliques (digues, barrages, réseaux d'eau)
- Gestion patrimoniale des ouvrages : digues, barrages, réseaux d'eau (AEP), réseaux routiers, ferrés, de transports d'énergie
- Analyse de risque : méthode de sûreté de fonctionnement (AMDE, Arbres des causes...)
- Cycle de vie, inspection, maintenance, réparation, développement durable

Géomatique

- Logiciels SIG : Gamme ESRI, Mapinfo, Géoconcept
- GPS : acquisition de données, traitements différentiels, couplage SIG
- Télédétection : traitements géométriques et radiométriques de l'image avec les logiciels Géoimage et ERDAS Imagine. Couplage SIG
- Cartographie et analyse spatiale
- Statistiques
- Méthodes d'analyse multicritère
- Analyse/conception de SIRS

Géographie

- Géographie physique : climatologie, hydrologie, biogéographie, pédologie, géomorphologie, cycle de l'eau
- Géographie sociale : milieux anthropisés, démographie, géopolitique

Langues

- Français : langue maternelle
- Anglais : bon niveau
- Allemand : niveau scolaire mais perfectible

Enseignement

Depuis 2010

- Responsable de projet à l'EIVP, Paris, IVP 1, semestre 2 "projet résilience urbaine" (12h), L'objectif du projet sur 'La ville résiliente' est de travailler sur les moyens à mettre en œuvre pour arriver à une ville capable de maintenir ses fonctionnalités durant une perturbation et de revenir le plus vite possible à une situation « normale » à la suite d'une catastrophe. Travail de recueil d'information et de données, analyse des résultats sur des cas réels de catastrophes urbaines, élaboration de proposition et soutenance.

Depuis 2008

- Responsable de projet à l'EIVP, Paris, IVP 2, semestre 1 "projet construction" (60h), L'objectif est de mettre les étudiants en situation de conception architecturale et technique d'un bâtiment sur la base d'un programme. Il s'agit de mobiliser l'ensemble des connaissances acquises dans les différents enseignements du pôle construction. Ce projet est donc une mise en application des cours du pôle construction dans le respect d'une logique de projet
- Responsable de cours à l'EIVP, Paris, IVP 1, semestre 2, "Sols et sous-sols urbains" (30h) : introduction, urbanisme souterrain, aspects juridiques et économiques, travaux souterrains, visite de terrain
- Chargé de cours à l'EIVP, Paris, IVP 1, semestre 1, "Etudes d'impact" (12h) : Cours de 3h sur les principes de réalisation des études d'impact sur l'environnement, réalisation d'une étude d'impact en milieu urbain en projet (9h)
- Chargé de cours à l'EIVP, Paris, IVP 2, semestre 1, "Gestion patrimoniale des ouvrages de génie civil" (12h) : principes et enjeux de la gestion patrimoniale, exemples de gestion patrimoniale d'ouvrages
- Encadrement de projets SIG tutorés, Ecole Nationale des Sciences Géographiques (ENSG), Projet SIG des étudiants de deuxième année (8 mois – 16h) : direction d'un groupe de 4 étudiants pour le développement d'un prototype SIG d'aide à la reconstruction urbaine après une inondation majeure de l'agglomération d'Orléans
- Chargé de cours à la Sorbonne d'Abu Dhabi, Emirats Arabes Unis, Master 2 "Aménagement et Urbanisme", Formation Continue (20h) : Hydraulic infrastructures in the urban system, asset management of urban networks, civil engineering projects : the Millau viaduct and the Havre Port 2000, workshop on civil engineering for urban flood resilience

En 2004

- Chargé de cours au lycée agricole de la Côte Saint André (CFPPA), BTS "Gestion et Protection de la Nature", 2ème année (30h) : découverte et prise en main du logiciel SIG Arcgis 8.3, cours sur la théorie des SIG raster et vecteur, cours de cartographie (des systèmes de projection à la sémiologie graphique)

En 2003

- Chargé de TP/TD à l'Ecole Nationale du Génie Rural, des Eaux et des Forêts, Mastère "Système d'Information Localisé pour l'Aménagement du Territoire", (30h) : module Micro-projet SIG : "Evaluation du risque de rupture d'une digue : calcul d'indicateurs", ENGREF – INA-PG

En 2002

- Chargé de formation continue, CIRAD, Guadeloupe, Techniciens du CIRAD (30h) : utilisation du matériel GPS Trimble pour la collecte des données sur le terrain
- Chargé de formation continue, CIRAD, Guadeloupe, Chercheurs et ingénieurs, VCAT et stagiaires du CIRAD (30h) : utilisation du matériel GPS Trimble pour la collecte des données sur le terrain, utilisation du matériel GPS Trimble pour le traitement différentiel des données GPS, intégration des données dans le SIG et analyses spatiales

Projets de recherche

2010-2012: Paris Résiliente (Paris 2030)

L'ambition de ce projet est de développer des méthodes fondées sur le concept de résilience pour évaluer la capacité de l'environnement urbain parisien à s'adapter au risque inondation.

Ce projet propose une évaluation de la résilience de l'environnement construit d'Ile-de-France afin de comprendre les interactions et dépendances effectives ou envisageables entre les réseaux urbains considérés ici comme la porte d'entrée du risque, sur la base de retours d'expériences de ville inondées en France, en Europe et dans le monde. Le projet privilégie une approche systémique pour comprendre comment les dysfonctionnements des réseaux urbains perturbent le système urbain dans sa globalité.

L'EIVP porte ce projet et coordonne les actions avec l'Université de Paris 7.

2010-2013 : RESILIS (ANR Ville Durable)

A travers le projet RESILIS, les partenaires du consortium ont l'ambition de proposer des méthodes et des outils pour que les villes deviennent plus résilientes grâce à une gestion optimisée des réseaux techniques les plus structurants et à une meilleure gouvernance multi-échelles et multi-acteurs. Par résilience urbaine on entend le fait qu'ayant développé une politique efficace de réduction des vulnérabilités, et de maîtrise des conséquences liées aux risques, les villes soient en capacité de recouvrer plus rapidement leurs capacités économiques et de vie après un accident majeur, qu'il soit naturel, technologique ou lié à la malveillance.

