



HAL
open science

Les réseaux techniques comme vecteur de propagation des risques en milieu urbain - Une contribution théorique et pratique à l'analyse de la résilience urbaine

Serge Lhomme

► To cite this version:

Serge Lhomme. Les réseaux techniques comme vecteur de propagation des risques en milieu urbain - Une contribution théorique et pratique à l'analyse de la résilience urbaine. Géographie. Université Paris-Diderot - Paris VII, 2012. Français. NNT : . tel-00772204

HAL Id: tel-00772204

<https://theses.hal.science/tel-00772204v1>

Submitted on 10 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.

UNIVERSITE PARIS DIDEROT
Ecole doctorale Economies, Espaces, Sociétés, Civilisation : Pensée Critique, Politique et
Pratiques sociales – ED 382

Mémoire de thèse pour l'obtention du grade de docteur en géographie de l'Université
Paris Diderot - Spécialité « Dynamique des milieux et risques »

Les réseaux techniques comme vecteur de propagation des risques en milieu urbain

Une contribution théorique et pratique à l'analyse de la résilience urbaine

3 DECEMBRE 2012

SERGE LHOMME

Jury :

Monsieur Youssef DIAB, Ecole des ingénieurs de la Ville de Paris (Examinateur)

Monsieur Gabriel DUPUY, Université Paris I Panthéon-Sorbonne (Rapporteur)

Monsieur Claude GRASLAND, Université Paris Diderot (Président)

Monsieur Richard LAGANIER, Université Paris Diderot (Directeur)

Madame Anne RUAS, IFSTTAR (Rapporteur)

Monsieur Damien SERRE, Ecole des ingénieurs de la Ville de Paris (Directeur)

Résumé : Les réseaux techniques sont des infrastructures critiques qui peuvent être vulnérables aux inondations. Leur bon fonctionnement représente donc un enjeu majeur pour la gestion des risques et des territoires. Cette recherche postule que l'analyse de la résilience des réseaux techniques constitue un préalable nécessaire, mais non suffisant, à la mise en place de politiques d'amélioration de la résilience urbaine face aux inondations. Une méthodologie d'analyse de la résilience des réseaux techniques est proposée. Elle requiert l'analyse des capacités de résistance, d'absorption et de récupération de ces réseaux. Dans ce cadre, des développements ont été réalisés afin d'analyser les propriétés structurelles des réseaux techniques, les interdépendances entre les réseaux techniques et la remise en service de ces réseaux. Ces développements reposent principalement sur la théorie des graphes, les méthodes issues de la Sûreté de Fonctionnement, l'optimisation linéaire et l'analyse spatiale. Enfin, un prototype web-SIG a été développé puis appliqué à la ville de Dublin.

Mots clés : Réseaux techniques ; Résilience urbaine ; Territoire ; Infrastructures critiques ; Théorie des graphes ; Sûreté de fonctionnement ; Analyse spatiale ; SIG.

Abstract : Technical networks can be considered as critical infrastructures and appear vulnerable to flooding. Well-functioning of these networks is a major issue for flood risk management and spatial planning. This research argues that networks resilience analysis is a necessary, but not sufficient, condition for improving urban resilience to flooding. In order to analyze networks resilience a methodology is proposed. This methodology requires analyzing resistance, absorption and recovery capacities of these networks. In this context, researches have been done about networks structural analysis, networks interdependencies analysis and networks restoration analysis. In fact, the methodology is mainly based on graph theory, safety methods, linear optimization and spatial analysis. Finally, to implement this methodology, a web-GIS has been designed. Thanks to this prototype, an application has been carried out for the city of Dublin.

Keywords : Technical networks ; Urban resilience ; Critical infrastructures ; Graph theory ; Safety methods ; Spatial analysis ; GIS.

Lhomme S., 2012, *Les réseaux techniques comme vecteur de propagation des risques en milieu urbain. Une contribution théorique et pratique à l'analyse de la résilience urbaine*, Laganier R. & Serre D. (sous la dir.), Thèse de doctorat, Université Paris Diderot, 365 p.

« Nevertheless, this artificial ignorance, and learned gibberish, prevailed mightily in these last ages, by the interest and artifice of those who found no easier way to that pitch of authority and dominion they have attained, than by amusing the men of business, and ignorant, with hard words, or employing the ingenious and idle in intricate disputes about unintelligible terms, and holding them perpetually entangled in that endless labyrinth. Besides, there is no such way to gain admittance, or give defence to strange and absurd doctrines, as to guard them round about with legions of obscure, doubtful, and undefined words. Which yet make these retreats more like the dens of robbers, or holes of foxes, than the fortresses of fair warriors: which, if it be hard to get them out of, it is not for the strength that is in them, but the briars and thorns, and the obscurity of the thickets they are beset with. For untruth being unacceptable to the mind of man, there is no other defence left for absurdity but obscurity. »

John LOCKE, *An essay concerning human understanding*,
Book III, Chapter X – of the abuse of words.

A mes parents et à mes frères et sœurs

Passer trois ans de sa vie à travailler sur un même sujet amène, pour des raisons extrêmement diverses, à être redevable envers certaines personnes.

Premièrement, il s'agit ici de remercier mes directeurs de thèse, Richard Laganier et Damien Serre, ainsi que Youssef Diab, directeur scientifique de l'EIVP, sans qui cette recherche n'aurait jamais vu le jour. Je tiens à vous remercier pour la confiance et le temps que vous m'avez accordés, les moyens que vous m'avez donnés, et la compréhension dont vous avez fait preuve à mon égard.

Deuxièmement, il convient aussi de remercier les institutions, plus précisément les hommes et les femmes qui lui donnent corps. C'est dans ce cadre que je tiens à remercier le personnel de l'Ecole des Ingénieurs de la Ville de Paris (EIVP) qui m'a accueilli dans ses locaux pendant ces trois années ainsi que l'université Paris Diderot et le laboratoire PRODIG. Tout particulièrement, je tiens à remercier l'EIVP qui, avec le soutien des projets de recherche européens FloodResilienCity et FloodProbe, a pu financer cette recherche. De plus, je ne pouvais pas passer outre un grand remerciement à l'ensemble des enseignants-chercheurs, doctorants, ingénieurs de recherche et stagiaires qui ont partagé avec moi tant de bons moments.

Troisièmement, il est impensable de ne pas remercier les personnes qui ont eu une influence sur cette recherche : les géographes du séminaire résilience urbaine de l'ENS – Géraldine Djament, Antoine Leblanc, Céline Pierdet, Magali Reghezza et Samuel Rufat – merci de m'avoir considéré comme l'un des vôtres et de m'avoir fait partager une expérience collaborative qui a notamment donné naissance à plusieurs communications dont des chapitres d'ouvrage ; le groupe FMR qui continue à vivre grâce au travail de Laurent Beauguitte et César Ducruet, je travaille toujours à l'écriture de mes nouvelles synthèses ; Bruno Barroca, pour les échanges lors des déplacements communs que l'on a pu effectuer pour des conférences internationales, notamment lors des éditions de l'EGU (2010 et 2011) à Vienne ; les professionnels des projets de recherche européens FloodResilienCity et FloodProBE, notamment Marielle Chenesseau qui m'a permis de mettre en place mes premiers tests et bien sûr « *the last but not least* » Sir Tony Maguire et Michael Curtis du *Dublin City Council* qui m'ont sorti d'une belle impasse...

Je remercie aussi les membres de mon jury pour le temps consacré à la lecture de ce mémoire.

Enfin, un grand merci à ma compagne pour avoir passé ces trois années à mes côtés.

Table des matières

INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
PREMIERE PARTIE : APPREHENDER LA RESILIENCE URBAINE PAR LA RESILIENCE DES RESEAUX TECHNIQUES	
Chapitre 1 : Inondations et réseaux techniques : un état des lieux préoccupant	9
1.1 Une gestion des risques d'inondation complexe	10
1.2 Les réseaux techniques face aux inondations : une vulnérabilité avérée	15
1.3 Les réseaux techniques des infrastructures critiques par excellence	27
1.4 Synthèse du chapitre 1	38
Chapitre 2 : Villes, réseaux techniques et risques : une appréhension commune nécessaire	41
2.1 La gestion des risques d'inondation en milieu urbain	42
2.2 La ville un système sociotechnique où les réseaux sont centraux	50
2.3 La ville et les réseaux techniques dans un contexte de risques	57
2.4 Synthèse du chapitre 2	67
Chapitre 3 : La résilience urbaine : la mise en œuvre pratique d'un concept théorique	69
3.1 La résilience : clarification conceptuelle	70
3.2 La résilience face aux risques d'inondation : les approches dominantes	82
3.3 L'analyse des réseaux techniques un préalable nécessaire à l'analyse de la résilience urbaine face aux inondations	90
3.4 Synthèse du chapitre 3	96
Synthèse de la première partie	99
DEUXIEME PARTIE : ANALYSER LA RESILIENCE DES RESEAUX TECHNIQUES : LES CHOIX METHODOLOGIQUES	
Chapitre 4 : Méthodologie d'analyse des réseaux techniques	103
4.1 Les réseaux techniques analysés	104
4.2 La résilience des réseaux techniques	110
4.3 Une méthodologie d'analyse de la résilience des réseaux techniques	120
4.4 Synthèse du chapitre 4	126
Chapitre 5 : L'analyse des propriétés structurelles des réseaux techniques	129
5.1 La théorie des graphes et l'analyse des propriétés structurelles des réseaux techniques	130
5.2 L'analyse de la vulnérabilité « structurelle » des réseaux techniques	138
5.3 Evaluer la redondance au sein d'un réseau technique	159
5.4 Synthèse du chapitre 5	169

Chapitre 6 : Identification et modélisation des interdépendances entre les réseaux techniques	171
6.1 La modélisation des interdépendances entre les infrastructures critiques	172
6.2 Le recours aux méthodes issues de la Sûreté de Fonctionnement	181
6.3 L'analyse des réseaux techniques dans un contexte de risques en tenant compte de leurs interdépendances	192
6.4 Synthèse du chapitre 6	200
Chapitre 7 : Analyser la remise en service des réseaux techniques	201
7.1 Modélisation et optimisation de la remise en service des réseaux techniques	202
7.2 Analyser la remise en service par des critères spatiaux	209
7.3 Synthèse du chapitre 7	217
Synthèse de la deuxième partie	219
TROISIEME PARTIE : ANALYSER LA RESILIENCE DES RESEAUX TECHNIQUES : DE LA THEORIE A LA PRATIQUE	
Chapitre 8 : Conception d'un prototype web-SIG pour analyser la résilience des réseaux	223
8.1 La spécification fonctionnelle du système	224
8.2 Modélisation conceptuelle de l'outil	236
8.3 Conception du Web-SIG	240
8.4 Synthèse du chapitre 8	247
Chapitre 9 : Dublin une ville à l'épreuve des inondations	249
9.1 La résilience comme impératif	250
9.2 La résilience des réseaux techniques de Dublin	265
9.3 Synthèse du chapitre 9	287
Synthèse de la troisième partie	289
CONCLUSION GÉNÉRALE	291
Liste des figures	295
Liste des tableaux	301
Liste des abréviations	303
Bibliographie	305
Annexes	327

INTRODUCTION GENERALE

Contexte de la recherche

En France, jamais autant de populations et de richesses n'ont été exposées aux inondations (Ledoux, 2005). Cette augmentation s'explique en partie par le développement urbain en zone inondable, conjugué à une augmentation de la valeur des biens des ménages et des entreprises (Laporte, 2009). C'est pourquoi, les conséquences économiques des catastrophes futures devraient dépasser celles des catastrophes passées. Par exemple, le coût d'une inondation en région parisienne, équivalente à celle de 1910, serait aujourd'hui environ 10 fois supérieures, représentant environ 17 milliards d'euros de dommages (Reghezza, 2006).

Et pourtant, jamais les outils réglementaires n'ont été aussi complets afin de prévenir ces risques, notamment par la régulation de l'occupation des sols dans les zones exposées (Ledoux, 2005 ; Vinet, 2010). Parallèlement, les budgets consacrés à la prévision, à la prévention et à la protection, n'ont jamais été aussi importants. Ces deux constats sont avérés en France, comme dans une majorité d'autres Etats de l'Union Européenne (Zevenbergen et al., 2010). Les Etats et leurs collectivités ne se sont donc jamais autant mobilisés contre ces risques. C'est aussi la raison pour laquelle, par le biais de leurs services, ces Etats mettent en place des stratégies d'analyses critiques de leurs pratiques. L'objectif pour ces services est de pouvoir apprendre des erreurs passées pour être en mesure de modifier les modes d'organisation présents. Logiquement, les pratiques liées au Retour d'EXpérience (REX) se sont multipliées. En effet, par sa capacité à mieux faire connaître et comprendre les événements et les comportements de systèmes techniques ou organisationnels, le REX s'inscrit dans un processus de maîtrise des risques qui marque une volonté d'apprentissage (Van Wassenhove & Garbolino, 2008).

Par conséquent, la gestion des risques d'inondation évolue. D'une gestion presque exclusivement centrée sur l'aléa – synonyme de lutte contre les inondations – elle tend aujourd'hui à incorporer des stratégies de réduction des vulnérabilités – voire, plus récemment, des stratégies d'amélioration de la résilience – qui prennent davantage en considération les enjeux exposés à ces inondations (Reghezza, 2006). Cependant, ces politiques demandent du temps pour être efficaces, car elles remettent en question des conceptions et des pratiques passées. Elles ne peuvent, dans l'état actuel des choses, réparer à elles seules les erreurs d'aménagement commises dans le passé, ces politiques se heurtant de surcroît à des problèmes de financement.

Malgré tout, « *l'impression est souvent celle d'un échec perpétuel, comme si les efforts de prévention ne pouvaient compenser l'augmentation avérée des risques* » (Vinet, 2010). Cette impression d'échec trouve un cadre propice pour se développer au sein de la société. En

effet, chaque catastrophe soulève une indignation qui semble toujours plus importante que la précédente. Cette indignation est notamment relayée par les médias, très présents pour assurer le suivi à court terme des catastrophes et mettre en exergue le désarroi des populations touchées (Vinet, 2010). Ainsi, les gestionnaires doivent faire face, semble-t-il, à une aversion croissante aux risques de la population.

De plus, la gestion des inondations doit faire face à des défis nouveaux. Par exemple, les gestionnaires sont confrontés à la prise en compte d'incertitudes croissantes, comme celles liées à l'évolution climatique dont les effets sont encore assez méconnus sur les phénomènes hydrauliques. Dans le même temps, les ruptures de certains systèmes de protection censés protéger les populations ont finalement contribué à augmenter les impacts de certaines catastrophes. La gestion des risques d'inondation se situe donc entre un certain constat d'échec, des défis anciens ou nouveaux à relever et une volonté de changement marquée notamment par l'introduction de nouvelles stratégies de prévention. Ces stratégies, en certains aspects, cherchent à améliorer les conditions favorisant une meilleure résilience (Fig. 1). Or, comme les politiques actuellement menées s'orientent en priorité vers les espaces urbanisés, l'amélioration de la résilience urbaine semble être progressivement présentée dans certains discours comme un impératif (Reghezza et al., 2012).

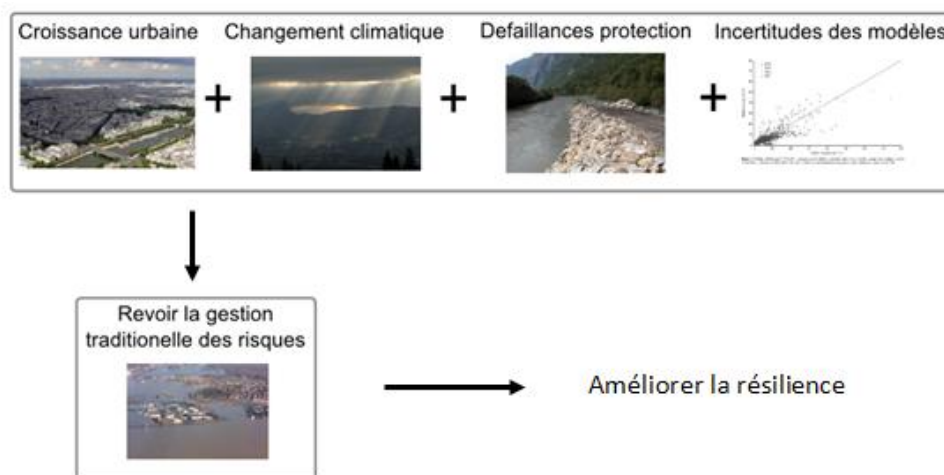


Figure 1 : De nouveaux défis et de nouvelles politiques pour la gestion des risques d'inondation.

C'est dans ce cadre général que s'inscrit cette thèse. En effet, cette thèse est le résultat de réflexions menées au sein de deux projets européens : le projet FloodResilienCity et le projet FloodProBE. Ainsi, le projet FloodResilienCity¹ regroupe des collectivités européennes ayant pour objectif d'améliorer leur résilience face aux risques d'inondation. Le projet FloodProBE² est un projet de recherche européen qui regroupe différents

¹ Les collectivités de Dublin, d'Orléans, de Bradford, de Nimègue, Louvain, Mayence et Bruxelles.