L'EIVP coordonne la tâche 4 « résilience urbaine », assure la fonction de direction scientifique du projet et la direction de la thèse de Marie Toubin qui s'insère dans ce projet.

2010-2014 : FloodProBE (FP7)

Les inondations sont considérées comme le principal risque naturel en Europe en termes d'impact sur les personnes et les biens. Le but principal du projet est de proposer des solutions rentables concernant la protection contre les inondations et la diminution des dommages dans les zones urbaines. Dans ce but, le projet développera des technologies, méthodes, concepts et outils pour l'évaluation et l'adaptation des bâtiments neufs et existants et des réseaux d'infrastructures.

Les activités de recherche se focaliseront sur les points de progrès possibles dans les projets récents et en cours concernant la gestion du risque inondation et sur les observations issues de récents épisodes d'inondation et des dommages en résultant. Les principaux éléments visés sont :

- l'évaluation de la vulnérabilité des infrastructures et des biens de grande valeur, par la définition des dommages directs et indirects résultants d'inondation,
- la fiabilité des défenses urbaines contre les inondations, par la compréhension et l'évaluation des procédés qui se sont avérés inefficaces lors d'inondations récentes
- les technologies et procédés de construction de bâtiments et de réseaux d'infrastructures pour augmenter la résilience urbaine aux inondations ainsi que la modification et la réparation des défenses urbaines contre les inondations en prenant en compte le côté économique.

Le projet est une initiative de 13 partenaires comprenant 6 instituts de recherche, 2 universités, 3 partenaires industriels et 2 PME. Ce consortium est caractérisé par la participation de l'industrie et un équilibre entre les connaissances théoriques et pratiques.

L'EIVP concentre son activité dans les WP2 « Vulnerability of the Built Environment » et produira un outil d'aide à la décision fondé sur l'analyse de la résilience des réseaux techniques urbains. Aussi, l'EIVP est un acteur important dans le WP5 « Pilote Sites » puisqu'elle fait le lien entre les développements scientifiques et méthodologiques du projet et les questions que se posent la Ville de Paris et l'Agglomération d'Orléans.

2008-2010 : TRACI (TRAnchées Couvertes Industrielles)

Mots clés : Tranchées couvertes, chantiers furtifs, parois moulées, impact en milieu urbain, analyse systémique.

Résumé : Le projet TRACI est un projet rattaché au Pôle Ville et Mobilité Durable. Il propose une nouvelle approche pour la réalisation de tranchées couvertes en milieu urbain, qui intègre plusieurs voies d'innovation :

- une innovation de rupture permettant de construire les parois de soutènement sur un mode linéaire et continu ;
- une nouvelle organisation du mode de construction lui-même, à partir d'éléments préfabriqués en usine ;
- une conception globale du projet d'infrastructure tirant parti de la construction en préfabriqué et de l'allègement des contraintes de chantier pour optimiser l'ensemble du projet suivant les critères de l'économie, de l'impact environnemental et des nuisances aux riverains.

Le projet ouvre également de nouvelles voies pour le réemploi des matériaux excavés.

L'EIVP coordonne les activités de recherche à l'interface de la ville et des chantiers de tranchées couvertes

2008-2013 : FloodResilienCity research project (EU Funding, Interreg IVb)

Le projet FloodResilienCity vise à intégrer, dans la problématique de la gestion du risque inondation, la pression urbaine croissante dans les villes situées le long des rivières de l'Europe du Nord-Ouest (Projet Interreg 4B).

Pour atteindre cet objectif, FloodResilienCity s'intéresse à cinq axes principaux :

1. La prise de conscience (Awareness)

- au niveau de la population du risque d'inondation et des moyens de lutter contre ce risque,
- au niveau de la prise de décisions (politiciens/décideurs),
- au niveau des professionnels (des institutions impliquées dans le projet ou dans d'autres projets).

2. Limiter la vulnérabilité (Avoidance)

Pour limiter les dégâts dus aux inondations et faciliter une reconstruction rapide, il faudra :

- prévoir le risque en adaptant les bâtiments et les infrastructures,
- choisir des zones d'activités économiques en tenant compte du risque,

- former la population et les institutions administratives pour reconstruire plus efficacement suite à une crue.

3. Contenir les inondations (Alleviation)

Il s'agit ici de réduire les risques de crues en mettant sur pied des mesures physiques et techniques de lutte contre les débordements.

4. Assistance

L'objectif est de fournir un soutien lors du processus de reconstruction et d'engager les populations à améliorer leurs compétences pour aider la société civile avant, pendant et après l'inondation.

5. Compétences & Stratégies

Mettre en place les processus cités ci-dessus afin d'adapter et de gérer le risque d'inondation grâce aux activités des objectifs 1 – 4.

Le projet a pour objet d'induire un changement dans les mentalités des politiciens, des professionnels et du public, dans les villes de Bruxelles, Leuven, Mainz, Paris, Orléans, Dublin, Nijmegen et Bradford. Ces changements nécessitent une conjugaison des 4- 'A' (Awareness, Avoidance, Alleviation, Assistance) dans les politiques de Gestion Durable des Risques d'Inondations. De plus, les acteurs de la lutte contre les inondations reconnaîtront que l'application spécifique de chacun des 4- 'A' produira de nouvelles politiques qui faciliteront le développement d'une nouvelle planification urbaine.

Les tâches de l'EIVP sont les suivantes :

- contribuer à établir un état de l'art des méthodes et des pratiques actuelles (4 'A'),
- positionner les actions entreprises vis-à-vis des pratiques émergentes et valoriser les actions entreprises dans le cadre du projet,
- assurer un rôle d'animation scientifique du réseau de partenaires : valorisation des résultats, mise en place de formations initiales et continues, guides, etc.,
- développer, après avoir réalisé une analyse des besoins des collectivités (partenaires et autres), un outil d'aide à la décision spatial pour aider les gestionnaires à choisir différents scénarios pour optimiser la reconstruction de la ville,
- coordonner l'activité des partenaires au sein du WP4.

L'ensemble de ces actions est réalisé en étroite collaboration avec l'Université de Sheffield, Département Construction et Génie Civil, Pennine Water Group. Les deux établissements assurent le rôle d'animation scientifique.

2002-2005 : Thèse de doctorat en sciences de l'information géographiques

"Evaluation de la performance des digues de protection contre les inondations.

Modélisation de critères de décision dans un Système d'Information Géographique" sous la direction du Professeur Y. Diab, Laboratoire de Génie Urbain Environnement et Habitat (LGUEH - UMR CNRS 7136).

Mots clés : digue de protection contre les inondations, gestion patrimoniale, analyse fonctionnelle, AMDE, indicateur de performance, aide à la décision multicritère, SIG.

Résumé : La France et plus généralement le monde subissent de fréquents épisodes de crues dévastatrices. Les inondations provoquent d'importants dégâts et les coûts induits sont

considérables. Les digues de protection contre les inondations, souvent sous-dimensionnées et mal entretenues, ont montré leurs faiblesses à plusieurs reprises et leurs ruptures augmentent la violence des inondations.

A l'échelle nationale, le linéaire conséquent de digues (environ 7 500 km) et le manque de données sur l'ensemble de ce parc d'ouvrages compliquent leur gestion. A l'échelle du gestionnaire local se pose la question de l'optimisation des opérations de maintenance. En effet, un gestionnaire de digues ne dispose généralement pas d'un budget suffisant pour réaliser l'ensemble des opérations de maintenance sur la totalité du parc d'ouvrages. Ce long linéaire pose donc une question majeure : par où commencer les actions de maintenance pour à la fois assurer le bon fonctionnement des digues et optimiser les choix budgétaires ?

Dans ce contexte, les gestionnaires de digues ont besoin de méthodes et d'outils d'aide à la décision. Un premier Système d'Information Géographique (SIG), le SIRS Digues, est opérationnel. Il contient les informations détaillées sur les ouvrages : géoréférencement des digues à l'échelle 1/10 000^{ème} et informations relatives aux digues (constitution, désordres, réseaux, voiries,...). Toutefois en l'état, cet outil ne permet pas d'évaluer l'état des digues.

Notre recherche vise à développer des méthodes d'évaluation de la performance des digues. A partir des informations disponibles (inspections visuelles détaillées, essais réalisés, données historiques, etc.), nous proposons des indicateurs capables d'évaluer leur état et leur performance. Notre démarche comporte trois étapes :

- l'élaboration d'un modèle fonctionnel des mécanismes de rupture, bâti à partir de l'Analyse Fonctionnelle (AF) et l'Analyse des Modes de Défaillance et de leurs Effets (AMDE), et utilisant une représentation sous forme de graphes causaux et d'arbres de défaillances ;
- la construction d'indicateurs de performance pour chaque mécanisme de rupture, sur la base de critères et d'une méthode d'aide à la décision multicritère : l'agrégation à base de règles ;
- l'intégration du modèle multicritère d'évaluation de la performance des digues dans le SIRS Digues. Cette opération permet de cartographier et de visualiser la performance d'un parc d'ouvrages.

Après une application sur une digue existante de ces méthodes, nous proposons divers développements et perspectives à cette recherche, dont le principal est, à moyen terme, le développement d'un outil opérationnel pour l'aide à la décision dans les actions de maintenance des digues de protection contre les inondations.

2002 Volontaire civil de l'aide technique au CIRAD en Guadeloupe

Mots clefs : SIG ; DGPS, canne à sucre, modèle de croissance, base de données agronomiques, Guadeloupe

Résumé : Un modèle écophysiologique de croissance de la canne à sucre (MOSICAS) est en cours de développement au CIRAD Réunion par Jean-François Martiné dans les conditions de production réunionnaises. Ce modèle simule la croissance d'une culture de canne à sucre, à partir des données biophysiques décrivant l'environnement de la parcelle. Il est opérationnel avec ses fonctions de base depuis fin 1999. La Guadeloupe bénéficie d'un climat sensiblement plus humide et constant au cours de l'année que celui de La Réunion, ainsi que des variétés et des cycles de culture différents. Ces conditions font défaut au domaine de validité actuel du modèle. Nous avons donc mis en place en Guadeloupe des expérimentations similaires à celles qui ont servi à développer le modèle à La Réunion. Elles vont permettre

d'élargir son domaine de validité afin de couvrir la plupart des conditions de culture de la canne. Nous développons, conjointement à nos travaux de calage et validation, des applications agronomiques de ce modèle pour répondre aux besoins de la filière, notamment une méthode d'estimation de rendement utilisée par la commission de prévision de récolte en début et au cours de la campagne de coupe. Parallèlement à ces activités de modélisation, sont menés des travaux de développement d'outils d'aide à la production. En particulier une base de données agronomiques géoréférencées pour l'agriculture cannière guadeloupéenne (Canne à Sucre Système d'Information Spatialisé, CASSIS) qui a été initié en 1997 avec les acteurs de la filière canne locale. Il a pour but de constituer un système d'information géographique regroupant les principales données culturales (dates de plantation, variété, rendement, etc...) de l'ensemble des parcelles cultivées en canne à sucre. Il permettra d'une part de disposer d'une image agronomique précise de la sole cannière et d'autre part de spatialiser les simulations de croissance calculées par le modèle MOSICAS à l'ensemble de la Guadeloupe en l'intégrant à la base de données.

2001 Stagiaire de DEA SIG, IRD, Maison de la Télédétection

Mots clefs : SIG ; télédétection ; aquaculture ; zone côtière ; SPOT XS ; analyse spatiale ; mangrove ; Madagascar.