² Les laboratoires de IRSTEA, Deltares, IFSTTAR, HR Wallingford, SINTEF, EIVP, Oxford Brookes University, Dura Vermeer.

laboratoires de recherche. Ce projet a pour objectif de développer des méthodologies et des technologies permettant d'améliorer la protection des espaces urbanisés face aux inondations. Cette recherche s'inscrit donc dans un contexte scientifique très vaste, concernant le développement de méthodologies et d'outils à destination des collectivités, leur permettant *in fine* d'améliorer leur résilience face aux risques d'inondation.

Ces recherches contribuent à rendre opérationnel le concept de résilience. En effet, ce concept fondamentalement théorique, désormais répandu dans un grand nombre de disciplines (psychologie, écologie, géographie, sciences politiques...), est actuellement un concept « à la mode » dans le domaine académique comme chez de nombreux praticiens. Par exemple, ce concept est actuellement promu par des organismes internationaux afin de faire face à différents défis majeurs du 21^{ème} siècle : gestion des risques naturels, adaptation au changement climatique...

Il n'est donc pas étonnant que ce concept soit central dans le projet FloodResilienCity (FRC) et qu'il ait émergé progressivement dans le projet FloodProBE. Néanmoins, ce relatif succès ne va pas sans poser de nombreuses questions d'ordre théorique ou pratique. En effet, certains expliquent ce succès par le flou entourant ce concept largement polysémique (Klein et al., 2003 ; Brand & Jax, 2007). Cette perméabilité du concept autorise des interprétations pouvant apparaître parfois contradictoires. Ainsi, la résilience tendrait à devenir un concept creux, voire insignifiant et sans portée opérationnelle précise.

Objectif de la recherche entreprise

Dans ce contexte, le développement de méthodologies et d'outils permettant d'améliorer la résilience urbaine face aux inondations se révèle être un véritable défi. Cette recherche se place dans ce cadre général de recherche et vise *à élaborer une méthodologie et à développer des outils permettant d'améliorer la résilience urbaine face aux risques d'inondation, en se focalisant sur l'analyse de la résilience des réseaux techniques.*

En effet, dans les REX consécutifs à différentes inondations, il apparaît que les réseaux techniques sont vulnérables à cet aléa (MEDD, 2005). De plus, les dysfonctionnements des réseaux techniques perturbent fortement le fonctionnement de nos sociétés contemporaines : les réseaux techniques constituent ce qu'il devient courant de nommer des « infrastructures critiques » (Yusta et al., 2011). Cette thèse postule alors que *l'analyse de la résilience des réseaux techniques constitue un préalable nécessaire, mais non suffisant, à la mise en place de politiques d'amélioration de la résilience urbaine face aux inondations.*

Cette recherche se focalise donc sur l'analyse de la résilience des réseaux techniques face aux inondations. Or, il existe plusieurs méthodes pour analyser ces réseaux. Par conséquent, il est possible d'appréhender l'analyse de leur résilience de différentes manières. Le choix a été fait dans cette recherche de privilégier les méthodes issues de

l'analyse spatiale. En effet, « *l'espace sur lequel s'exercent les menaces n'est pas neutre, il constitue la composante intrinsèque du risque* » (Veyret, 2003). Ainsi, à l'instar des autres composantes du risque comme l'aléa et la vulnérabilité, la résilience peut être définie spatialement (Cumming, 2011). De plus, les réseaux techniques sont des infrastructures éminemment géographiques (Gastner & Newman, 2006). L'analyse spatiale, qui propose des méthodes et des outils permettant une « *analyse formalisée de la configuration et des propriétés de l'espace géographique, tel qu'il est produit et vécu par les sociétés humaine* » (Pumain & Saint-julien, 1997) peut alors permettre de prendre en compte la composante spatiale de la résilience et des réseaux techniques. C'est pourquoi, *l'outil développé afin de rendre opérationnelle la méthodologie élaborée est un Système d'Information Géographique (SIG)*.

Présentation du mémoire

La première partie de cette thèse a pour objectif d'explicitier le postulat adopté concernant le rôle des réseaux techniques dans l'amélioration de la résilience urbaine. Dans un premier temps, en s'appuyant sur des retours d'expérience consécutifs à des inondations, il convient de montrer que des analyses de risques, focalisées sur les réseaux techniques, sont pertinentes (Chapitre 1). En effet, l'analyse empirique d'inondations passées tend à mettre en exergue d'une part la vulnérabilité des réseaux techniques vis-à-vis des inondations et d'autre part leur criticité (Chapitre 1). Dans un deuxième temps, sachant que les espaces urbanisés concentrent les attentions des gestionnaires, il est nécessaire de se focaliser sur les relations qu'entretiennent les réseaux techniques avec ces espaces (Chapitre 2). Les réseaux techniques permettent alors de rendre partiellement compte des relations complexes que les risques entretiennent avec les espaces urbanisés. Dans un troisième temps, le concept de résilience sera introduit afin d'appréhender le mieux possible ce concept polysémique (Chapitre 3). Ce sont précisément ces considérations épistémologiques, conjuguées aux réflexions issues des deux premiers chapitres, qui suggèrent de postuler que l'analyse de la résilience des réseaux techniques constitue un préalable nécessaire, mais non suffisant, à la mise en place de politiques d'amélioration de la résilience urbaine face aux inondations.

La deuxième partie se concentre sur la méthodologie développée pour analyser la résilience des réseaux techniques. Cette méthodologie est tout d'abord détaillée et argumentée (Chapitre 4). Elle repose sur l'analyse de trois capacités : les capacités de résistance, d'absorption et de récupération. Cette méthodologie nécessite alors de s'intéresser à diverses thématiques de recherche comme : l'analyse structurelle des réseaux techniques (Chapitre 5), la modélisation des interdépendances entre les réseaux techniques (Chapitre 6) et l'analyse de la remise en service des réseaux techniques (Chapitre 7).

Enfin, la troisième partie de cette thèse vise à passer de la théorie à la pratique. Pour cela, il s'est trouvé nécessaire de développer un système informatique afin d'automatiser la méthodologie (Chapitre 8). Il s'agit d'un Web-SIG qui implémente l'ensemble de la

méthodologie. Ce Web-SIG a alors été utilisé pour analyser la résilience des réseaux techniques de la ville de Dublin (**Chapitre 9**). En effet, la ville de Dublin, engagée dans le projet FRC, est contrainte d'améliorer sa résilience pour faire face aux inondations. C'est dans le cadre de ce projet européen que l'application s'est révélée possible.

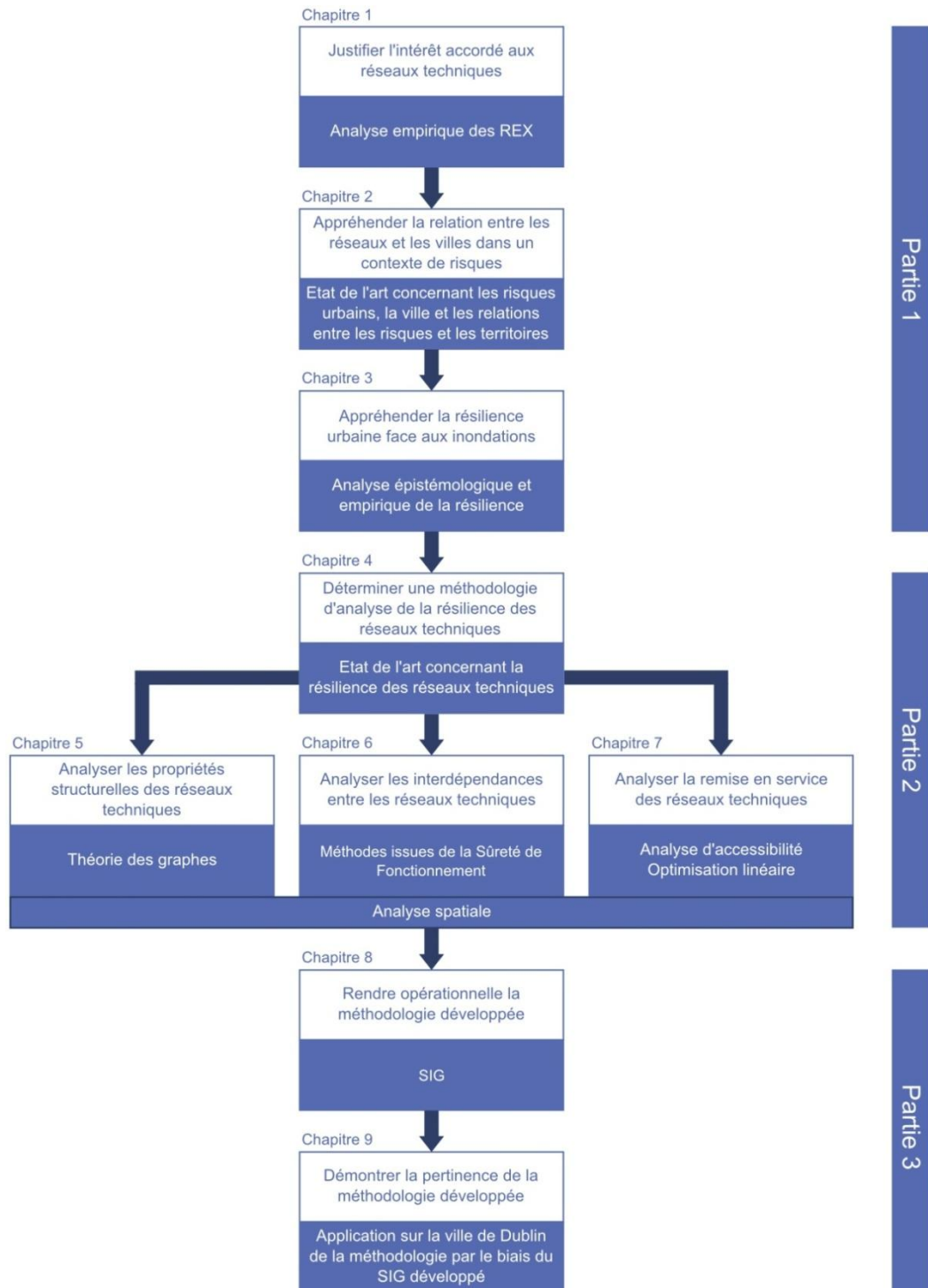


Figure 2 : Plan du mémoire.

PREMIERE PARTIE

Appréhender la résilience urbaine par la résilience des réseaux techniques

Cette première partie a pour objectif d'explicitier le postulat adopté concernant le rôle des réseaux techniques dans l'amélioration de la résilience urbaine. Dans un premier temps, en s'appuyant sur des retours d'expérience consécutifs à des inondations, il convient de montrer que des analyses de risques, focalisées sur les réseaux techniques, sont pertinentes ([Chapitre 1](#)). Dans un deuxième temps, sachant que les espaces urbanisés concentrent les attentions des gestionnaires, il est nécessaire de se focaliser sur les relations qu'entretiennent les réseaux techniques avec ces espaces ([Chapitre 2](#)). Dans un troisième temps, le concept de résilience est introduit afin d'appréhender au mieux ce concept polysémique et de se positionner par rapport à ses différentes acceptations ([Chapitre 3](#)).



Figure 3 : Plan de la partie 1.

CHAPITRE 1

Inondations et réseaux techniques : un état des lieux préoccupant

Une inondation à Paris, équivalente à celle de 1910, toucherait environ 800 000 personnes et coûterait près de 17 milliards d'euros (IAU-IDF, 2010). Néanmoins, même si l'évaluation économique de cette inondation révèle l'ampleur remarquable d'un tel événement, elle le sous-estime aussi largement. En effet, ce chiffre synthétique ne tient notamment pas compte des coûts induits par les différents dysfonctionnements des réseaux techniques (les réseaux d'eau, de télécommunications, de transports...). Plus généralement, cette évaluation ne recense pas l'ensemble des nombreux impacts indirects provoqués par cette inondation (pertes d'exploitation, jours chômés...).

Ainsi, dans le cas francilien, en tenant compte de la dégradation des réseaux techniques et des pertes d'exploitation des entreprises, le coût des dommages induits par une crue de type 1910 serait probablement plus que doublé (IAU-IDF, 2010). Les conséquences économiques induites par la dégradation des réseaux techniques apparaissent donc très élevées. Ce premier constat met en exergue deux caractéristiques majeures des réseaux techniques.

Premièrement, ce coût économique élevé révèle l'importance de ces infrastructures pour le bon fonctionnement des sociétés contemporaines (*i.e.* leur criticité) (Rinaldi et al., 2001). En effet, les sociétés contemporaines sont devenues pour la plupart extrêmement dépendantes de ces infrastructures : aussi bien économiquement que socialement (Boin & McConnell et al., 2007). Par exemple, la coupure du réseau électrique ou des problèmes d'alimentation en eau potable sont difficilement tolérables, puisque la dégradation de ces réseaux influe directement sur la qualité de vie des citoyens et sur leur sécurité (Murray & Grubestic, 2011 ; Ouyang et al., 2011). C'est pourquoi, ces infrastructures sont généralement considérées comme des infrastructures critiques (Yusta et al., 2011).

Deuxièmement, ce coût économique élevé révèle que les réseaux techniques sont particulièrement vulnérables aux inondations. Cette vulnérabilité peut alors s'expliquer par une forte exposition de ces infrastructures aux inondations ou par une forte sensibilité (*i.e.* une fragilité importante) de certains de leurs composants aux inondations (MEDD, 2005). Elle peut aussi s'expliquer par des mécanismes d'endommagement plus complexes induits par exemple par les interdépendances entre les réseaux techniques (EP Loire, 2006).

La conjonction de ces deux caractéristiques (d'une part la criticité des réseaux techniques et d'autre part la vulnérabilité de ceux-ci aux inondations) peut conduire dès lors à se focaliser sur ces réseaux techniques. Ainsi, les réseaux techniques semblent nécessiter une attention particulière, leur analyse devenant même un élément fondamental de la gestion des risques d'inondation. L'objectif de ce chapitre est précisément de montrer que cette focalisation peut être justifiée empiriquement.

Dans un premier temps, un état des lieux cursif concernant la gestion des risques d'inondation va mettre en exergue la complexité d'une telle gestion. Pour faire face à cette complexité, de nombreuses études, des plans de protection, des retours d'expérience ont été réalisés. A partir de ces différents travaux, il est alors possible de montrer que d'une part les réseaux techniques sont vulnérables aux inondations et que d'autre part ils se révèlent être particulièrement critiques.

1.1 UNE GESTION DES RISQUES D'INONDATION COMPLEXE

La gestion des risques d'inondation est confrontée à de nouveaux défis (Lhomme et al., 2010). Dès lors, les gestionnaires recherchent des solutions nouvelles pour faire face à ces défis (Ashley et al., 2007 ; Zevenbergen et al., 2010). En outre, les coûts économiques liés aux inondations semblent en augmentation et ce malgré les investissements réalisés pour les limiter (Vinet, 2010). La gestion des risques d'inondation se situe donc entre un certain constat d'échec et une volonté de changement. Quelle est plus précisément la situation actuelle ?

1.1.1 Etat des lieux concernant les inondations

En France, une commune sur trois est concernée par les risques d'inondation, pour un coût annuel estimé à environ 250 millions d'euros, ce qui représente la première cause d'indemnisation pour les assurances en matière de risques « naturels » (Ledoux, 2005). Dans le monde, pour la période s'étendant de 1996 à 2005, environ 80 % des catastrophes « naturelles » étaient d'origine météorologique ou hydrologique (www.emdat.be). Les inondations auraient lors de cette même décennie affectées en moyenne 130 millions de personnes par an, contre une moyenne de 66 millions par an pour le quart de siècle s'étendant de 1973 à 1997 (www.emdat.be).

Pour autant, il est très difficile d'affirmer que les risques d'inondation sont en augmentation, puisque le risque est une construction qui se révèle être en partie subjective et dont la mesure complexe ne peut se résumer à ces simples chiffres (Dauphiné, 2004 ; Beucher & Reghezza, 2004). Dans les faits, il semble souvent moins complexe d'analyser l'évolution des catastrophes, puisque si le risque relève du probable mais reste non réalisé, la catastrophe semble au contraire bien réelle (November, 2010).

Néanmoins, analyser l'évolution des catastrophes se révèle aussi problématique (Quarantelli, 1998). En effet, la définition d'une catastrophe est en partie subjective, puisque sa définition dépend de seuils fixés arbitrairement (nombre de morts, dommages économiques...) et la qualité du recueil des données nécessaires au recensement des catastrophes dépend de l'importance qu'une société accorde à ces événements dits « catastrophiques ». De plus, analyser sur le long terme l'évolution de ces catastrophes pose des problèmes méthodologiques majeurs. En effet, les seuils définissant les catastrophes sont définis à un moment précis et dans un contexte précis. Ces seuils définissent alors l'existence de catastrophes passées à partir de référents présents. Or, durant cette période, les sociétés ont évolué. Dans d'autres domaines, il existe des techniques pour tenter de minimiser les effets liés aux variations temporelles, mais dans les cindyniques cette pratique est plutôt rare. Pour réduire les biais, il paraît nécessaire de limiter les analyses des catastrophes à des périodes relativement restreintes et ce malgré l'indigence des échantillons statistiques à analyser.