Résumé : La mangrove est une formation végétale à palétuviers caractéristique des littoraux intertropicaux et subtropicaux. Sa dynamique spatio-temporelle s'inscrit dans le cadre physique des marais soumis aux alternances quotidiennes de la marée. Milieu biologiquement très productif, la mangrove constitue un cadre propice à la croissance des crevettes péneïdes. Elle est aujourd'hui l'objet de nombreuses convoitises, en raison de l'intérêt économique sans cesse croissant de la crevette, pêchée industriellement à faible distance du rivage, et de la présence d'espaces déserts utilisables pour l'élevage plus ou moins intensif de celle-ci. A Madagascar, l'aquaculture industrielle de la crevette a débuté en 1993, avec l'aménagement de près de 700 hectares de bassins de grossissement, sur des étendues naturellement dénudées de l'écosystème de mangrove. D'autres sites ont été aménagés par la suite ou vont l'être dans un proche avenir, dont celui proche d'Ambilobe (Nord-Ouest de l'île). L'imagerie satellitale SPOT-HRV constitue un moyen approprié de suivi de la dynamique spatiale de ces milieux côtiers, soumis à des changements morphologiques fréquents, ainsi que dans la couverture végétale et l'occupation du sol. A l'aide des logiciels GEOIMAGE et ARCVIEW, des classifications ont été réalisées à partir de deux scènes de 1989, représentatives de conditions climatiques et hydrologiques contrastées. Cette étude montre l'évolution du couvert végétal et des sols en cours de saison sèche et l'étendue de l'estran entre une marée haute descendante et une marée basse montante. Elle est une contribution à la compréhension du fonctionnement et de l'évolution d'un site préalablement au commencement des travaux d'aménagement.

Encadrement d'étudiants

Doctorants

- 2011-2014 Mireia BALSELLS MONDEJAR, "Conception urbaine de la résilience face aux inondations", Doctorante, Université de Mons (Belgique), EIVP (France).
- 2011-2014 Angel PATERNA-HIDALGO, "Evaluation de la performance des ouvrages de génie civil de la RATP : critères d'aide à la décision dans le choix des ouvrages à traiter", Doctorant, CIFRE RATP, Université EIVP – Paris-Est, France.
- 2010-2013 Marie TOUBIN, "Améliorer la résilience urbaine par un diagnostic partagé intégrant l'évaluation technique et la gouvernance ", Doctorante, CIFRE EGIS, EIVP - Université Paris 7, France.
- 2009-2012 Serge LHOMME, "Développement d'un SIG pour l'amélioration de la résilience urbaine face au risque inondation", Doctorant, EIVP - Université Paris 7, Paris, France.
- 2009-2012 Marc VUILLET, " Performance et aptitude au service des digues de protection contre les inondations", Doctorant, Cemagref – Université Paris-Est, Aix en Provence, France
- 2009-2012 Hélène BERAUD, "Fonctionnement du réseau de gestion des déchets et risques de dysfonctionnement en cas d'inondation", Doctorante, Université Paris-Est, Paris, France.

Etudiants en Master ou écoles d'ingénieurs

- 2011 Mireia BALSELLS, "Flood resilient architecture and urban planning in Louisiana", M.Sc. Student, Paris Est University, France.
- 2011 Arevik ABAGHYAN, "Développement d'un outil web pour l'évaluation des impacts liés aux choix des techniques de construction des tranchées couvertes en milieu urbain", Master SIG, Université Paris-Est, France.
- 2011 Saul GOMEZ, "Potentialité des SIG Open Source pour l'évaluation de la résilience urbaine face aux inondations ", Travail de Fin d'Etudes, Escuela Técnica Superior de Ingeniería Geodésica, Cartográfica y Topográfica (ETSIGCT), Universidad Politécnica de Valencia.
- 2010 Marie TOUBIN, "Projet Resilis – La ville un système de systèmes", Travail de Fin d'Etudes, EIVP, Paris, France.
- 2010 Laurence RINGENBACH, "Rebuilding the built environment after a disaster, the case of the New Orleans", M.Sc. Student, Master Sustainable Urban Design", Paris Est University, France.
- 2010 William GENTILE, "Développement d'une méthodologie spatio-bilan carbone pour mesurer la performance environnementale de deux techniques de construction de tranchées couvertes en milieu", Master IASIG (Informatique Appliquée aux Systèmes d'Information Géographique), Université Paris-Est, France.
- 2010 Mireia BALSELLS, "Développement et évaluation d'indicateurs de performance environnementale des chantiers de tranchées couvertes en milieu urbain", Travail de

- Fin d'Etudes, Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona (ETSEIB), Universitat Politècnica de Catalunya (UPC).
- 2010 Sonia DOMINGO, "Evaluer la résilience du réseau routier urbain face au risque inondation : proposition d'une méthode d'analyse ", Travail de Fin d'Etudes, EIVP, Paris, France - Escola Tècnica Superior d'Enginyers de Camins, Canals i Ports de Barcelona (ETSECCPB), Universitat Politècnica de Catalunya (UPC).
- 2010 Judickaelle RAKOTONIRINA, "Elaboration d'un SIG pour évaluer la sensibilité des réseaux techniques urbains aux inondations", Master SIG, Université Paris-Est, France.
- 2010 Camille PORET, "GIS based approaches for Preliminary Flood Risk Assessments of Pluvial Flooding (flooding from streams) ", B.Sc. Student, EIVP, Paris, France.
- 2010 Déborah FRAIX-BURNET, "GIS based approaches for Preliminary Flood Risk Assessments of Pluvial Flooding (incident recording system) ", B.Sc. Student, EIVP, Paris, France.
- 2010 Margaux CHEVALIER, "GIS based approaches for Preliminary Flood Risk Assessments of Pluvial Flooding (incident recording system) ", B.Sc. Student, EIVP, Paris, France.
- 2010 Karine BIENAIMÉ, "Elaboration d'indicateurs d'évolution de l'état du patrimoine de la RATP en fonction des scénarios d'investissement", Travail de Fin d'Etudes, EIVP, Paris, France.
- 2009 Nader BIN TAHER, "Reassessments of the Development Area in the Reem Island", M.Sc. student, Master In Urban and Regional Planning, Université de Paris-Sorbonne (Paris IV), Department of Urban Planning and Geography, Emirate of Abu Dhabi.
- 2009 Marie TOUBIN, "Post-disaster resilient urban planning approach: comparative study of earthquakes management in New-Zealander and French cities", B.Sc. student, EIVP, Paris, France.
- 2009 Claire ROSSIGNOL, "Awareness raising in preparation for floods and GIS based approach for flood risk assessments", B.Sc. student, EIVP, Paris, France.
- 2009 Manon INGLESAKIS, "Etat de l'art des méthodes d'évaluation de la vulnérabilité des systèmes techniques urbains linéaires face aux inondations", Elève de deuxième année de l'Ecole des Ingénieurs de la Ville de Paris.
- 2009 Angel PATERNA HIDALGO, "Développement de méthodes et d'outils pour analyser et modéliser le fonctionnement des chantiers de tranchées couvertes en milieu urbain", Travail de Fin d'Etude pour l'obtention du titre d'ingénieur de l'Ecole Spéciale des Travaux Publics, double cursus Universidad Politècnica de Valencia.
- 2009 Serge LHOMME, "Etude du fonctionnement des systèmes techniques urbains avant, pendant et après une crue majeure : proposition d'une modélisation fonctionnelle urbaine", Travail de Fin d'Etude pour l'obtention du titre d'ingénieur de l'Ecole Nationale des Sciences Géographiques.
- 2007-2008 Yassine HASSANI, "Etude d'un Système d'information géo-décisionnel dédié à l'amélioration de la résilience urbaine après une inondation majeure", Mission 6 mois.