C'est pourquoi, l'augmentation du nombre de catastrophes « naturelles » et de leurs impacts ne doit pas être énoncée sans un minimum de recul. Ainsi, les pertes humaines ont tendance à baisser dans tous les pays développés, tandis qu'elles ont tendance à augmenter dans les pays « pauvres » (Dauphiné, 2004). Dans le même temps, les pertes financières causées par ces événements catastrophiques ont globalement augmenté (Vinet, 2010). Cependant, cette évolution apparaît irrégulière (www.emdat.be).

De plus, ces pertes financières accrues doivent être mises en rapport avec une croissance des richesses se révélant plus régulière et continue. La comparaison entre l'évolution des coûts induits par les catastrophes et l'évolution du PIB fait alors émerger une situation plus contrastée (Fig. 1.1), la croissance des coûts apparaissant plus relative. Les tendances sont identiques lorsque l'évolution des coûts induits par les catastrophes est mise en relation avec l'évolution de l'urbanisation.

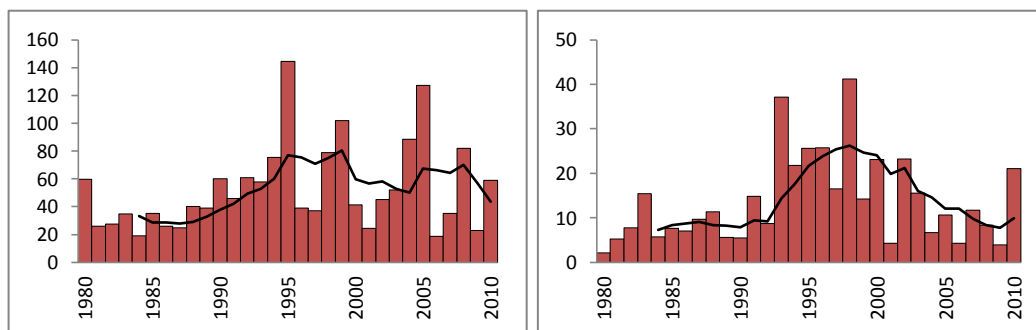


Figure 1.1 : Coûts des catastrophes par point de PIB de 1980 à 2010 (source : CRED et FMI). A gauche les catastrophes naturelles. A droite les catastrophes inondations.

Plus spécifiquement, concernant les catastrophes consécutives à des inondations, les coûts ont tendance à stagner depuis le milieu des années 1990. Cela se traduit par une baisse significative relativement au PIB après néanmoins une forte augmentation durant la décennie 1990 – 2000 (Fig. 1.1). A l'échelle européenne, cette stagnation est plus

récente. Elle est consécutive aux inondations de grande ampleur ayant touchées l'Europe centrale en 2002. D'ailleurs, plus les analyses deviennent fines, en se focalisant par exemple sur certains territoires ou sur un aléa particulier, plus l'évolution économique des catastrophes se révèle irrégulière, puisque l'échantillon statistique devient très sensible aux valeurs extrêmes (www.emdat.be).

L'efficacité de nouveaux modes de gestion est alors difficile à évaluer à l'aide de ces seules données économiques, sachant de surcroît que ces modes de gestion prennent du temps pour être efficaces. Par exemple, en France, « *les mesures non structurelles peuvent être considérées comme une approche récente comparée aux mesures structurelles. Aussi, leur efficacité peut croître si les gestionnaires mais aussi les politiques et les populations décident d'accorder plus de place à ce type d'outils* » (Defossez, 2009).

Croissance économique et croissance urbaine semblent être des caractéristiques inhérentes aux sociétés contemporaines empêchant une critique simpliste des politiques de gestion des risques par la seule analyse des coûts liés aux catastrophes. La situation est donc complexe, puisque la hausse de ces coûts semble être la contrepartie inhérente à ce binôme. C'est pourquoi, sachant que plus les sociétés sont riches et urbanisées, plus les coûts des catastrophes ont tendance à augmenter, il est fort probable que ces coûts continuent à augmenter.

La gestion des risques semble être dans une impasse paradigmatique tendant à imposer une réduction des dommages, alors même que certaines caractéristiques inhérentes aux sociétés actuelles tendent à les accroître. De nouveaux modes de gestion semblent donc nécessaires afin notamment de concilier processus d'urbanisation et gestion des risques.

1.1.2 Les retours d'expérience : une illustration de la complexité des problématiques de la gestion des risques d'inondation

Pour faire face à cette complexité, la gestion des risques d'inondation évolue progressivement. Tout d'abord centrée sur la lutte contre l'aléa, la gestion des risques d'inondation s'est orientée vers des stratégies davantage centrées sur les enjeux (Ledoux, 2005). Ces stratégies visent notamment à réduire la vulnérabilité de ces enjeux vis-à-vis des inondations (Reghezza, 2006 ; Laganier & Arnaud-Fassetta, 2009). Néanmoins, les bénéfices de ces politiques semblent insuffisants puisque, malgré des investissements économiques importants, la diminution des impacts liés aux inondations n'est pas encore sensible (Vinet, 2010). Quoi qu'il en soit, comme les sociétés et leur territoire évoluent, il est nécessaire d'adapter les politiques de gestion. C'est pourquoi, les Retours d'EXpérience (REX) ont été créés. En effet, ces REX permettent de confronter les politiques de gestion mises en place à la réalité d'une inondation. Ces événements fournissent alors des éléments qui permettront d'améliorer les politiques de gestion.

Différents acteurs peuvent être amenés à réaliser des REX (Vinet, 2010). Néanmoins, en France, cette appellation fait généralement référence à des rapports interministériels

réalisés par les ministères de l'écologie et de l'intérieur (Rouzeau et al., 2010). Ces REX sont donc pour l'essentiel initiés par l'Etat (Ledoux, 2005). Ainsi, depuis plus d'une dizaine d'années les REX sont considérés par l'Etat comme une démarche essentielle pour consolider les politiques de prévention. Ils sont notamment institués après chaque événement majeur depuis la création de l'inspection générale de l'environnement en 2000 (Vinet, 2010). Ils sont aujourd'hui très complets et effectués en toute transparence. Désormais, ils orientent en partie les lois de prévention (Vinet, 2010).

Sans chercher à identifier des coupables, ces REX cherchent à identifier et comprendre les dysfonctionnements, pour améliorer la gestion des risques dans le futur. Ils sont donc globalement reconnus par l'ensemble des acteurs et cherchent à en impliquer de nouveaux. Par exemple, les REX sont aujourd'hui en grande majorité réalisés en collaboration avec la communauté scientifique. Les REX ont pour objectif principal de favoriser l'amélioration de la gestion des risques, par l'analyse de situations et de pratiques rencontrées par les acteurs d'une organisation donnée, conduisant *in fine* à modifier les comportements et les pratiques. Pour cela, « le retour d'expérience correspond à un processus dynamique de collecte, d'analyse, de stockage et d'exploitation d'informations relatives à des situations pouvant altérer la sécurité d'un système » (Van Wassenhove & Garbolino, 2008).

Plus précisément, il s'agit d'apprendre à partir d'une expérience dont il a été possible d'extraire une connaissance (Fig. 1.2). « Les mots clefs d'un retour d'expérience sont : analyser, tirer des enseignements, apprendre » (Van Wassenhove & Garbolino, 2008). Ces REX consistent donc avant tout à structurer avec rigueur l'information sur des événements passés, afin d'en tirer des renseignements applicables à de nouveaux projets et améliorer la culture de sécurité. Le lien entre REX et culture de sécurité a ainsi été clairement établi (Chevreau & Wybo, 2007). Cependant, le Retour d'EXpérience ne se restreint pas à l'analyse des causes de dysfonctionnements, il peut également servir l'analyse des modes de bon fonctionnement. En effet, les individus sont souvent enclins à partager leurs expériences avec les autres lorsque celles-ci sont porteuses de progrès (Wybo, 2006 ; Lannoy, 2008).

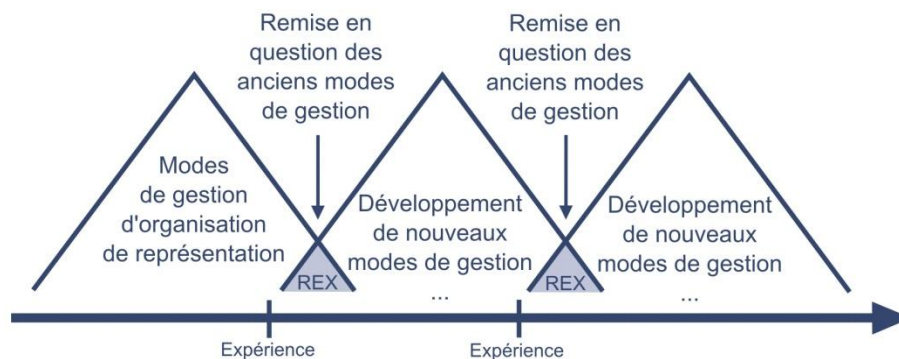


Figure 1.2 : Les Retours d'EXpérience un processus d'amélioration continue.

Quels que soient les pays étudiés dans cette recherche (France – Royaume-Uni – Nouvelle Zélande – Etats-Unis) les REX permettent généralement d’avoir un aperçu plus ou moins détaillé sur les impacts causés par un événement majeur. Néanmoins, cela ne constitue pas leur objectif premier. Plus précisément, la structure des REX, même si elle peut varier, est globalement similaire (Fig. 1.3). Ces REX abordent ainsi quatre axes principaux (Fig. 1.3) correspondant à des temporalités différentes – qui se chevauchent d’ailleurs plus ou moins – liées à l’événement :

- l’analyse de l’aléa (correspondant à la genèse de l’événement) ;
- l’analyse de la gestion de crise (correspondant au cœur de l’événement) ;
- la description des impacts (correspondant au bilan de l’événement) ;
- l’analyse de la phase de reconstruction (correspondant au « temps long » après l’événement).

Ces quatre grands axes permettent alors d’émettre des recommandations ou des propositions qui ont pour objectif de contribuer à améliorer les politiques de prévention et la gestion de crise. Ces recommandations constituent ainsi le cinquième axe des REX (Fig. 1.3).

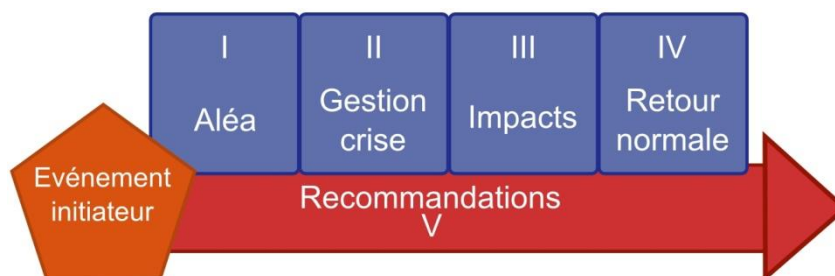


Figure 1.3 : En fonction du temps écoulé depuis l’événement, le REX se concentrera davantage sur une ou plusieurs thématiques.

Cependant, en pratique, le peu de suivi de ces REX semble être une constante. En effet, il est souvent fait rappel dans les REX d’éléments déjà soulignés dans des REX antérieurs. Cela est particulièrement vrai en France où les REX sont peu suivis sur le long terme et les données provisoires rarement confirmées (Vinet, 2010). C’est aussi vrai au Royaume-Uni, où les problématiques liées aux infrastructures critiques avaient été soulignées en 2005 (GONW, 2005), puis l’ont été de nouveaux de deux ans après (EA-UK, 2007). Visiblement, les enseignements de 2005 n’avaient pas été mis à profit. Dans une même continuité, la reconstruction est peu étudiée, ne serait-ce que sur le moyen terme. Pourtant, un tel suivi est fortement recommandé (Hubert & Ledoux, 1999). En cela, la démarche australienne, qui fait suite aux inondations de 2010 dans la région du Queensland, est remarquable, puisqu’elle a abouti à la création d’une plateforme centralisant l’ensemble des informations relatives à la reconstruction (www.qldreconstruction.org.au).

Paradoxalement, si les REX ne jouent pas pleinement leur rôle dans le processus d'amélioration continue de la gestion des risques d'inondation, ils apparaissent néanmoins comme un outil d'analyse intéressant de ces politiques. Ils mettent notamment en exergue les problématiques liées aux impacts induits par les inondations. Ainsi, il semble pertinent de s'appuyer sur ces REX afin d'analyser la vulnérabilité des réseaux techniques face aux inondations. De plus, ces REX illustrent la complexité de la gestion des risques d'inondation et font partie intégrante de cette complexité.

La gestion des risques d'inondation semble être dans une impasse paradigmatique tendant à imposer une réduction des risques – devant se traduire notamment par une réduction des dommages potentiels – alors même que certaines caractéristiques inhérentes aux sociétés actuelles tendent à les accroître (croissance des richesses, de l'urbanisation, des incertitudes, de la complexité des systèmes...). La situation concernant les inondations est donc complexe. Dans la pratique, pour faire face à cette complexité, la gestion de risques d'inondation évolue progressivement. Plus précisément, afin d'adapter et d'améliorer les politiques de gestion, les Retours d'EXpérience (REX) ont été développés. En effet, l'analyse des REX – qui caractérisent une gestion des risques réflexive valorisant l'apprentissage issu de l'analyse des événements passés – offre des pistes de réflexions intéressantes. Ces REX permettent notamment de faire évoluer la gestion des risques en identifiant les problématiques non résolues et les évolutions de la société. Néanmoins, ils ne participent pas actuellement à un processus d'amélioration remarquable de la gestion des risques d'inondation. Ces REX illustrent parfaitement la complexité de la gestion des risques d'inondation et font partie intégrante de cette complexité. Quoi qu'il en soit, les REX font partie des documents précieux permettant d'analyser les politiques de gestion des risques et les impacts induits par les inondations.

1.2 LES RESEAUX TECHNIQUES FACE AUX INONDATIONS : UNE VULNERABILITE AVEREE

La situation concernant les risques d'inondation se révèle complexe. De nouvelles politiques permettant de faire face à cette complexité semblent nécessaires. Dès lors, focaliser ces politiques sur la gestion d'enjeux majeurs comme les réseaux techniques peut sembler être une stratégie pertinente. En effet, les multiples réseaux qui innervent les territoires semblent être d'une part particulièrement exposés aux inondations et d'autre part sensibles à ces inondations.

D'ailleurs, les acteurs de la sécurité civile ont bien conscience de cet état de fait. Ainsi, suite au colloque organisé le 4 octobre 2010 par le secrétariat général de la Zone de

Défense et de Sécurité de Paris, l'alimentation en électricité, la production et la distribution d'eau, les transports et la circulation, la récolte et le traitement des déchets apparaissent parmi les secteurs clés à intégrer dans la réponse opérationnelle afin de faire face à une crue de type 1910. Autrement dit, les réseaux techniques apparaissent déjà comme une problématique majeure en matière de gestion des risques d'inondation.

Cependant, des analyses approfondies apparaissent nécessaires sur ce sujet. Ainsi, les réseaux techniques sont-ils réellement vulnérables ? Si oui, pourquoi le sont-ils ? Pour répondre à ces questions, il convient d'analyser différents REX ainsi que des études spécifiques consacrées à la vulnérabilité des réseaux techniques face aux inondations.

1.2.1 La prise en compte des réseaux techniques dans les REX

Les inondations survenues à Nîmes, le 3 Octobre 1988, apparaissent comme la catastrophe marquante qui va mettre en exergue les problématiques contemporaines liées aux inondations en France (Ledoux, 2005). Ainsi, cette catastrophe est à l'origine de nombreuses réflexions sur la gestion des risques d'inondation en France et son Retour d'EXpérience (REX) va alors nourrir ces réflexions (Ponton et al., 1988).

Or, ce REX souligne dès le premier chapitre – après avoir rappelé l'absence d'alerte qui a totalement pris au dépourvu la population et les services en charge de la gestion de crise – que « *plus que par l'absence d'alerte préalable, inéluctable pour une catastrophe brutale, comme elle le serait d'ailleurs pour un séisme ou un sinistre industriel, on est frappé par le fait que personne ne connaissait la nature de l'importance de la catastrophe : les responsables des services publics se sont trouvés rapidement isolés les uns des autres à cause de la coupure des liaisons téléphoniques et de leur non suppléance par des réseaux hertziens locaux* » (Ponton et al., 1988). Heureusement, certains gestionnaires ont pris des décisions qui ont limité les conséquences de la catastrophe. Ainsi, E.D.F a coupé l'alimentation électrique, ce qui a limité les dégâts (notamment les courts-circuits) et facilité le rétablissement rapide du courant. De la même manière, des stations de pompage ont pu être préservées. Cependant, ces actions isolées et non coordonnées, qui se sont révélées pertinentes, auraient pu au contraire se révéler problématiques. En effet, ce qui peut paraître bon en termes de sécurisation pour un gestionnaire ne l'est pas forcément pour un autre.

L'événement de Nîmes a mis en évidence un certain nombre d'inadaptations des réseaux techniques urbains face aux agressions des écoulements rapides liés au ruissellement pluvial en milieu urbain. Des réflexions ont donc été entreprises afin d'aboutir à la mise en œuvre de nouvelles solutions techniques. Il est ainsi recommandé d'éviter de mettre en souterrain les équipements sensibles (comme les transformateurs) même si cela entraîne un surcoût (Ponton et al., 1988). De même, l'enterrement des câbles électriques est questionné. Si cet enterrement met les câbles électriques à l'abri du vent, il peut poser certains problèmes. Cet enterrement complique notamment les interventions de maintenance. Des recommandations, réparties dans tout le REX, apparaissent intéressantes : généraliser l'installation de câbles pressurisés dans les zones à risques,

favoriser les chaussées bétonnées plutôt que les enrobés traditionnels... (Ponton et al., 1988).

La remise en service très efficace des services publics et le dégagement rapide des voies de communication ont été salués (Fig. 1.4). De plus, il est écrit que « tous les services ont bien entendu tiré les conséquences et les enseignements de leur comportement pendant la catastrophe » (Ponton et al., 1988). Cependant, le coût de cette catastrophe reste important notamment pour les réseaux techniques (1,4 milliard de dommages directs pour le service public, prix qui comprend en grande partie les impacts sur les réseaux divers). En outre, ce REX insiste particulièrement sur l'importance de la gestion des services publics, dont les réseaux techniques font partie intégrante, en période de crise. Il souligne alors d'une part la nécessité d'avoir un poste de commandement en état de fonctionner (télécommunication) et d'autre part l'intérêt de mettre en œuvre une suppléance automatique pour les services publics défaillants (Ponton et al., 1988). Paradoxalement, alors même que les réseaux techniques se sont montrés vulnérables aux inondations, la gestion automatisée des ouvrages d'assainissement, qui nécessitent le développement des techniques de mesure en réseaux, est recommandée.



Figure 1.4 : Problèmes d'accessibilité après les inondations à Nîmes (rue de la Madeleine 1988). Malgré l'ampleur de la catastrophe, le dégagement des voies a été jugé plutôt rapide (crédit photo : Georges Mathon).

Enfin, le REX nîmois établit un lien entre les problématiques posées par les réseaux techniques, les questions d'aménagement et la gestion des risques d'inondation. Par exemple, il est recommandé de repenser la place de l'eau dans la ville : « il apparaît plus généralement que l'écoulement des eaux pluviales et l'ensemble des cours d'eau devraient être pris en compte dans les études d'aménagement et dans les plans d'occupation des sols, comme partie intégrante des éléments de fonctionnement des agglomérations et du cadre de vie. [...]. Le principe de base de l'assainissement pluvial devrait être de ne pas altérer le cycle naturel de l'eau » (Ponton et al., 1988). La conciliation nécessaire entre aménagement des territoires et gestion des

risques d'inondation passe ici par une reconsidération de l'aménagement des réseaux d'assainissement. Néanmoins, cette préoccupation est aussi présente pour les autres réseaux techniques : « *il semble qu'il serait opportun de réviser les différents DTU (Documents Techniques Unifiés) des réseaux urbains en fonction du risque d'inondation torrentiel ; et les villes particulièrement menacées devraient d'ores et déjà prendre ce risque en compte dans leurs opérations* » (Ponton et al., 1988).

Le Retour d'EXpérience concernant les crues du 12 au 14 Novembre 1999 survenues dans les départements de l'Aude, de l'Hérault, des Pyrénées-Orientales et du Tarn a permis d'identifier 36 facteurs de progrès devant permettre d'améliorer le fonctionnement des services déconcentrés. Parmi les 8 facteurs cités en exemple dans la note à l'attention de Madame Dominique Voynet, la Ministre du territoire et de l'environnement de l'époque, on trouve : « *la sécurisation des réseaux essentiels de transmission, d'alimentation en énergie électrique, etc. en repensant les missions de service public des gérants de ces réseaux* » (Lefrou et al., 2000). La sécurisation des réseaux techniques apparaît donc comme une priorité.

Si en termes financier, les dommages sur les réseaux techniques se sont révélés raisonnables (30 millions d'euros cumulés pour la SNCF, EDF-GDF et France-Télécom), leurs impacts concernant l'alerte et la gestion de crise ont été soulignés (Lefrou et al., 2000). Des questionnements, concernant les missions de service public de ces réseaux techniques en période de crise, ont donc été une nouvelle fois soulevés. Si ces services disposaient bien de leurs propres plans de secours, leur préparation était néanmoins de niveau variable. Ainsi, les inondations ont largement dépassé les scénarios envisagés, tout particulièrement en matière de télécommunications.

De plus, les opérateurs de service public, eau, électricité, téléphone, etc., ont des zones de compétence qui ne coïncident pas toujours avec les découpages administratifs, ce qui contribue notamment à compliquer la gestion de crise. Par exemple, le REX fournit quelques données concernant les impacts économiques liés aux dysfonctionnements des réseaux techniques, mais les auteurs précisent bien que ces chiffres sont « globaux » (*i.e.* imprécis et imparfaits). Dans les faits, les auteurs ont été dans l'impossibilité de fournir des données plus précises, car toutes les informations n'ont pas pu être collectées, les logiques organisationnelles étant différentes (Lefrou et al., 2000).

Plus précisément, en ce qui concerne le réseau routier, dès le début de l'inondation, des voies (et non des moindres : RN 9, RN 112, RN 113) ont été coupées (Lefrou et al., 2000). C'est une des caractéristiques principales du réseau routier dont les perturbations matérialisent souvent le début de l'inondation (GONW, 2005). Compte tenu de l'importance de certains axes, il est recommandé de définir des axes routiers prioritaires. Ces axes prioritaires doivent alors être maintenus hors d'eau. De plus, des dégradations sur le réseau ferroviaire ont contribué à dégrader un peu plus l'accessibilité à certains sites (Fig. 1.5).

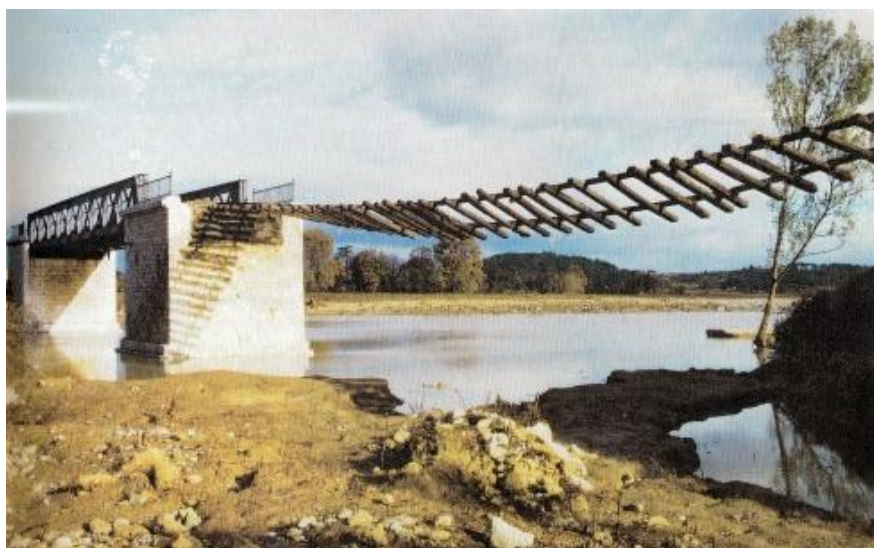


Figure 1.5 : Dégradations sur le réseau ferroviaire (Cuxac d’Aude crue 1999).

Concernant le réseau d'eau potable, 80 000 habitants ont été privés d'eau. Si la distribution a été rétablie assez rapidement, la potabilité de l'eau n'a pu être assurée qu'après une semaine. C'est pourquoi, il est recommandé de réfléchir à l'interconnexion des réseaux qui permettrait dans ce cas d'utiliser des ressources en eau non affectées (Lefrou et al., 2000). Compte tenu de leur contrainte d'implantation, les réseaux d'assainissement apparaissent quant à eux très vulnérables.

Une des préoccupations centrales issues de ce REX concerne tout particulièrement la fiabilité du réseau électrique. Il est écrit : « la fiabilité du réseau de distribution en énergie électrique conditionne la sécurité des personnes et des biens comme la permanence des services vitaux » (Lefrou et al., 2000). Le réseau filaire a subi des dommages (supports endommagés, fils aériens ou souterrains arrachés) qui ont provoqué dans l'Aude des coupures privant 25 000 foyers d'électricité. Plus problématique que ces impacts, l'agressivité de ce réseau envers d'autres réseaux techniques a été mise en exergue. En effet, les problèmes d'alimentation électrique ont mis hors-service des centraux téléphoniques et des systèmes d'alimentation en eau potable. Ainsi, les réseaux de télécommunications qui ont tous connu des défaillances (rupture de câbles, centraux endommagés, dysfonctionnement de RIMBAUD) ont aussi été confrontés à des perturbations d'alimentation en électricité (Lefrou et al., 2000).

Ce REX confirme donc certaines problématiques déjà présentes dans celui de Nîmes. Néanmoins, celui-ci est plus précis et met en avant des problématiques nouvelles concernant les échelles de gestion et l'interdépendance des réseaux techniques. En guise de conclusion, pour ce REX « l'amélioration de la fiabilité des réseaux devient un impératif qui doit trouver des réponses à travers un recours aux nouvelles technologies, mais aussi à travers des réflexions et des actions communes de planification de gestion de crise. Il est notamment nécessaire de bien prendre en compte l'interdépendance des différents réseaux » (Lefrou et al., 2000).

Le Retour d'EXpérience consécutif aux inondations survenues dans le département du Var les 15 et 16 Juin 2010 est particulièrement intéressant. En effet, ce REX est récent et donne donc une vision plus actuelle aux problématiques relatives aux réseaux techniques, permettant alors d'analyser l'évolution de ces problématiques. Ainsi, il est écrit : « *il est important de constater que les réseaux sont particulièrement vulnérables* » (Rouzeau et al., 2010). Il est notamment fait référence ici à un réseau de télécommunication qui a été gravement perturbé, le réseau interministériel RIMBAUD étant lui-même longtemps hors-service (comme en 1999) car ses terminaux avaient été noyés. En revanche, le réseau téléphonique de la SNCF fonctionnait mais les autorités ne le savaient pas. De surcroît, la distribution en énergie a subi de très nombreuses défaillances.

Du fait de l'existence de routes dangereuses et de comportements peu appropriés de la part de certains automobilistes, cinq personnes sont mortes dans leur véhicule durant les inondations (Rouzeau et al., 2010). Il existe en réalité de nombreuses failles concernant la mise en sécurité sur les réseaux routiers : barrages facilement contournables ou peu visibles, manque d'informations... Le réseau d'alimentation en eau potable se distingue quant à lui par la diversité des difficultés subies. Ainsi, dans le Var, la quasi-totalité du réseau a eu à subir des casses, des défauts d'alimentation en énergie, des interruptions de distribution par inondation des zones de captage, des pollutions des eaux distribuées... Ainsi, il a fallu privilégier l'utilisation de l'eau embouteillée ou envisager dans certaines zones la production d'eau potable à partir d'unités mobiles de potabilisation.

Les problématiques liées aux dysfonctionnements des réseaux de télécommunications, qui durant la période de crise ont directement affecté les différents acteurs de la gestion de crise, ont sans doute été les plus remarquables. Ainsi, l'émetteur radio de la direction départementale de sécurité publique du Var a été inondé et les polices ont été privées de toute communication radio (Rouzeau et al., 2010).

Pour conclure, cette analyse souligne que la fragilité des réseaux techniques et leurs impacts sur la gestion de crise comme sur la vie quotidienne des populations sont régulièrement (au moins tous les 10 ans) mis en exergue dans les REX. Par conséquent, dans chaque REX, des recommandations sont faites pour sécuriser ces réseaux, mais *in fine* les problématiques ne semblent pas avoir tellement évoluées depuis 1988.

A noter que la thématique de la réduction de la vulnérabilité des réseaux s'inscrit depuis peu dans un contexte réglementaire clairement défini (MEDD, 2005). La loi n°2004-811 du 13 août 2004 de modernisation de la sécurité civile et ses décrets d'application obligent les gestionnaires de réseaux à prévoir les mesures nécessaires au maintien de la satisfaction des besoins prioritaires de la population lors des situations de crise. Ces besoins prioritaires doivent être définis dès les contrats de concession. Dès 1988, puis surtout en 1999, une telle loi était suggérée. En outre, afin de favoriser le retour à un fonctionnement normal des services ou réseaux, les exploitants doivent désormais désigner un responsable-interlocuteur privilégié au représentant de l'Etat au niveau départemental et au niveau des zones de défense.

Dans les faits, les gestionnaires respectaient déjà l'esprit de cette loi. Elle ne bouleverse donc pas radicalement les pratiques. C'est sans doute pourquoi les inondations survenues dans le Var en 2010 ont une nouvelle fois souligné la vulnérabilité des réseaux techniques.

1.2.2 Les réseaux techniques face aux inondations

Au-delà de ces REX généraux, deux rapports étudient plus spécifiquement la vulnérabilité des réseaux techniques aux inondations. La première étude a été effectuée sur la Loire Moyenne après les crues de Décembre 2003 (EP Loire, 2006). Elle se focalise notamment sur les interdépendances entre les différents réseaux techniques. La deuxième étude se focalise quant à elle sur les effets des dysfonctionnements des réseaux techniques sur les territoires (MEDD, 2005). Ces deux études ont en commun d'analyser chaque réseau technique en les hiérarchisant, soit parce qu'ils se révèlent agressifs envers les autres réseaux, soit parce qu'ils vont fortement perturber d'autres enjeux.

Selon ces études, les conséquences provoquées par les dysfonctionnements des réseaux techniques peuvent être classées selon une échelle d'importance. Cette hiérarchisation doit notamment prendre en considération les impacts matériels sur les biens, les impacts sur les personnes, les impacts sur l'environnement, les impacts sur l'organisation et le fonctionnement du territoire. L'importance de ces différents impacts permet de hiérarchiser leur criticité. Or, d'après ces deux études, le réseau électrique apparaît selon ces critères comme le réseau le plus agressif pour la société, car tous les autres réseaux techniques dépendent de celui-ci pour fonctionner (MEDD, 2005). Le réseau routier est quant à lui indispensable pour la gestion de crise et le réseau de téléphonie fixe apparaît indispensable pour la télégestion non autonome et la gestion de crise (EP Loire, 2006). Enfin, les réseaux d'eau potable et d'assainissement apparaissent alors comme les réseaux techniques les moins critiques (MEDD, 2005).

Au regard, de ces différents impacts, les réseaux techniques ont été considérés dans ces études comme des éléments structurant le territoire et vitaux pour son fonctionnement. Autrement dit, ces études postulent que les réseaux techniques sont des infrastructures critiques. Elles se focalisent donc sur la vulnérabilité des réseaux techniques et sur les impacts consécutifs aux dysfonctionnements de ces réseaux sur un territoire proche (interactions géographiques) ou plus étendu (interactions fonctionnelles). Ces études distinguent alors les impacts matériels (dégâts sur le réseau comme par exemple une canalisation cassée) et les impacts fonctionnels (problèmes de fonctionnement comme par exemple une coupure d'électricité).

Cette différenciation permet d'introduire différentes « vulnérabilités réseaux ». Il est par exemple fait référence à une vulnérabilité aval, à une vulnérabilité interne et à une vulnérabilité externe (EP Loire, 2006). La vulnérabilité aval se caractérise par les impacts directement provoqués par l'inondation sur les réseaux techniques. La vulnérabilité interne est caractérisée par les dysfonctionnements consécutifs aux impacts directs. Enfin,

la vulnérabilité externe traduit la dépendance de la société envers les réseaux techniques (Prost, 1994) (Fig 1.6).

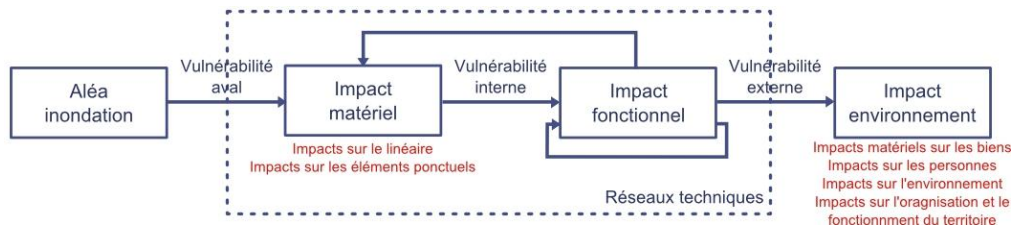


Figure 1.6 : Les réseaux techniques, aléa inondation et impacts, adapté de (Prost, 1994 ; Blancher, 1998).

Au sens strict du terme, la vulnérabilité d'un réseau est caractérisée par sa vulnérabilité aval et sa vulnérabilité interne. La vulnérabilité externe traduit en revanche une vulnérabilité de la société envers le dysfonctionnement de ces réseaux. Elle définit par conséquent leur criticité. Autrement dit, la vulnérabilité externe correspond aux impacts sur l'environnement induits par le dysfonctionnement des réseaux techniques.