- 2005 Christophe PREVOT, "Couplage d'un modèle multicritère d'évaluation de la performance des digues dans un SIG", Master Image Multimédia et Sciences Territoriales – Université de Nice Sophia-Antipolis.
- 2004 Christophe BERTHAUD, "Proposition d'une méthode d'intégration d'un indicateur de performance des digues dans le SIRS (Système d'Information à Références Spatiales) Dignes", Maîtrise de Sciences et Techniques de Cartographie – Université d'Orléans.
- 2003 Nicolas FIGEAC, "Construction de scénarios de rupture de digues à partir de méthodes de sûreté de fonctionnement", CDD suite à l'obtention du diplôme d'ingénieur génie civil du CUST – Université Blaise Pascal, Clermont-Ferrand.

Publications

Revues à comité de lecture

- Serre D., Barroca B., Llasat M-C., 2011. Natural hazard resilient cities, *Natural Hazards and Earth System Sciences (NHESS)*, an Open Access Journal of the European Geosciences Union, Co-Editors of this Special Issue.
- Gervais R., Peyras L., Serre D., Chouinard L., Diab Y., 2011. Condition evaluation of water retaining structures by a functional approach: comparative practices in France and Canada, In *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, Volume 15 - No. 3/2011, pp. 335-356.
- Lhomme S., Serre D., Diab Y., Laganier R. 2010, Les réseaux techniques face aux inondations ou comment définir des indicateurs de performance de ces réseaux pour évaluer la résilience urbaine, *Bulletins de l'Assemblée des Géographes Français*, n°2010-4, pp. 487-502.
- Serre D., Peyras L., Maurel P., Diab Y., 2009. A spatial decision support system aiding levee managers in their repair and maintenance planning, *Journal of Decision Systems*, Lavoisier, vol 18, n°3/2009, pp. 347-373.
- 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 Systems*, ASCE, Vol. 14, Issue 3, pp. 201-213.
- Serre D., Peyras L., Curt C., Boissier D, Diab Y., 2007. Evaluation des ouvrages hydrauliques de génie civil, *Revue Canadienne de Géotechnique*, *Canadian Geotechnical Journal*, n°44, pp. 1298-1313.
- Serre D., Peyras L., Tourment R., Diab Y., 2006. Optimiser les interventions d'inspection et de maintenance des digues de protection contre les inondations, *Annales du Bâtiment et des Travaux Publics*, Décembre 2006 – n°6, pp. 46-54.
- Serre D., Maurel P., Peyras L., Tourment R., Diab Y., 2006. Méthodes et solutions pour maîtriser le risque d'inondation dans les zones endiguées. Des modèles de rupture de digues couplés à un SIG, *European Journal of GIS and Spatial Analysis*, vol n°16/3-4 - 2006 pp. 479-498.
- Serre D., Peyras L., Tourment R., Diab Y., 2006. Evaluation de la performance des digues de protection contre les inondations, *Revue Française de Géotechnique*, 2^{ème} trimestre 2006, vol n°115, pp. 57-70.

Publications soumises

- Toubin M., Serre D., Diab Y., Laganier R. 2011, An auto-diagnosis to highlight interdependencies between urban systems, *Natural Hazards and Earth System Sciences (NHESS)*, an Open Access Journal of the European Geosciences Union, 4p. (Soumis en septembre 2011).
- Lhomme S., Serre D., Diab Y., Laganier R. 2011, Etudier la résilience urbaine à l'aide d'un web SIG analysant les réseaux techniques urbains. Un concept et des outils émergents, *Networking and Information Systems Journal*, (soumis en septembre 2011).

Lhomme S., Serre D., Diab Y., Laganier R. 2011, 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*, (soumis en juin 2011).

Vuillet M., Peyras L., Serre D., Diab Y. 2011, Decision making method for assessing performance of large levee alignment, *Journal of Decision Systems*, (soumis en mai 2011).

Ouvrages collectifs, livres ou chapitres de livres

Lhomme S., Serre D., Diab Y., Laganier R. 2011, Etude de la résilience urbaine dans un contexte de risques: l'analyse des capacités d'absorption des réseaux techniques par une approche structurale, in *Society and Natural Risks Orleans Conference Proceedings*, 9p.

Becue V., Serre D., Diab Y., 2011. Résilience et mixité urbaine : Une réponse à la complexité de la ville, *Magazine Element n 5*, Université de Mons, Belgique, 5p.

Renouf E., Chastan B., Grésillon J-M., Charron S., *et al.*, 2010, Risque inondation: quels défis pour la recherche, *Livre Blanc*, Cemagref - Ministère chargé de l'Environnement, 78 p.

Serre D., 2009. Risque d'inondation: de l'aléa à la résilience, *Actes de l'Université de l'EIVP n°2, Numéro spécial des "Carrefours du Génie Urbain"*, EIVP, Paris, juillet 2009, pp. 39-54.

Serre D., Peyras L., Diab Y., 2003. Modéliser le fonctionnement et les modes de défaillance des digues fluviales pour évaluer leur performance : méthodologie et perspectives, *Seminaire REGLIS*, Montpellier, France, pp. 13-37.

Séminaires et congrès internationaux à comité de lecture

Serre D., Barroca B., Diab Y. 2011, Contribution of urban engineering for underground planning, *13th AFTES International Congress*, Lyon, France, 4p.

Barroca B., Serre D., Diab Y., Bethelot S. 2011, How to assess urban and environmental quality of underground infrastructures?, *13th AFTES International Congress*, Lyon, France, 4p.

Lhomme S., Toubin M., Serre D., Diab Y., Laganier R. 2011, From technical resilience toward urban services resilience, *Fourth Resilience Engineering International Symposium*, Sophia Antipolis, France, 7p.

Lhomme S., Serre D., Diab Y., Laganier R. 2011, A web GIS for urban resilience assessment facing flood events, *International Cartographic Conference*, Paris, France.

Vuillet M., Serre D., Peyras L., Diab Y., De Mordant De Massiac J-C. 2011, A GIS for levee management: performance assessment with uncertainty integration, *International Cartographic Conference*, Paris, France.

Barroca B., Serre D., 2011, Identify indicators for assessing urban resilience to flooding *European Geoscience Union (EGU), General Assembly*, Vienna, Austria, 2 p.

Barroca B., Lhomme S., Chopin F., Serre D., 2011, Resilience assessment of urban areas protected by dikes, *European Geoscience Union (EGU), General Assembly*, Vienna, Austria, 2 p.

- Diab Y., Morand D., Serre D. 2011 A global approach for urban buried sewers management by considering risk assessment, European Geoscience Union (EGU), General Assembly, Vienna, Austria, 2 p.
- Arnaud J-P., Toubin M., Serre D. 2011, Resilis: a research project to improve urban resilience, European Geoscience Union (EGU), General Assembly, Vienna, Austria, 2 p.
- Lhomme S., Serre D., Diab Y., Laganier R. 2011, Network resiliency assessment integrating network interdependencies, European Geoscience Union (EGU), General Assembly, Vienna, Austria, 2 p.
- Toubin M., Serre D., Diab Y., Laganier R. 2011, Improve urban resilience by a shared diagnostic integrating technical evaluation and governance, European Geoscience Union (EGU), General Assembly, Vienna, Austria, 2 p.
- Ringebach L., Serre D., Amdal J. 2011, Rails to Recovery in a post-Katrina Environment, European Geoscience Union (EGU), General Assembly, Vienna, Austria, 2 p.
- Béraud H., Barroca B., Serre D., Hubert G. 2011, A methodology for analysing dysfunctions in waste management networks during and after flooding, International Conference on Vulnerability and Risk Analysis and Management, American Society of Civil Engineers, University of Maryland, Hyattsville, MD, USA, 10 p
- Serre D., Lhomme S., Heilemann K., Hafskjold S., Tagg A., Walliman N., Diab Y. 2011, Assessing vulnerability to floods of the built environment - integrating urban networks and buildings,. International Conference on Vulnerability and Risk Analysis and Management, American Society of Civil Engineers, University of Maryland, Hyattsville, MD, USA, 10 p
- Serre D., Barroca B., Lhomme S., Diab Y. 2011, Integrating flood defence fragility to measure built environment vulnerability – a GIS based Approach, International Conference on Vulnerability and Risk Analysis and Management, American Society of Civil Engineers, University of Maryland, Hyattsville, MD, USA, 10 p.
- Lhomme S., Serre D., Diab Y., Laganier R. 2011, A methodology to produce interdependent networks disturbance scenarios, International Conference on Vulnerability and Risk Analysis and Management, American Society of Civil Engineers, University of Maryland, Hyattsville, MD, USA, 10 p..
- Hammoum H., Bouzelha K., Hannachi N.E., Serre D. 2011, Vulnerability assessment of the concrete tanks storage at natural hazards, 4th International Conference on Concrete Repair, Dresden, Germany, 9 p.
- Serre D., Barroca B., Diab Y. 2010, Urban flood mitigation: resilient options for sustainable cities, 6 p., 5th International Conference on Environmental Science and Technology, American Academy of Science, Houston, TX, USA.
- Lhomme S., Serre D., Diab Y., Laganier R. 2010, Resilience: from ecology concept to urban application. A GIS for urban flood resilience, 7 p., 5th International Conference on Environmental Science and Technology, American Academy of Science, Houston, TX, USA.
- Lhomme S., Serre D., Diab Y., Laganier R. 2010, Resilience and other close concepts, 5 p., Société d'Ergonomie de Langue Française (SELF), 45ème congrès, Liège, Belgique.