Dans ces études, les installations électriques présentent une vulnérabilité variable aux inondations (MEDD, 2005). Les lignes, enterrées ou aériennes, sont ainsi considérées comme peu vulnérables. En revanche, la vulnérabilité des postes de transformation dépend de la hauteur d'eau et de sa turbidité. Enfin, certains équipements apparaissent clairement vulnérables, comme les pylônes en cas de forts débits (MEDD, 2005). Le réseau électrique est généralement maillé jusqu'à un niveau important de détail (quasiment partout jusqu'à la distribution aux particuliers). Ce maillage permet à un poste de prendre temporairement ou définitivement le relais d'un poste défaillant. Cependant, dans le cas des inondations, ce maillage protège assez peu (MEDD, 2005). En effet, les inondations touchent des zones souvent très étendues, par conséquent tous les postes d'une même maille peuvent être concernés et les coupures interviennent directement chez les clients dès lors qu'ils sont inondés. Si le réseau électrique est très agressif vis-à-vis des autres réseaux, il semble peu dépendant des autres réseaux (EP Loire, 2006). Néanmoins, les réseaux de télécommunication et les réseaux viaires sont nécessaires pour les réparations *in situ* et la communication en période de crise.

En matière de téléphonie fixe, les éléments les plus exposés aux inondations sont les sous-répartiteurs (armoire de sous-répartition) et par extension la boucle locale (Fig. 1.7). Ces éléments sont les plus exposés, car ils sont en grand nombre, chacun d'eux desservant alors peu d'abonnés (EP Loire, 2006). Ils n'ont donc pas toujours fait l'objet d'une attention particulière lors de leur construction (en termes de protection contre les inondations) et ils ne font pas l'objet d'une sécurisation particulière. Il est important de souligner que les nœuds sont plus vulnérables que les liaisons. Ainsi, les liaisons, surtout en milieu urbain, sont souvent enterrées, et les différentes expériences ont démontré la grande résistance des câbles téléphoniques enterrés (MEDD, 2005). De plus, beaucoup de câbles sont pressurisés afin d'empêcher l'intrusion d'eau et d'humidité.

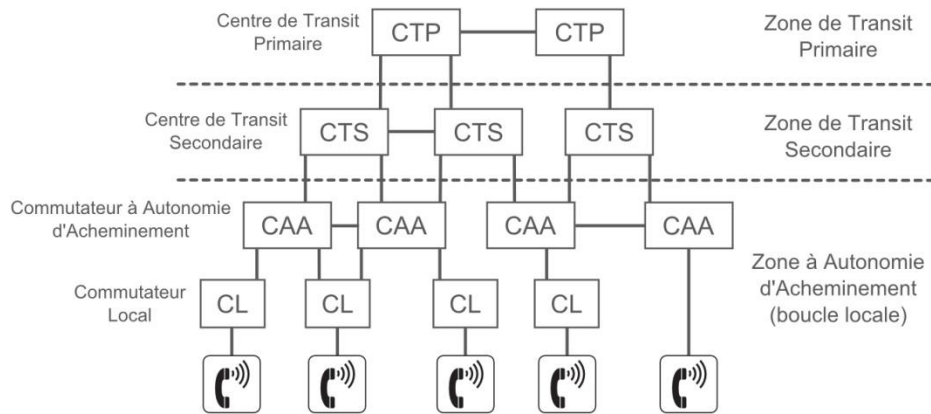


Figure 1.7 : Principe de fonctionnement d'un réseau de téléphonie fixe.

Même sans atteinte physique au réseau de téléphonie fixe, une inondation peut provoquer la saturation fonctionnelle du réseau, comme les catastrophes passées l'ont montré. Par exemple, lors de la catastrophe d'AZF, aucun poste, pas même un sous-répartiteur, n'a été touché physiquement par l'explosion, mais le réseau fonctionnel était au bord de la saturation pour les appels convergents vers Toulouse, avec un risque important de mise hors-service par effet rétrograde (EP Loire, 2006). La modification des comportements induite par une catastrophe (besoins accrus d'informations) peut donc aboutir à sa saturation. Cela est par ailleurs vrai pour tous les réseaux techniques (Fig. 1.8). Plus généralement, l'interaction avec l'environnement est profondément modifiée par les inondations, les réseaux peuvent en subir les conséquences. Par exemple, les poteaux téléphoniques sont vulnérables aux objets transportés par l'inondation et non par l'inondation elle-même.

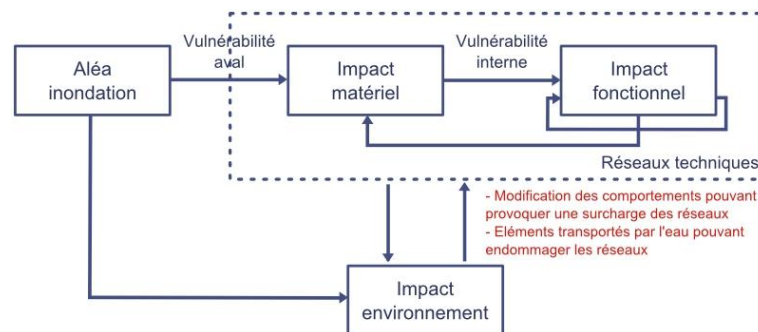


Figure 1.8 : Les réseaux techniques, aléa inondation et impacts, des rétroactions nombreuses.

Le réseau routier peut être considéré comme très vulnérable aux inondations. Il fait partie des premiers réseaux inondés. Or, ce réseau est essentiel pour le maintien des activités, des services et pour une gestion efficace de la crise : évacuation de la population, acheminement des moyens de secours... Ainsi, tous les réseaux en sont dépendants pour leur remise en service (EP Loire, 2006). C'est pourquoi, les dommages provoqués par les défaillances des réseaux routiers sont souvent très lourds dans les bilans des catastrophes quelle que soit leur origine. Et pourtant, ces bilans ne reflètent que partiellement la réalité des dommages, ceux-ci devant théoriquement prendre en

compte des dommages indirects difficilement évaluables, comme les pertes de temps consécutives à l’indisponibilité d’une partie du réseau. Plus généralement, les réseaux de transport subissent des dommages sur l’infrastructure, les modes de transport (les véhicules) et les objets à transporter (MEDD, 2005). Ces dommages provoquent alors une modification de la demande en déplacement.

Le réseau routier se révèle être un véritable piège pour les usagers. Dans les faits, les automobilistes sous-estiment les dangers pendant les inondations. Les statistiques montrent que généralement la moitié des victimes des inondations est causée par l’utilisation d’un véhicule (Huet et al., 2003 ; Ruin, 2007). A noter que le réseau routier n’est pas le seul réseau de transport vulnérable aux inondations. Ainsi, pour le réseau ferroviaire, les inondations peuvent se traduire par la submersion des voies, la coupure de l’alimentation électrique et la coupure des communications servant aux télécommandes...

En outre, les réseaux de transport sont hiérarchisés. Par exemple, le réseau routier est composé de routes nationales, départementales, communales... Or, ces différentes catégories sont gérées par des institutions territoriales différentes et la multiplicité d’acteurs peut se révéler problématique (Fig. 1.9). Néanmoins, ce réseau maillé et hiérarchisé offre la possibilité d’effectuer des itinéraires de déviation, facilitant un retour à la normale. Cette hiérarchisation est par ailleurs une caractéristique commune à tous les réseaux techniques (Fig. 1.9).

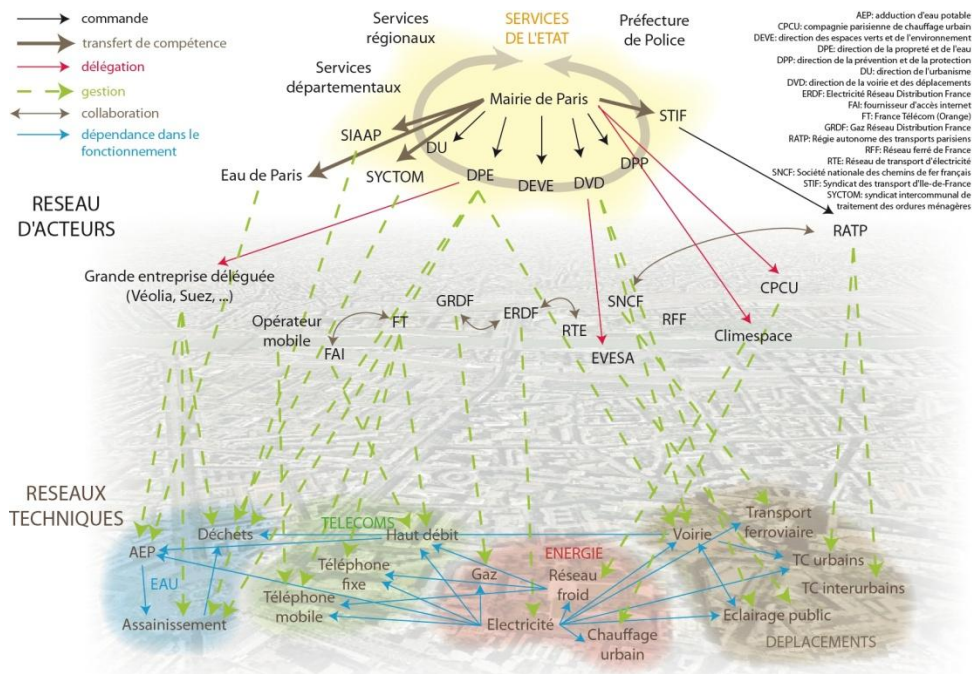


Figure 1.9 : La multiplicité des acteurs en région parisienne (Toubin et al., 2012).

Les réseaux d’eau potable et d’assainissement sont très vulnérables aux inondations (MEDD, 2005). Lors d’une inondation, le principal problème concerne l’arrêt éventuel de

la production d'eau potable pouvant se produire consécutivement à une coupure de l'alimentation électrique ou être induite par la mauvaise qualité de l'eau. Les principaux problèmes concernent alors les installations de pompage et de transport des eaux. Ainsi, la production et la distribution d'eau potable peuvent être interrompues durant plusieurs jours, si aucune source de secours n'est prévue et si la commune ne dispose pas d'un lieu de stockage de capacité suffisante permettant de la desservir pendant le temps nécessaire (MEDD, 2005). Les gestionnaires du réseau d'eau potable disposent donc souvent d'une alimentation de secours en eau : pompage en rivière, alimentation depuis une commune voisine, alimentation par des sources, usines de traitement de secours.

Comme pour l'eau potable, les principales vulnérabilités des réseaux d'assainissement concernent les installations de pompage qui dépendent fortement du réseau électrique (EP Loire, 2006). De plus, l'étanchéité des réseaux d'assainissement permettrait d'éviter les risques de pollution et l'intrusion d'eau parasite, limitant ainsi les coûts de traitement supplémentaires induits par l'inondation. Quoi qu'il en soit, compte tenu de ses contraintes d'implantation, le réseau d'assainissement est très sensible aux inondations pour des niveaux de crues parfois relativement bas (MEDD, 2005).

Enfin, une des spécificités des réseaux techniques réside dans leurs interdépendances (Fig. 1.9). Selon les REX étudiés, ces interdépendances peuvent être géographiques ou fonctionnelles. Les interdépendances géographiques sont induites par la proximité spatiale entre des éléments pouvant influencer l'un sur l'autre. Par exemple, l'effondrement d'une chaussée peut provoquer la rupture de câbles et de canalisations (Fig. 1.10). Les interdépendances fonctionnelles sont consécutives aux dépendances des réseaux envers les autres réseaux. Ainsi, le réseau d'eau potable dépend du réseau électrique pour son fonctionnement, car des éléments constitutifs du réseau d'eau potable requièrent de l'électricité pour fonctionner.



Figure 1.10 : Effondrement d'une chaussée dans un Parking menaçant les réseaux techniques dans le Var après les inondations de Juin 2010.

A l'aide d'un exemple théorique, il est possible de synthétiser certains éléments mis en exergue dans les REX (Fig. 1.11). Ainsi, une inondation provoquant l'ennoiement d'un transformateur électrique perturbe le réseau électrique engendrant alors de nombreuses coupures d'électricité. Ces coupures créent des perturbations sur certaines parties du réseau d'eau potable parvenant même à endommager des pompes de relevage. Pour remettre en service le réseau d'eau potable, tout comme le réseau électrique endommagé, des interventions *in situ* sont nécessaires. Cependant, la coordination des interventions est difficile car les coupures électriques semblent aussi perturber le réseau téléphonique. De plus, le réseau routier est partiellement inondé, par conséquent les composants endommagés sont difficilement accessibles. D'ailleurs, il apparaît que les chaussées enrobées sont très détériorées et ce sont ces détériorations qui ont endommagé les câbles téléphoniques perturbant alors le réseau téléphonique.

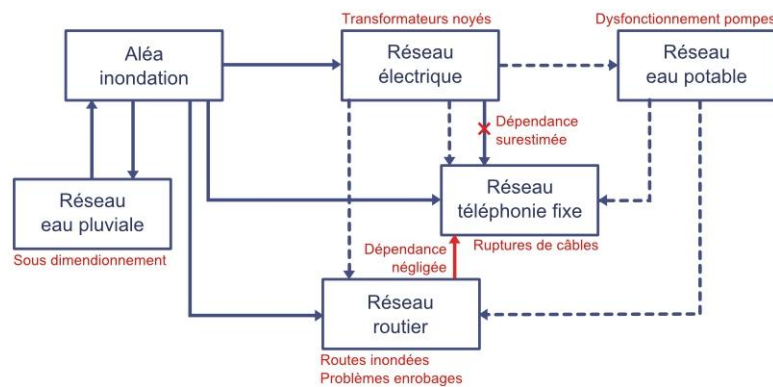


Figure 1.11 : Scénario fictif illustrant les interdépendances entre réseaux techniques.

Cet exemple montre que la complexité induite par les interdépendances entre réseaux techniques peut engendrer des erreurs d'interprétation qui nuisent à une bonne gestion de ces réseaux en période de crise. Ainsi, dans l'exemple donné, les défaillances du réseau de téléphonie fixe ne sont pas liées aux dysfonctionnements du réseau électrique comme il serait raisonnable de le penser. De plus, ce scénario vient remettre en question les hiérarchies retenues dans les deux études ci-dessus, car il est difficile d'identifier le réseau le plus critique. En effet, les impacts de ces réseaux ne peuvent être étudiés indépendamment. Ils sont le résultat de mécanismes complexes dépassant l'impact d'un seul réseau.

Ces études ont permis *in fine* d'identifier les différents défis que doivent être en mesure de relever les différents gestionnaires des réseaux techniques dans un contexte de risques d'inondation. Ainsi, ces réseaux doivent être en mesure de résister aux pressions hydrauliques (être étanches, résister à la pression de l'eau...), de résister aux pressions mécaniques (résister aux chocs des éléments charriés par l'eau, de résister aux déformations d'éléments voisins...), de faire face aux dysfonctionnements des autres réseaux, le but étant d'assurer leur continuité de service (malgré l'endommagement du réseau ou du dysfonctionnement d'autres réseaux) pour permettre le bon fonctionnement du territoire.

A l'aide de Retours d'EXpérience et d'études spécifiques sur la vulnérabilité des réseaux techniques, il est possible de conclure que les réseaux techniques sont particulièrement vulnérables aux inondations. En effet, les réseaux techniques sont exposés aux inondations de par leurs structures et leurs contraintes d'implantation. De même, certains composants nécessaires au bon fonctionnement de ces réseaux sont très sensibles aux inondations. Même si les caractéristiques de ces réseaux diffèrent, ils sont tous directement vulnérables aux inondations. De plus, leurs interdépendances augmentent leurs vulnérabilités. Ces interdépendances incitent dès lors à ne pas les étudier isolément. Enfin, les REX laissent entrevoir la difficile réduction de la vulnérabilité des réseaux techniques. Ainsi, les problématiques liées aux réseaux techniques étaient déjà présentes dans le REX nîmois de 1988. Or, ces problématiques se retrouvent en partie dans le REX du Var de 2010 et ce malgré une série de recommandations ayant finalement abouti à une nouvelle législation.

1.3 LES RESEAUX TECHNIQUES DES INFRASTRUCTURES CRITIQUES PAR EXCELLENCE

La vulnérabilité des réseaux techniques aux inondations ne justifie pas totalement de se focaliser sur ces réseaux. En effet, si les impacts engendrés par la dégradation des réseaux techniques étaient faibles, la forte vulnérabilité de ces infrastructures serait d'une importance très relative. Or, la vulnérabilité de ces réseaux techniques se révèle problématique précisément parce que les impacts liés à la dégradation des réseaux sont importants (MEDD, 2005). Ainsi, il est désormais courant de qualifier ces infrastructures « d'infrastructures critiques » (Matisziw et al., 2008 ; Johansson & Hansel, 2010).

Néanmoins, les évaluations économiques données jusqu'à présent sont très imprécises et donnent finalement une vision assez vague de leur criticité. C'est pourquoi, il semble désormais intéressant d'analyser la place réservée aux réseaux techniques dans la littérature relative aux infrastructures critiques.

1.3.1 L'apparition des infrastructures critiques dans les REX anglo-saxons

Les infrastructures critiques font l'objet d'une attention particulière depuis quelques années dans la plupart des pays industrialisés. La notion d'infrastructure critique s'est imposée, dans toute son imprécision et ses variantes nationales, comme une manière de formuler un ensemble de questions nouvelles posées aux pays industrialisés (Galland, 2010). Il ne s'agit pas ici d'interroger « la notion » d'infrastructure critique, mais il semble néanmoins nécessaire de souligner le flou qui entoure celle-ci et les doutes concernant sa pertinence. En effet, il n'existe pas une définition unique reconnue, les définitions varient ainsi en général selon les pays et la plupart de ces définitions restent très générales (Ollinger, 2007 ; Galland, 2010).