- Lhomme S., Serre D., Diab Y., Laganier R. 2010, Urban network redundancy indicator to assess their ability to function in a degraded mode, 2p, SAGEO International Geomatic Conference, Toulouse, France.
- Bourgade F., Giot V., Lhomme S., Serre D. 2010, Evaluation of urban network vulnerability to flood, 2p, SAGEO International Geomatic Conference, Toulouse, France.
- Lhomme S., Serre D., Diab Y., Laganier R. 2010 A methodology for urban flood resilience assessment, European Geoscience Union (EGU), General Assembly, Vienna, Austria, 2 p.
- Vuillet M., Peyras L., Serre D., Diab Y. 2010 Performance and capacity of river dykes of protection against the floods", through elaboration of performance indicators and decision aid tool in view of the patrimonial assessment of river dykes, Geoscience Union (EGU), General Assembly, Vienna, Austria, 2 p.
- Lhomme S., Serre D., Diab Y., Laganier R. 2010, GIS development for urban resilience, Sustainable City 2010, 14 - 16 April, La Coruña, Spain, 11 p.
- Barroca B., Serre D., Diab Y., Piel C., Porteneuve C. 2010, How urban design is able to contribute to control extreme rainfall and pollution? From the control of surface water drainage to pollution management, Novatech Conference, Lyon, France, 10 p.
- Lhomme S., Serre D., Diab Y. 2010, Modélisation du système urbain pour la mise en place d'un outil d'aide à la reconstruction après une inondation, Conférence de la SHF (Société Hydrotechnique de France), mars 2010, Paris, France, 8 p.
- Serre D., Barroca B., Diab Y. 2010, Urban flood mitigation: sustainable options, SustainableCity, La Coruna, Spain, 12 p.
- Blanksby J., Ashley R., Serre D. 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 p
- Lhomme S., Serre D., Diab Y. 2009, A GIS prototype to optimize recover actions after a flood event, International Conference on Urban Flood Management, Road map towards a flood resilient urban environment Session, UNESCO, Paris, 10 p.
- Serre D., Barroca B. 2009 Urban flood risk mitigation: from vulnerability assessment to resilient city, European Geoscience Union (EGU), General Assembly, Vienne, Austria, 2 p.
- Gervais R., Peyras L., Serre D., Chouinard L., Diab Y. 2008 Condition evaluation of water retaining structures as an aid to maintenance: comparative practices of hydro-quebec and cemagref, Canadian Dam Association 2008 Annual Conference, Winnipeg, MB, Canada, 15 p.
- Serre D., Peyras L., Maurel P., Diab Y., 2006. Multicriteria decision model integrated in a GIS to optimize inspection, maintenance and reparation operations of river levees, MCDA64 Euro Working Group Multicriteria Decision Aiding, Larissa, Grèce, 10 p.
- Serre D., Peyras L., Maurel P., Diab Y., 2006. A spatial decision support system to improve levee management, Hydroinformatics, Nice, France, 8 p.
- Gervais, R., Peyras L., Serre D., Robichaud, J-G., 2006. Condition assessment of hydraulic structures for prioritization of maintenance tasks: comparative practices of Hydro-

Quebec and Cemagref on inventories of dams and river levees, 22nd ICOLD (International Commissions On Large Dams) Congress, Barcelona, Spain, 21 p.

Serre D., Peyras L., Maurel P., Diab Y., 2006. A spatial decision support system to optimize inspection, maintenance and reparation operations of river levees, Joint International Conference on Computing and Decision Making in Civil and Building Engineering, Montréal, Canada, 10 p.

Serre D., Maurel P., Peyras L., Tourment R., 2006. Levee performance assessment to optimize maintenance operations planning: localisation in a specific GIS, 2006 Geospatial Technologies Symposium, CADD/GIS Technology Center, Denver, USA, 2 p.

Séminaires et congrès nationaux à comité de lecture

Lhomme S., Serre D., Diab Y., Laganier R. 2011, L'étude des effets dominos de systèmes fortement interdépendants à l'aide de méthodes de Sûreté de Fonctionnement. Application aux réseaux techniques urbains en cas d'inondation, 29^{ème} Rencontres Universitaires de Génie Civil, Tlemcen, Algérie, 10 p.

Vuillet M., Peyras L., Serre D., De Massiac J-C., Diab Y., 2011, Méthode d'aide à la décision pour l'évaluation de la performance de grands linéaires de digue, 29^{ème} Rencontres Universitaires de Génie Civil, Tlemcen, Algérie, 10 p.

Lhomme S., Serre D., Diab Y., Laganier R. 2011, Apports de la théorie des graphes en géographie des risques : de nouveaux outils de modélisation, de compréhension et d'évaluation, Dixièmes Rencontres de Théo Quant, Besançon, France.

Rakotonirina J., Lhomme S., Serre D., Diab Y. 2010, Une solution SIG pour construire des villes plus résilientes : l'analyse des capacités d'absorption des réseaux techniques urbains face aux risques d'inondation, Risques naturels et société, Orléans, France.

Barroca B., Serre D., Mboumoua I., Bethelot S., Beraud H., Chalah K., Diab Y. 2010, U La durabilité des infrastructures souterraines de transport en milieu urbain, 28^{ème} Rencontres Universitaires de Génie Civil, Université Blaise Pascal, Clermont Ferrand, France, 10 p.

Rakotonirina J., Lhomme S., Serre D., 2010, Etude des capacités de récupération des infrastructures réseaux suite à une inondation, SIG 2010, Conférence ESRI, Versailles, France.

Barroca B., Serre D., Chalah K., Bethelot S., Diab Y. 2009 Evolution des technologies de Génie Civil face au défi du développement durable : le cas des tranchées couvertes, 27^{ème} Rencontres Universitaires de Génie Civil, Université de Rennes, France, 11 p.

Moins, I., Serre D. 2007. Evaluation de la performance des digues fluviales et couplage avec un Système d'Information Géographique, Conférence Géo-Evénement, Paris, France, 2 p.

Posters

Serre D., 2004. Introduction de modèles scientifiques dans les systèmes d'information des gestionnaires de digues, Fête de la Science 2004, Montpellier.

Mémoires diplômant et rapports

- Serre D., 2005. Evaluation de la performance des digues de protection contre les inondations – Modélisation de critères de décision dans un Système d'Information Géographique. Thèse de doctorat, Université de Marne la Vallée, 240 p. + annexes.
- Turpeaud B., Serre D., Maurel P., Mériaux P., 2004. Etude d'un système d'informations à références spatiales (S.I.R.S) dédié au diagnostic, à la surveillance et à l'entretien des digues de protection contre les inondations, rapport final de recherche (Convention RIO2 n°05/2001), 190 p.
- Serre D., 2002. Rapport d'activité dans le cadre du Volontariat Civil de l'Aide Technique au CIRAD de Guadeloupe, 29 p. + annexes.
- Serre D., 2001. Utilisation de données multidates SPOT-XS pour l'élaboration d'un système d'information environnementale en zone côtière tropicale à potentialités aquacoles. Un exemple dans le Nord-Ouest de Madagascar, Rapport DEA SIG, Université de Marne la Vallée, 37 p. + annexes.
- Serre D., 2000. Rapport d'activité dans le cadre du Service National en tant que Scientifique du Contingent, SODENA, Vitry sur Seine, 23 p. + annexes.
- Serre D., 1999. La pollution sonore des infrastructures de transports terrestres : spatialisation des nuisances à l'aide d'un SIG, Rapport de stage de maîtrise, Université Joseph Fourier, Grenoble, 52 p. + annexes.