Une infrastructure critique est généralement définie par l'impact que son dysfonctionnement engendrerait. Les infrastructures sont alors jugées critiques si leur dysfonctionnement menace (affaiblirait considérablement) la sécurité, l'économie, le mode de vie et la santé publique d'une ville, d'une région, voire d'un Etat (Rinaldi, 2004), comme par exemple :

- les télécommunications,
- les systèmes de génération d'électricité,
- les systèmes de stockage et de transport du gaz et du pétrole,
- la banque et la finance,
- les transports de personnes,
- l'approvisionnement et la distribution de l'eau,
- les services d'urgence, et ceux qui assurent la continuité du gouvernement.

Or, les questionnements concernant la vulnérabilité de ces infrastructures critiques apparaissent dans des REX récents. C'est le cas par exemple du REX effectué après les inondations de l'été 2007 au Royaume Uni (EA-UK, 2007). Le constat général issu de ce REX est assez préoccupant : il apparaît que les infrastructures critiques ne font pas l'objet de politiques de protection à la hauteur des enjeux qu'elles représentent. La majorité des infrastructures critiques sont ainsi trop peu protégées et le Royaume-Uni a échappé de peu à plusieurs « blackout » (*i.e.* une panne généralisée des réseaux techniques) durant ces inondations (Fig. 1.12) (EA-UK, 2007). Les réseaux d'eau, d'assainissement et d'électricité apparaissent, dans leur ensemble, particulièrement vulnérables. De même, des éléments spécifiques sont aussi apparus très vulnérables, comme les réservoirs ou les centrales téléphoniques. Ainsi, parmi les recommandations, une révision de la législation sur les réservoirs a été proposée (EA-UK, 2007).



Figure 1.12 : Le poste de transformation de Walham proche d'être submergé.

Concrètement, environ 140 000 personnes sont restées sans adduction d'eau potable pendant 17 jours après l'inondation d'une station de traitement. Le poste de

transformation de Walham, desservant près d'un demi-million de personnes en électricité, a quant à lui évité de peu la submersion (EA-UK, 2007). Des équipes (comprenant des militaires) se sont ainsi relayées toute la nuit du 22 juin pour assurer la construction de 1000 miles de protection autour du site (Fig. 1.12). Dix heures auront été ainsi nécessaires pour sécuriser le site. D'autres sites de moindre importance n'ont pas bénéficié de telles mesures : de nombreuses coupures d'électricité et des baisses de tension se sont produites (EA-UK, 2007). Une étude majeure a donc été lancée afin de recenser les infrastructures critiques, fournissant des services vitaux, situées en zones inondables (EA-UK, 2007). Cette étude souligne en particulier la forte exposition des infrastructures critiques britanniques aux inondations (Tab. 1.1).

Infrastructures critiques	Nombre de sites exposés	Pourcentage des sites
Hôpitaux	90	6%
Maisons de santé	1028	7%
Ecoles	1796	7%
Centres de santé	2971	10%
Prisons	19	13%
Stations de police	397	13%
Stations d'ambulance	172	14%
Pompiers	172	14%
Sites électrique	265	15%
Gares	8423	17%
Sites Gaz	512	28%
Assainissement	23	58%

Tableau 1.1 : Résumé en chiffre de l'étude concernant l'exposition aux inondations des infrastructures critiques au Royaume-Uni (source : EA-UK, 2007).

Deux ans plus tôt, un REX soulignait déjà les problématiques liées aux infrastructures critiques et plus particulièrement les enjeux liés au bon fonctionnement des réseaux techniques. Ainsi, les inondations de Carlisle de l'été 2005, bien que d'une ampleur moindre par rapport aux inondations de 2007, faisaient apparaître les réseaux techniques comme étant les premiers éléments perturbés par l'inondation, ces réseaux se révélant par la suite être un facteur de vulnérabilité important. La ville de Carlisle avait été alors privée d'électricité dans son ensemble pendant 36h (GONW, 2005). Le réseau

téléphonique avait été totalement interrompu dans le nord de Carlisle empêchant la population de joindre les secours (GONW, 2005).

Ces problématiques ne sont pas entièrement nouvelles. Les infrastructures critiques sont depuis longtemps reconnues comme une source de vulnérabilité importante pour les populations (Kroger, 2008). Ainsi, mettre les services de secours en dehors des zones inondables relève du « bon sens ». Cependant, il ressort de ces REX que cette dépendance des populations (et plus généralement de la société) vis-à-vis de ces infrastructures serait apparemment de plus en plus importante (La Porte, 2006 ; La Porte, 2007). De plus, ces infrastructures deviennent elles-mêmes de plus en plus interdépendantes, provoquant alors des effets en chaîne de plus en plus incontrôlables (La Porte, 2006 ; La Porte, 2007).

Dans les faits, plus que le demi-million de personnes directement affectées par le dysfonctionnement d'un poste de transformation comme celui de Walham, c'est toute une région qui se retrouverait fortement impactée par ce dysfonctionnement. Or, les résultats de l'étude menée sur les infrastructures critiques après les inondations de 2007 ne traduisent pas la totalité des conséquences liées à l'exposition directe de ces infrastructures critiques aux inondations.

Ainsi, si 16% des gares sont directement exposées aux inondations, cette exposition peut impliquer une perturbation du trafic ferroviaire bien supérieure, compte tenu du fonctionnement général du réseau. De plus, cette étude ne prend pas en compte les interrelations entre les différentes infrastructures étudiées.

Pour conclure, l'étude menée sur les infrastructures critiques après les inondations de 2007 au Royaume-Uni souligne que les réseaux techniques sont particulièrement exposés aux inondations. Il apparaît même que les réseaux techniques sont les infrastructures critiques les plus exposées et leur vulnérabilité semble avérée. Néanmoins, cette étude souligne paradoxalement peu la criticité de ces infrastructures, la criticité de ces réseaux est en fait postulée. Une fois encore les chiffres donnés restent imprécis. Quelle est alors cette criticité ?

1.3.2 Les réseaux techniques, des infrastructures critiques ?

La littérature concernant les infrastructures critiques connaît un développement important depuis les années 2000 (Galland, 2010). Dans un état de l'art approfondi, il est fait référence à 55 articles, rapports ou normes pour la période 1999-2010 (Yusta et al., 2011). Cet état de l'art fait d'ailleurs apparaître l'importance accordée aux réseaux techniques dans ce corpus (Tab. 1.2). Ainsi, malgré l'absence de listes reconnues et l'abondance des définitions, les réseaux techniques apparaissent presque toujours comme des infrastructures critiques.

Electricité	Gaz	Pétrole	Assainissement	Eau potable	Communication	Informations	Régulations	Routes	Ferroviaire	Activités Humaines	Banques
14%	6%	3%	6%	7%	9%	5%	12%	5%	5%	11%	8%

Tableau 1.2 : Les études concernant les infrastructures critiques (source : Yusta et al., 2011).

En acceptant les contradictions inhérentes au terme, une infrastructure n'est pas critique en elle-même. Sa criticité est fonction de l'impossibilité des sociétés à faire face à son dysfonctionnement (*i.e.* de leur dépendance et de leur vulnérabilité à ces infrastructures). Autrement dit, les dysfonctionnements des infrastructures critiques sont sources de dangers pour les populations. D'ailleurs, « *l'une des raisons, sans doute, à la fois du succès de la notion et de ses difficultés pratiques de mise en œuvre, tient au fait qu'en même temps qu'elle recense sans cesse de nouvelles sources de danger, elle ne se « définit » finalement que par l'intensité des conséquences de ces dangers* » (Galland, 2010). Ainsi, une infrastructure est jugée critique en dehors de toute considération sur l'exposition à un aléa particulier.

Deux caractéristiques confirment que les réseaux techniques constituent bien des infrastructures critiques. Premièrement, les impacts liés à leurs dysfonctionnements sont considérables. Par exemple, différents réseaux électriques à travers le monde ont connu ces dernières années des perturbations importantes menant à des « *blackouts* ». Or, il apparaît que si ces perturbations sont généralement de courtes durées, pas plus d'une journée, elles peuvent perturber plusieurs millions de personnes (Tab. 1.3).

Date	Lieu	Durée	Personnes affectées	Causes du « blackout »
14 Aout 2003	USA (NYC)	16	50 (Mio)	Problème de maintenance
28 Sept. 2003	Italie	18	56 (Mio)	Surcharge du réseau
12 Juillet 2004	Athènes	3	5 (Mio)	Voltage collapse (écroulement de tension)
18 Aout 2005	Java-Bali	7	100 (Mio)	Problème sur une ligne du réseau de transmission entraînant des défaillances en chaîne sur le réseau
4 Nov. 2006	Europe (ouest)	2	15 (Mio)	Surcharge du réseau
10 Nov. 2009	Brésil	6	60 (Mio)	Court-circuit sur une ligne puis défaillance en chaîne

Tableau 1.3 : Les « *blackouts* » dans le monde.

Ces impacts caractérisent la fragilité intrinsèque des sociétés aux dysfonctionnements de ces réseaux. Ainsi, « un simple » incident sur un satellite de télécommunication (Galaxy IV) a provoqué le dysfonctionnement de 90% du réseau de communication américain, interrompant brutalement divers services de radiomessagerie et de transactions bancaires, perturbant dans le même temps les communications de plusieurs grands médias (Michel-Kerjan, 2000). Economiquement, ces incidents ont des conséquences importantes. Par exemple, la panne d'électricité survenue le 14 août 2003, qui a duré jusqu'à 4 jours dans diverses régions des Etats-Unis, a entraîné des coûts directs estimés entre 4 et 10 milliards de dollars (US-Canada Power System Outage Task Force, 2004).

Deuxièmement, ces infrastructures constituent des systèmes complexes (Kroger, 2008). Ainsi, les impacts liés à leurs dysfonctionnements se révèlent difficilement évaluables. En effet, les effets induits par ces dysfonctionnements sont de natures tellement différentes que l'évaluation des retombées économiques de ces événements est imprécise.

De plus, à l'échelle mondiale, la répétition de tels événements souligne une vulnérabilité récurrente de ces infrastructures à de nombreux aléas de natures diverses (Tab. 1.3). Ces aléas peuvent notamment être d'ordre institutionnel, naturel, technique, social ou encore systémique (Kroger, 2008) (Fig. 1.13). Certains chercheurs préfèrent utiliser le terme de pression plutôt que celui d'aléa en référence au modèle PAR (Pressure And Release) de Blaikie et al. (1994) qui peut être utilisé pour étudier ces infrastructures critiques dans un contexte de risques (Hellstrom, 2007). Face à ces multiples sources qui ne sont pas indépendantes, il convient alors d'étudier une vulnérabilité systémique des infrastructures critiques (Hellstrom, 2007).

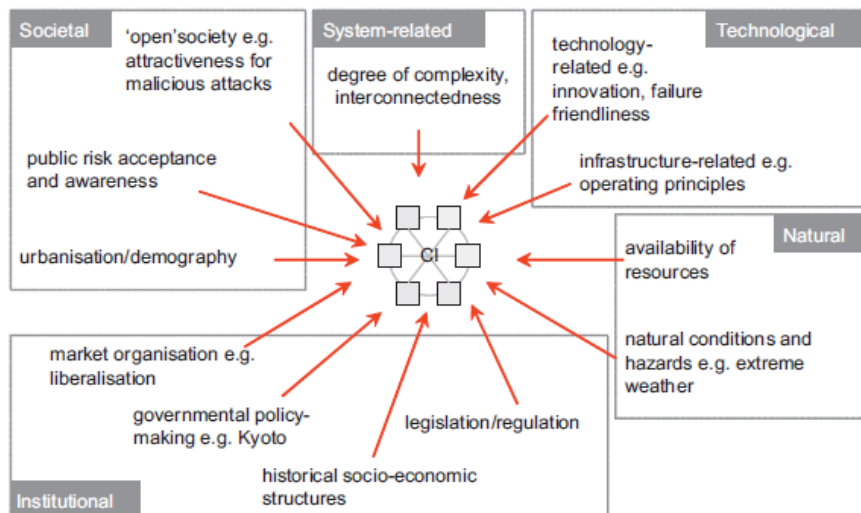


Figure 1.13 : Les infrastructures critiques « sous pressions » (Kroger, 2008).

Enfin, les études concernant les infrastructures critiques sont particulièrement intéressantes lorsqu'elles traitent les questions d'interdépendances entre infrastructures, puisque ces infrastructures sont jugées critiques notamment parce qu'elles sont

interdépendantes. En effet, la défaillance d'une infrastructure critique peut engendrer (et engendrera souvent puisque ses impacts sont importants) la défaillance d'une autre infrastructure critique, entraînant alors des défaillances en chaîne par effets dominos (Eusgeld et al., 2009, Eusgeld et al., 2011). Parler d'infrastructures critiques interdépendantes constitue donc un pléonasme. Ainsi, les conséquences de la défaillance d'une infrastructure critique dépassent largement la défaillance de celle-ci. Or, à l'instar des infrastructures critiques, les réseaux techniques sont interdépendants.

En somme, les réseaux techniques sont des infrastructures critiques. En effet, ils en possèdent les caractéristiques principales. Leur criticité est donc bien avérée.

1.3.3 Les moyens d'actions mis en œuvre pour sécuriser les réseaux techniques

Compte tenu de leur criticité, la sécurisation des réseaux techniques représente un défi majeur pour la gestion des risques. En France, chaque réseau technique a une mission de service public donnant lieu à des obligations. Ainsi, chaque gestionnaire de réseaux est tenu de posséder un plan de protection et surtout un plan de remise en service, car si les coupures sont admises, elles ne doivent pas durer trop longtemps.

Par exemple, pour la téléphonie fixe, le plan RADIAL (Réparation Accélérée des Dégâts d'Intempéries Aux Lignes) d'Orange (anciennement France Télécom) est déclenché lorsque le nombre de clients interrompus est supérieur à la capacité habituelle de rétablissement. L'objectif affiché de ce plan est d'assurer un retour à la normale en 15 jours maximum. Afin d'assurer la continuité du service malgré l'endommagement du réseau, du matériel de substitution peut être prévu (câbles de secours, connectiques) et des installations de secours provisoires peuvent être utilisées : lignes téléphoniques de fortune, cabines téléphoniques mobiles... Avec les préfetures, un groupe spécial a pour objectif de garantir une vision globale de la situation et des actions menées pour mieux hiérarchiser les interventions. De plus, des responsables sont chargés des relations avec les collectivités locales et accompagnent les élus dans leur communication vers leurs administrés.

Pour le réseau électrique, ERDF a établi, en collaboration avec ses partenaires et les services des collectivités territoriales et de l'État, des plans adaptés aux différents types de crises : le plan Communication et ORganisation en cas d'Evènement Grave (COREG) ; le plan d'Aide à la Décision pour les incidents ELectriques (ADEL) ; le plan de continuité d'activité en cas de pandémie ; le plan de reprise d'activité en cas de panne informatique... Pour cela, ERDF dispose d'une Force d'Intervention Rapide Electricité (FIRE) constituée de groupes d'intervention présents partout en France. Ces groupes sont spécialement préparés à faire face aux situations exceptionnelles. En 2009, lors de la tempête Klaus, la FIRE, qui avait mobilisé plus de 6 000 agents, était parvenue à rétablir en quatre jours plus de 90 % des 1,7 million de personnes concernées (ERDF, 2009) (Fig. 1.14).

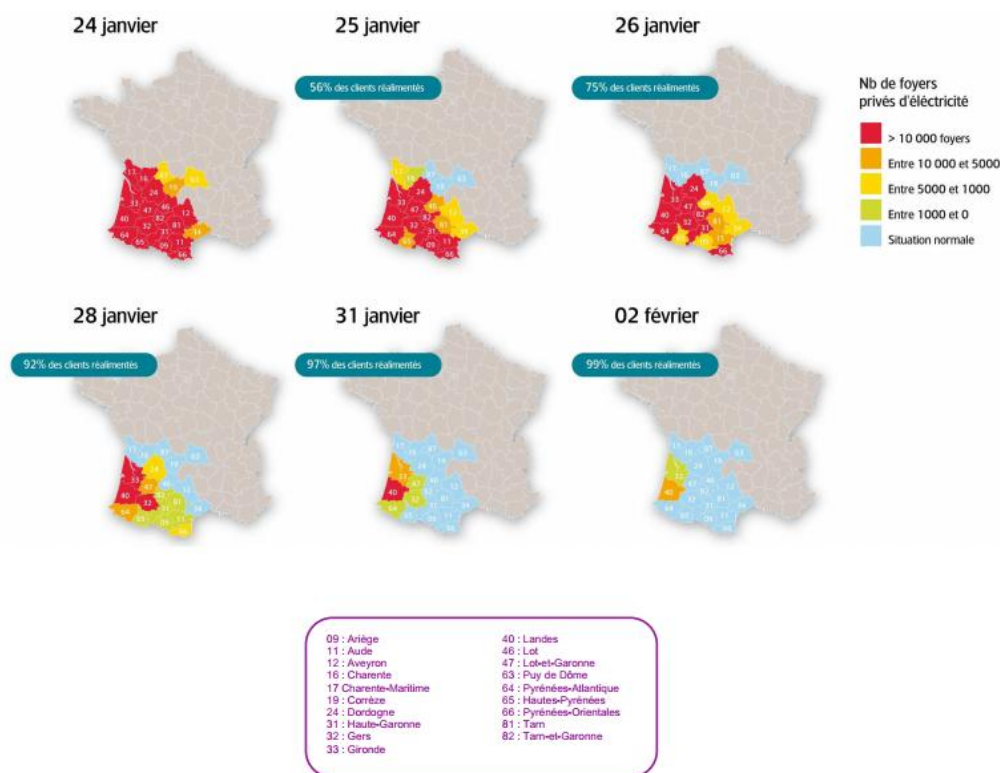


Figure 1.14 : Evolution du rétablissement de l'électricité suite à la tempête Klaus survenue en Janvier 2009 (ERDF, 2009).