Rapports pédagogiques

- Serre D., 2001. Guide simplifié d'utilisation du logiciel de traitement d'image GEOIMAGE, à destination du personnel de l'IRD potentiellement amené à utiliser le logiciel, 15 p.
- Serre D., 2000. Guide d'utilisation des données bathymétriques, de la collecte à l'intégration dans le SIG, pour le personnel de SODENA, 24 p.

Responsabilités et activités collectives

2011

- Reviewer pour la conférence internationale “Water Sensitive Urban Design, 21-23 février 2011, Melbourne, Australia.
- Co-organisateur de la conférence internationale “How the concept of resilience is able to improve urban risk management? A temporal and a spatial analysis”, 3-4 November 2011, Paris, France.
- Conférencier invité, Conférence Symbiose, “De l’aléa à la résilience : d’une approche analytique à une approche systémique”, Université de Mons, Faculté d’Architecture, Belgique.
- Expert dans le cadre du Cluster Européen SIC-Adapt! : initiative stratégique pour l’adaptation spatiale au changement climatique rassemblant huit projets transnationaux, soit une centaine de partenaires belges, allemands, français, irlandais, luxembourgeois, hollandais et anglais.
- Conférencier invité pour la Ville de Mayence pour une présentation intitulée “Urban flood mitigation: sustainable options”, Mayence, Allemagne.
- Co-organisateur de la session intitulée “Natural hazard resilient cities: methods and tools to qualify and quantify”, European Geoscience Union (EGU), General Assembly, Vienna, Austria.

2010

- Co-organisateur de la conférence “Génie urbain et infrastructures souterraines, EIVP – Université Paris-Est, Marne la Vallée, 4-5 Novembre 2010, Paris, France.
- Co-organisateur de la session intitulée “Apport des SIG et de l’information géographique dans la prévention, la gestion et l’aménagement des territoires inondables”, 20-23 Septembre, Paris, France.
- Co-organisateur de la session intitulée, “Natural Hazard Resilient Cities”, European Geoscience Union (EGU), General Assembly, NH 9.13, Vienna, Austria.
- Conférencier invité pour un workshop bilatéral entre l’EIVP et l’Université de la Nouvelle Orléans (UNO) : “assessing urban flood resilience”, New Orleans, USA.
- Conférencier invité pour un workshop bilatéral entre l’EIVP et l’Université de Rome (Sapienza) : “urban flood risk management: the concept of resilience”, Roma, Italy.
- Conférencier invité par le Ministère chargé de l’environnement pour la conférence “Adaptation au changement climatique et résilience urbaine”, pour une présentation intitulée : “Stratégie d’augmentation de la résilience du territoire de l’Agglo d’Orléans”.
- Conférencier invité pour la conférence “Forums SIG & cartographie, techniques de positionnement au service de l’eau”, Ecole Nationale des Sciences Géographiques (ENSG). Titre de ma présentation : “FloodResilenCity : conception d’un SIG pour l’aide à la décision en termes de risque inondation”.

2009

- Invité comme chairman lors de Urban Flood Management Conference, 25 November 2009, “What to include for climate change?”, UNESCO, Paris.
- Invité pour présenter mes travaux à l’IMDR (Institut pour la Maîtrise des Risques) le 13 octobre 2009, “Levee performance assessment” in “what strategy to use for security assessment of ageing infrastructures”.
- Invité dans le cadre du Colloque R2DS « Etat des lieux et perspectives sur les outils de mise en œuvre et d’évaluation des écoquartiers » (Fondaterra, Conseil régional d’Île-de-France). Modérateur de la Table Ronde 2 : « La gouvernance des systèmes urbains, pour un territoire francilien résilient », Vendredi 12 juin 2009 Hémicycle du Conseil régional d’Île-de-France.

2008

- Responsable EIVP pour le montage de projets d’aménagements d’ouvrages hydrauliques pour la création de retenues d’eau potable et d’irrigation en Pays Dogon au Mali. Projet tripartite EIVP – GUSF (Génie Urbain Sans Frontière), DRHE (Direction Régionale de l’Hydraulique et de l’Environnement).
- Reviewer pour la Revue des Sciences de l’Eau. (Journal of Water Science - Canada).
- Reviewer pour l’European Journal of Environmental and Civil Engineering.
- Reviewer pour European Journal of Operational Research.
- Membre invité du jury de soutenance des élèves ingénieurs et doctorants de l’ESTP à l’occasion des journées de la recherche de l’ESTP.
- Membre du Comité de Pilotage pour l’organisation de la seconde Université d’Eté de l’EIVP. Responsable scientifique du Cycle 1 dédié à la gestion des risques en milieu urbain.

2006

- Conférencier invité à Hydro Québec à Montréal. Hydro Québec est l’équivalent d’EDF en France et gère plusieurs milliers de barrages. L’objectif de mon intervention était de présenter d’une part le SIG français dédié à la gestion des digues, d’autre part les principaux résultats innovants de mes travaux de thèse.
- Conférencier invité à l’occasion du colloque technique, suivant l’assemblée générale annuelle du CFBR (Comité Français des Barrages et Réservoirs). Le CFBR est une société savante et associe les experts français ayant au moins dix ans d’expérience dans le domaine des barrages et des digues. L’objectif de mon intervention était de présenter les principales innovations issues de mes travaux de thèse pour la gestion des digues.

2005

- Participation au sein de l’Association Bernard Gregory (ABG) au projet "Valorisation des compétences – un nouveau chapitre de la thèse". Ce projet s’inscrit dans le cadre des actions prioritaires du Ministère de la Jeunesse, de l’Education Nationale et de la Recherche : il a pour objectif d’aider les doctorants à valoriser les compétences professionnelles acquises durant la thèse.