Plus généralement, dans son contrat de service public, ERDF s'est engagé à : « garantir, d'ici 2015, en cas de panne importante suite à un aléa climatique la réalimentation dans les 12 heures qui suivent la fin de l'aléa climatique, de sites accessibles à la population. La liste de ces sites sera établie en étroite concertation avec les responsables locaux, et notamment les collectivités locales à qui il appartient de définir les priorités en fonction du contexte local. EDF Réseau Distribution s'engage à transmettre un bilan de l'élaboration de cette liste et des travaux engagés le 1er juin 2006, puis chaque année à l'occasion du bilan annuel » (Bellec et al., 2010).

Malgré ces différents plans, les inondations récentes, comme celles du Var en 2010, montrent que la sécurisation des réseaux techniques est toujours un enjeu problématique. Le défi à relever est en fait immense car le fonctionnement de ces réseaux apparaît de plus en plus complexe, complexité engendrée en partie par une interdépendance croissante des réseaux techniques. Or, les modes de gestion et les plans de protection restent très sectoriels, la prévention des risques se fait ainsi réseau par réseau. Compte tenu de ces interdépendances, ces approches sectorielles peuvent alors se révéler contre productives. Des approches plus collaboratives sont sans doute préférables pour faire face à cette complexité.

Les réseaux techniques étant considérés comme des infrastructures critiques, les plans de protection concernant les infrastructures critiques rentrent dans le cadre de la sécurisation des réseaux techniques. En effet, l'attention particulière dont les

infrastructures critiques font l'objet a abouti à l'instauration de nombreux plans de protection (Ollinger, 2007 ; Galland, 2010 ; Yusta et al., 2011) (Tab. 1.4).

Pays	Programme	Références
France	Livre blanc sur la défense et la sécurité nationale	(SGDSN, 2011)
Allemagne	Federal computer emergency response team	(BSI, 2011)
Espagne	Spanish national infrastructures protection plans	(BOE, 2011)
Royaume-Uni	Initiative for critical infrastructures sectors	(CPNI, 2011)
Etats-Unis	National infrastructure protection plan	(NIPP, 2009)

Tableau 1.4 : Différents plans de protection pour sécuriser les infrastructures critiques.

Par exemple, l'ensemble des travaux menés par l'Etat américain et ses différents ministères vis-à-vis des infrastructures critiques ont abouti en 2009 à l'élaboration du « *National Infrastructure Protection Plan* ». Le « *patriot act* » voté en 2001 suite aux attentats du 11 Septembre 2001 introduisait déjà les enjeux représentés par les infrastructures critiques, le plan de protection ne peut donc en être totalement séparé, comme en atteste l'importance accordée dans ce plan à la menace terroriste. L'objectif est d'ailleurs clairement énoncé : « *build a safer, more secure and more resilient America by preventing, deterring, neutralizing or mitigating the effects of deliberate efforts by terrorists to destroy, incapacitate, or exploit elements of our Nation critical infrastructure and key resources and to strengthen national preparedness, timely response and rapid recovery of CIKR in the event of an attack, natural disaster or ether emergency* » (NIPP, 2009).

Dans une optique de protection, ces travaux ont permis de déterminer un cadre méthodologique d'analyse des infrastructures critiques (Fig. 1.15).

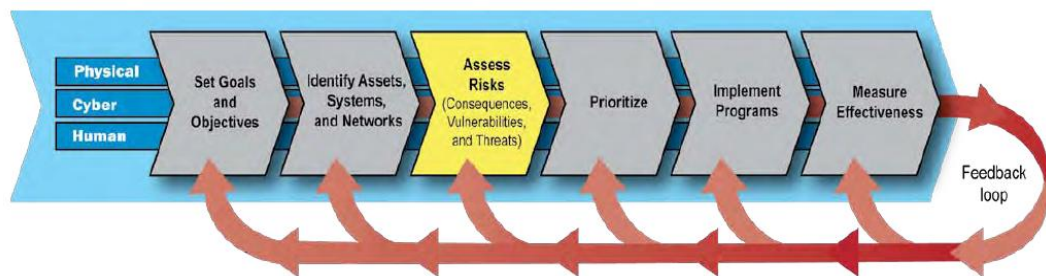


Figure 1.15 : Méthodologie mise en place pour l'élaboration du plan de protection des infrastructures critiques américaines (NIPP, 2009).

Ce cadre méthodologique s'appuie sur l'objectif précité, puis sur une identification *a priori* des infrastructures critiques. La criticité de ces infrastructures est alors évaluée afin de les hiérarchiser et par conséquent de hiérarchiser les actions à entreprendre (NIPP,

2009). Cette évaluation comparative est fondée sur certains critères pouvant être divisés en quatre catégories principales :

- **La santé et sécurité publique** : évaluer les effets sur la vie et le bien-être des populations (par exemple : le nombre de décès, le nombre de personnes affectées...).
- **L'économie** : évaluer les pertes directes et indirectes (par exemple : les coûts de réparation de l'infrastructure, le coût pour réagir et se remettre de l'attaque, les coûts résultant de la perturbation de produits ou de services, les coûts à long terme en raison des dommages causés à l'environnement).
- **L'impact psychologique** : évaluer les effets sur le moral du public et la confiance dans les institutions économiques nationales et politiques.
- **La gouvernance** : évaluer les capacités d'un gouvernement ou d'une industrie à maintenir l'ordre, à assurer un minimum de services publics, à assurer la santé et la sécurité...

A la suite de cette évaluation, des programmes d'actions doivent être établis donnant alors naissance à des mesures effectives afin d'assurer la sécurisation de ces infrastructures (NIPP, 2009). Cette méthodologie se veut rétroactive afin de permettre une amélioration continue de la démarche (Fig. 1.15). En effet, l'identification *a priori* des infrastructures critiques a pu omettre des infrastructures se révélant *a posteriori* vitales (NIPP, 2009). De la même manière, les mesures de protection adoptées peuvent venir modifier l'évaluation de la criticité de certaines infrastructures. Mis à part ces aspects méthodologiques très généraux, il est difficile d'en savoir plus sur ce plan national, notamment sur les mesures effectives à prendre.

En Europe, à la demande du Conseil Européen, la Commission rendait en Janvier 2006 un Livre vert sur un Programme Européen de Protection des Infrastructures Critiques. Ce livre est le fruit d'un travail préalable et de deux séminaires intergouvernementaux. Ainsi, depuis 2008, l'Europe dispose d'une directive (2008/114/CE) concernant les infrastructures critiques. Cette directive établit un processus européen de recensement et de désignation des Infrastructures Critiques Européennes (ICE). De plus, cette directive définit une approche pour évaluer la nécessité d'améliorer leur protection (CEU, 2008).

L'objectif de cette directive est d'aboutir à un recensement des ICE et à une évaluation des impératifs de sécurité concernant ces infrastructures. Ce recensement serait effectué en ayant recours à des critères communs, car il existe dans la Communauté un certain nombre d'infrastructures critiques, dont l'arrêt ou la destruction aurait un impact transfrontalier significatif (CEU, 2008). Des recommandations ont donc été faites. Ainsi, la directive affirme que toutes les ICE désignées comme telles devraient être dotées de Plans de Sécurité d'Opérateurs (PSO) ou de mesures équivalentes comportant un

recensement des points importants, une évaluation des risques, ainsi que l'identification, la sélection et le classement par ordre de priorité des procédures à mettre en place (CEU, 2008).

Plus particulièrement, cette directive place les Etats membres face à leur responsabilité : « *c'est aux États membres qu'incombe en dernier ressort la gestion de dispositifs de protection des infrastructures critiques sur leur territoire national, tout en se félicitant des efforts déployés par la Commission en vue d'élaborer une procédure à l'échelle européenne aux fins du recensement et de la désignation des infrastructures critiques européennes (ICE) ainsi que de l'évaluation de la nécessité d'améliorer leur protection* » (CEU, 2008). Elle recommande pour cela de s'appuyer sur les compétences spécifiques de certains acteurs : « *dans la mesure où différents secteurs possèdent une expérience, une expertise et des exigences particulières en matière de protection des infrastructures critiques, il convient d'élaborer et de mettre en œuvre une approche communautaire dans ce domaine, en tenant compte des spécificités et des mesures sectorielles existantes, notamment celles en vigueur au niveau communautaire, national ou régional, y compris où il existe déjà des accords transfrontaliers d'assistance mutuelle entre propriétaires/opérateurs d'infrastructures critiques. Compte tenu du rôle très important joué par le secteur privé dans la surveillance et la gestion des risques, la planification de la continuité de l'exploitation et la reprise d'activité après une catastrophe, l'approche communautaire doit encourager une participation pleine et entière de ce secteur* » (CEU, 2008).

A la lecture de ces plans, de nombreuses questions restent en suspens. Ainsi, les listes d'infrastructures critiques sont plus ou moins exhaustives et précises. De plus, les aléas contre lesquels protéger ces infrastructures ne sont parfois pas précisés, l'objectif étant souvent de protéger ces infrastructures contre tous les types d'aléa. Enfin, les méthodologies proposées sont très vagues. En outre, peu d'informations ressortent à propos de la mise en œuvre de ces plans. Ainsi, « *il est difficile de donner à voir un état d'avancement des travaux en cours sous ce registre, dans pratiquement quelque pays que ce soit. Rares sont en effet les nations qui communiquent avec transparence sur leurs avancées et difficultés propres à mettre en œuvre les vastes programmes qu'elles se sont données en la matière* » (Galland, 2010).

Si ces différents plans sont intéressants pour appréhender les problématiques liées aux infrastructures critiques, paradoxalement, en termes de politiques de protection, ces rapports apparaissent moins pertinents. En effet, l'impact de ces plans sur la sécurisation des réseaux techniques est à l'heure actuelle peu sensible. De plus, ils ont tendance à renforcer les approches sectorielles alors même que les interdépendances devraient être au cœur de ces plans. Dans le même temps, ces plans montrent les limites des approches collaboratives visant à rassembler différents partenaires autour d'une même table, des approches plus intégratives semblent nécessaires.

Les réseaux techniques sont des infrastructures critiques devant faire l'objet d'une attention particulière. Ainsi, les politiques de gestion des risques se focalisent de

plus en plus sur ces infrastructures. Néanmoins, cette expression demeure assez floue et actuellement les plans de protection s'accumulent dans de nombreux pays sans pour autant qu'il soit possible de juger leur efficacité et leur pertinence. Plus précisément, les réseaux techniques ont depuis très longtemps fait l'objet d'une attention particulière. En France, il existe donc des plans concernant leur protection et leur remise en service. Cependant, ces plans sont sectoriels. Or, comme ces réseaux sont interdépendants, ils requièrent de dépasser les politiques de protection sectorielles. Les moyens mis en place et les efforts actuels de protection peuvent alors se révéler contre-productifs puisque l'approche méthodologique ne semble pas pertinente.

1.4 SYNTHÈSE DU CHAPITRE 1

La gestion des risques d'inondation se révèle complexe. Ainsi, les politiques de gestion des risques se doivent de réduire les risques alors que la croissance des richesses et l'urbanisation croissante tendent à les augmenter. Pour faire face à cette complexité, il s'est révélé nécessaire de modifier les politiques de gestion afin de mettre en place des processus d'amélioration continue. C'est dans ce cadre que rentrent les Retours d'EXpérience (REX). Cependant, si ces REX permettent d'analyser finement les politiques de gestion des risques d'inondation et d'émettre des recommandations pour les améliorer, ils ne permettent pas actuellement d'améliorer de manière significative ces politiques. Dans les faits, les REX illustrent parfaitement la complexité d'une telle gestion.

D'une part, ce chapitre a montré – en s'appuyant notamment sur des REX – que les réseaux techniques sont bien vulnérables vis-à-vis des inondations. Puis, d'autre part, il a été montré que ces réseaux constituent des infrastructures critiques. C'est précisément la conjonction entre ces deux caractéristiques qui pose de nombreux problèmes. Les réseaux techniques doivent ainsi faire l'objet d'une attention particulière en matière de gestion des risques d'inondation. Compte tenu de leur importance pour le bon fonctionnement de la société et pour le fonctionnement des secours, ces réseaux constituent donc des enjeux majeurs. Or, l'état des lieux réalisé se révèle plutôt préoccupant.

Au-delà de cet état des lieux, ce chapitre souligne que les solutions adoptées pour faire à ces enjeux ne sont pas réellement adaptées. En effet, les politiques de protection des réseaux techniques sont très sectorielles, alors même que les interdépendances entre ces réseaux nécessiteraient des approches globales et intégrées. De plus, les approches intersectorielles actuelles, reposant sur des approches collaboratives, semblent montrer leurs limites : même s'il est difficile de juger la pertinence de certains plans récemment adoptés. Ainsi, réunir différents gestionnaires ne semble pas suffisant, les approches adoptées doivent être plus intégratives.

Il est alors proposé de focaliser cette recherche sur l'analyse de ces réseaux techniques en dépassant les approches sectorielles classiques. Un des enjeux de cette recherche est

dès lors de prendre en compte les interdépendances entre ces différents réseaux techniques. En outre, cette recherche a pour objectif d'associer les problématiques liées aux réseaux techniques à des problématiques d'aménagement des territoires, comme cela a pu être suggéré dans certains REX. Pour cela, cette recherche s'est appuyée sur les connaissances empiriques issues de ce premier chapitre (Tab. 1.5).

Réseau	Parties vulnérables	Atteintes au réseau	Dépendances du réseau	Réseaux dépendants
Electrique	Transformateurs	Court-circuit Dépôt d'éléments grossiers	<i>Réseau routier</i> pour les interventions <i>in situ</i> <i>Réseau télécom</i> pour la gestion de crise et la gestion à distance	<i>Réseau routier</i> pour la signalétique <i>Réseau télécom</i> pour les centraux <i>Réseau eau potable et assainissement</i> pour les pompes, les usines de traitement et les stations d'épuration
	Lignes aériennes et enterrées	Rupture consécutive à la déstabilisation du sol Endommagement des poteaux		
	Branchements individuels	Court-circuit		
Téléphonie fixe	Central téléphonique et répartiteurs	Submersion Détérioration	<i>Réseau électrique</i> pour le fonctionnement des centraux et des répartiteurs <i>Réseau routier</i> pour les interventions <i>in situ</i>	<i>Réseau électrique, réseau routier, réseau eau potable et réseau assainissement</i> pour la gestion de crise
	Câbles aériens et souterrains	Infiltration de l'eau Encombrement des canalisations Câbles emportés, détériorés ou rompus		
	Branchements abonnés	Submersion Oxydation des connectiques		
Eau potable	Canalisations	Fragilisation	<i>Réseau électrique</i> pour les pompes et usine de traitement <i>Réseau routier</i> pour les interventions <i>in situ</i> <i>Réseau télécom</i> pour la gestion de crise	Considéré comme négligeable
	Usines production E.P.	Ennoiment des équipements sensibles		
Assainissement	Canalisations	Mise en charge Fissuration Encombrement	<i>Réseau électrique</i> pour les pompes et les stations d'épuration <i>Réseau routier</i> pour les interventions <i>in situ</i> <i>Réseau télécom</i> pour la gestion de crise	Considéré comme négligeable
	Pompes	Mise en charge		
	Stations d'épuration	Surcharge Submersion Endommagement		
Routier	Routes et trottoirs	Submersion Endommagement Erosion Obstruction	<i>Réseau électrique</i> pour la signalétique <i>Réseau routier</i> pour les interventions <i>in situ</i>	<i>Réseau électrique, réseau routier, réseau eau potable et réseau assainissement</i> pour la gestion de crise
	Signalétiques	Submersion		

Tableau 1.5 : Synthèse des connaissances empiriques issues de ce premier chapitre (d'après : MEDD, 2005 ; EP Loire, 2006).

Chapitre 2

Villes, réseaux techniques et risques : une appréhension commune nécessaire

Le premier chapitre de ce mémoire a permis de mettre en exergue deux caractéristiques majeures des réseaux techniques : d'une part leur vulnérabilité vis-à-vis des inondations et d'autre part leur criticité pour la société. De plus, ce premier chapitre révèle la relative méconnaissance des impacts induits par la dégradation des réseaux. Ainsi, les chiffres donnés sont imprécis et traduisent une certaine ignorance de leurs impacts réels pour la société. Par exemple, dans le cas francilien, la RATP ne diffuse que des données vagues mais inquiétantes : 2 à 3 milliards de dommages directs et une interruption de plusieurs mois du trafic (Reghezza, 2006). Or, c'est précisément l'interruption du trafic provoquée par l'inondation qui pourrait engendrer les coûts économiques les plus importants pour la RATP et par conséquent les impacts les plus importants pour la région parisienne dans son ensemble.

Dans les faits, la quantification des impacts induits par le dysfonctionnement des réseaux techniques implique d'être en mesure d'évaluer de nombreux impacts indirects. En effet, ces réseaux engendrent des mécanismes complexes de vulnérabilité (Gleyze & Reghezza, 2007). Cette complexité est engendrée par les relations étroites qu'entretiennent les réseaux techniques avec les territoires qui les supportent. La prise en compte de cette complexité requiert alors une vision systémique des territoires plutôt qu'une vision analytique. Or, c'est cette dernière qui est actuellement privilégiée en matière de gestion des risques d'inondation (Pigeon, 2005 ; Vinet, 2010).

Plus précisément, le cas francilien illustre la complexité des relations qu'entretiennent les réseaux techniques avec les villes. Or, c'est la gestion des risques en milieu urbain qui focalise actuellement les attentions des gestionnaires et les financements (Zevenbergen et al., 2010). En pratique, cette gestion se révèle difficile car des logiques contradictoires se confrontent (Reghezza, 2006). Ainsi, la difficile conciliation entre urbanisation et gestion des risques d'inondation requiert de limiter fortement l'aménagement dans les zones inondables, alors même que les villes et les agglomérations doivent se développer afin d'être compétitives et attractives (celles-ci étant en effet de plus en plus mises en concurrence).

Saisir la ville dans toute sa complexité et tous ses paradoxes, notamment sa relation complexe avec les éléments « naturels », tel est un des enjeux majeurs d'une gestion des risques moderne, notamment à l'heure où plus de la moitié de la population mondiale s'y concentre et où le développement dans les zones inondables peut difficilement être

contenu. Pour cela, ce chapitre se focalise sur la formalisation des mécanismes de vulnérabilité des réseaux techniques et des villes qui les supportent.

Dans un premier temps, la concentration actuelle sur la gestion des risques en milieu urbain est interrogée, puisque la relation entre les risques et les villes se révèle ambiguë. Pour lever partiellement ces ambiguïtés, il est alors intéressant de se focaliser sur « la ville » afin de définir cet « objet » protéiforme difficile à saisir. Enfin, en replaçant ces réflexions sur « la ville » dans un cadre plus général traitant de la relation entre les risques et les territoires, il convient d'interroger de manière théorique la place des réseaux techniques au sein de cette relation.

2.1 LA GESTION DES RISQUES D'INONDATION EN MILIEU URBAIN

Les efforts de prévention s'orientent aujourd'hui prioritairement en direction des villes qui concentrent les enjeux humains, économiques et technologiques. Ainsi, les coûts économiques induits par une inondation à Paris – s'élevant dans certaines études jusqu'à 40 milliards d'euros (IAU-IDF, 2009) – dépassent très largement le budget annuel d'un milliard d'euros du fonds de solidarité de l'union européenne. Or, ce fond a précisément été créé en 2002 pour aider la population d'un Etat membre de l'union européenne victime d'une catastrophe naturelle majeure. Compte tenu de ces enjeux, cette partie se propose de faire le point sur la gestion des risques en milieu urbain, en particulier concernant les risques d'inondation.

2.1.1 Une attention de plus en plus importante sur la gestion des risques en milieu urbain

Sans pouvoir réellement prouver que les villes sont plus vulnérables par rapport à d'autres types d'espace (la concentration d'enjeux n'étant pas théoriquement synonyme d'une vulnérabilité importante), elles bénéficient actuellement d'une attention particulière. Ainsi, « *certains ensembles urbains focalisent depuis une dizaine d'années l'attention des géographes : les mégapoles, définies comme de très grandes agglomérations dont le seuil démographique varie selon les auteurs, mais qui sont au moins millionnaires sinon multimillionnaires* » (Reghezza, 2006).

Il faut bien reconnaître que l'enjeu est de taille. Au début du troisième millénaire, 47,2% de la population mondiale était urbaine. Plus précisément, 75 à 80 % de cette population urbaine se regroupent dans les grandes villes (Reghezza, 2006) et chaque année se produisent environ 180 catastrophes urbaines (Chaline & Dubois-Maury, 2004). Depuis 2007, 50 % de la population mondiale est urbaine (UN-Habitat, 2007) et depuis 2011, la population mondiale est évaluée à 7 milliards. Il est donc possible d'estimer à près de 4 milliards le nombre d'habitants vivant dans des espaces urbanisés. Ainsi, alors même que le coût économique des risques naturels devrait atteindre dans le monde la

valeur de 100 milliards d'euros par an à la fin du siècle, environ 75 % de ces dommages seraient recensés en milieu urbain (Reghezza, 2006).

Sachant que l'équivalent d'une ville d'un million d'habitants serait créé chaque semaine durant les quatre prochaines décennies (www.floodresiliencgroup.org), cette tendance n'est pas sur le point de s'inverser. Si tous ces chiffres doivent être interprétés avec prudence, puisque ceux-ci restent approximatifs et en grande partie issus d'extrapolations, ils mettent toutefois en avant les enjeux liés à la gestion des risques en milieu urbain.

Compte tenu de ces enjeux, des rapports récents se sont exclusivement centrés sur l'étude des « risques urbains » (Fig. 2.1). Par exemple, la croix Rouge a consacré son rapport annuel de 2010 aux « risques urbains », dans un rapport intitulé : « *World Disaster Report 2010 – Focus on urban risk* ». Ce rapport postule que la gestion des risques urbains est l'un des défis majeurs du XXIème siècle. On y retrouve notamment une analyse des tendances concernant les risques urbains. Dans le même temps, des campagnes visant à améliorer la résilience des villes ont été lancées. Ainsi, l'ISDR (*International Strategy for Disaster Reduction*) a lancé la campagne « *Making Cities Resilient* » avec un leitmotiv : « *My city is getting ready* ». Le focus de cette campagne quinquennale (2010-2015) concerne donc les risques urbains (UNISDR, 2010). Elle se place notamment dans la continuité de la campagne quadriennale de l'UN-Habitat (2009-2013) ayant pour objectif de favoriser une urbanisation durable.

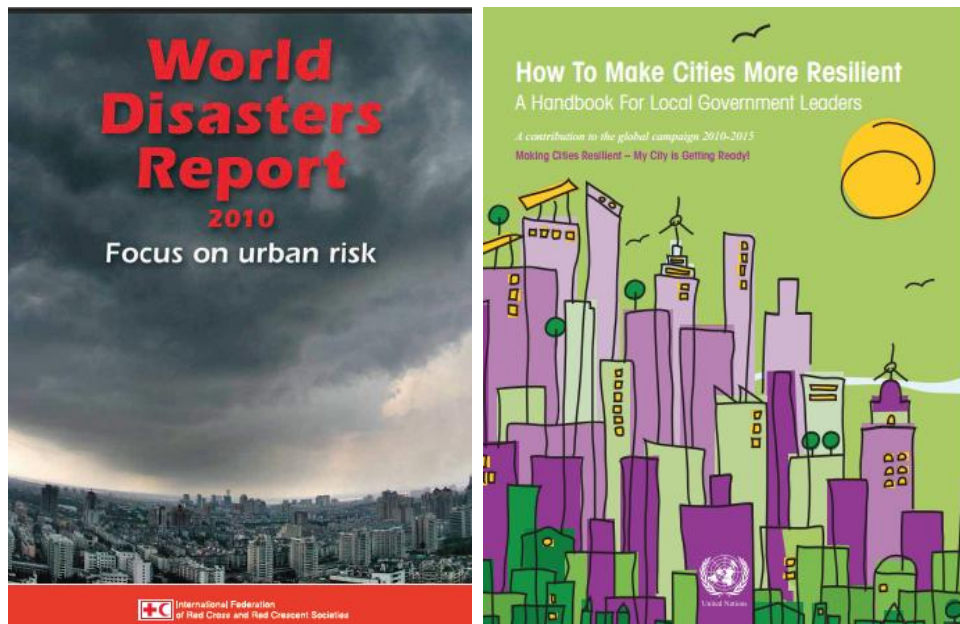


Figure 2.1 : Une focalisation sur les risques urbains au niveau des organismes internationaux.

Plus précisément, l'objectif de l'ISDR dans cette campagne est de sensibiliser les acteurs locaux à la gestion des risques. De plus, elle vise aussi à responsabiliser ces acteurs. Les cibles de ces campagnes sont donc principalement les maires et les

gestionnaires des collectivités locales. En effet, l'ISDR a la conviction que les institutions locales, de par leur proximité avec les populations et leur connaissance de leur territoire, jouent un rôle majeur dans la gestion des risques (UNISDR, 2011). Ainsi, ces acteurs sont responsables de services indispensables à leurs administrés (santé, éducation, transport, eau...). Ils sont aussi les mieux à même d'informer les populations et de les sensibiliser aux risques.

Pour inciter les collectivités à s'investir dans cette démarche, celle-ci leur est présentée par l'ISDR comme une opportunité pour améliorer et moderniser leurs infrastructures (UNISDR, 2010). Cette démarche implique donc théoriquement des bénéfices pour les villes engagées. Les politiques de gestion des risques deviennent ainsi une source d'investissements pour les villes et non plus simplement une source de contraintes nuisant à leur développement.

Dans ce contexte, l'avènement de projets de recherche concernant spécifiquement la résilience urbaine est logique. Des projets comme Resilis ou FloodResilientCity sont de bonnes illustrations de cette orientation. Si les approches diffèrent, ces projets poursuivent le même objectif : améliorer la résilience des villes. Pour cela, le premier tente de mettre en place des méthodes et des outils permettant d'analyser la résilience urbaine tandis que le second tente de favoriser les échanges de bonnes pratiques entre des villes européennes.

Il semble donc y avoir actuellement une demande importante pour disposer de méthodes et d'outils permettant d'améliorer la résilience urbaine (Chap. 3). Or, cette demande illustre bien les orientations actuelles de la gestion des risques d'inondation : d'une part une focalisation sur les territoires urbanisés, et d'autre part la volonté de promouvoir de nouvelles politiques de gestion – en l'occurrence des politiques de résilience afin de faire face à la complexité de la gestion des risques en milieu urbain.

2.1.2 Villes et risques : un rapport ambigu

Cette focalisation sur la gestion des risques en milieu urbain interpelle. En effet, la relation entre « villes et risques » se révèle complexe. L'expression de « risques urbains » est par exemple très ambiguë. Cette expression peut en effet être interprétée de deux manières. Soit, elle signifie qu'il existe en ville des risques spécifiques, c'est-à-dire des vulnérabilités ou des aléas qui sont propres aux villes. Soit, « *au sens large, il s'agit de risques liés à des aléas exogènes, qui se produisent également dans l'espace rural par exemple, mais dont les manifestations et les conséquences prennent un visage nouveau dans le contexte urbain* » (Reghezza, 2006).

De plus, si les risques et les villes entretiennent une relation complexe, c'est notamment parce que la ville a historiquement été interprétée de manière subjective tour à tour comme un espace de sécurité ou au contraire comme un espace « à risques ». Ces deux paradigmes opposés ont alors pris le pas sur des positionnements plus objectifs (Reghezza, 2006). Dans ce contexte, s'entremêlent des perceptions et des représentations

de l'espace urbain qui reposent sur des critères purement subjectifs, ou au contraire sur des analyses plus objectives des réalités relatives à ces espaces.

Dans un sens, la ville peut être essentiellement perçue comme un espace de dangers. En effet, la ville, d'un point de vue théorique, en concentrant les enjeux, semble rassembler en son sein une multitude de dangers aussi divers que variés. Elle semble même concentrer de nouveaux dangers singuliers. Ces nouveaux dangers seraient liés à la complexité et à la méconnaissance des enjeux urbains. Le risque serait, en quelque sorte, inhérent à la ville. Il existe ainsi « *une permanence des dangers quotidiens de la vie urbaine, dangers chroniques et presque banalisés, mais eux aussi, produits par les dysfonctionnements ou les usages mal maîtrisés des technologies contemporaines, y compris au plan domestique* » (Chaline & Dubois-Maury, 1994). Ainsi, « *les risques naturels seraient non pas extérieurs au milieu urbain, mais au contraire inhérents à la croissance urbaine. Ils seraient intégrés à la dynamique urbaine* » (November, 1994). D'un point de vue pratique, il est reconnu que « *la croissance des risques et la croissance urbaine apparaissent synchrones* » (Pigeon, 2005).

De plus, le risque étant inhérent à toute activité humaine, comme les activités humaines se concentrent en ville, les risques devraient par conséquent s'y concentrer. Ce positionnement (ce syllogisme) sans pouvoir être totalement démontré semble *a priori* logique. Ainsi, « *la récurrence en milieu urbain d'épisodes catastrophiques, épisodes fortement médiatisés, fait que la ville, et en particulier, la grande ville, est désormais perçue comme un espace dangereux. Si l'on redoute les aléas qui s'y produisent, le sentiment d'insécurité se nourrit aussi de la conscience de la fragilité inhérente de ce type d'espace. À y regarder de plus près, on s'aperçoit en effet que les dangers n'y sont pas forcément plus nombreux que par le passé, mais que leurs conséquences y sont sans commune mesure* » (Reghezza, 2006). La perception des populations, renforcée par la médiatisation des événements, semble alors bien s'appuyer sur des éléments objectifs de fragilité de l'espace en question.

Il est dans ce contexte nécessaire de changer de paradigme concernant la gestion des risques en milieu urbain pour envisager de nouvelles interprétations. « *L'espace urbain apparaît au fil de nombreuses définitions comme un simple lieu de déploiement des conséquences d'événements dommageables dont l'origine se situe au niveau de dysfonctionnements techniques. Rarement il est analysé comme forme d'organisation susceptible, en elle-même, de causer ruptures et perturbations. Or cette dernière conception de la ville ouvre la voie à une nouvelle interprétation du rôle du risque en milieu urbain* » (November, 1994).

Cependant, la ville peut aussi apparaître comme un espace de protection. D'ailleurs, pendant longtemps, la ville a été conçue comme un refuge ou un abri (Chaline & Dubois-Maury, 1994). Ainsi, elle assurait, grâce à ces remparts, une protection contre les territoires ennemis et les éléments naturels (Reghezza, 2006). Désormais, l'urbanisation favorise la mise en place de politiques de gestion des risques, puisque plus un espace concentre d'enjeux plus celui-ci fera l'objet d'une attention particulière (2.1.1). La concentration des enjeux peut alors apparaître comme un atout potentiel pour gérer les risques. Par exemple, si la focalisation sur la gestion des risques en milieu urbain

souligne les impacts importants que peuvent subir ces espaces, dans le même temps cette focalisation permet par exemple aux villes d'améliorer leurs politiques de gestion (elle contribue à les rendre moins vulnérables) par rapport à d'autres espaces.

De plus, cette focalisation démontre que des progrès importants peuvent être accomplis en matière de gestion des risques en milieu urbain. Ainsi, la concentration des richesses peut permettre de financer des politiques de gestion des risques efficaces mais coûteuses. En outre, comme les politiques de gestion des risques requièrent des moyens humains importants, les villes se révèlent souvent les mieux à même de les mettre en place. Enfin, la concentration des services de secours en milieu urbain est indéniablement un avantage pour faire face à des événements majeurs. C'est pourquoi, au-delà de la simple reconnaissance que les villes seraient apparemment des espaces à risques, cette focalisation met en exergue la possibilité d'y mettre en place des politiques de gestion des risques peut être plus efficaces qu'en d'autres territoires.

En fait, « *la contradiction entre les deux représentations n'est que superficielle car la condamnation de la ville (i.e. la ville considérée seulement comme un espace à risques) se nourrit en réalité de l'idéal de la ville sûre* » (Reghezza, 2006). Cette contradiction s'appuie sur des faits objectifs tendant à montrer d'une part sa fragilité importante et d'autre part sa capacité à pouvoir réduire cette fragilité. Plus particulièrement, la difficulté de penser le risque naturel comme un risque urbain révèle la difficulté de penser la nature en ville. « *Le risque naturel en ville apparaît comme le fruit d'un environnement spécifique né de cette hybridation. Le risque naît de l'interaction entre un milieu géographique, c'est-à-dire, un milieu physique anthropisé, et une société. En ce sens, l'analyse du risque urbain lié à un aléa « naturel » est une clé de lecture possible de cette hybridation* » (Reghezza, 2006).

Pour conclure, faire référence à l'expression de « risques urbains » nécessite l'existence d'une spécificité des risques en milieu urbain donnant naissance à des formes hybrides de risques, c'est-à-dire à l'irruption « d'objets chevelus » (Latour, 1999 ; November, 2008). Ces « objets chevelus » sont notamment engendrés par la complexité des relations qu'entretiennent les villes avec les risques.

2.1.3 Urbanisation et inondation : un principe d'opposition

Dans le cas « particulier » des inondations, une focalisation sur les villes est-elle pertinente ? L'exposition de nombreuses villes à cet aléa suggère que cette focalisation est bien justifiée. Ainsi, en France une commune sur trois est concernée par les risques d'inondation, parmi lesquelles sont recensées environ 300 agglomérations. En effet, de nombreuses agglomérations se sont développées le long des cours d'eau, venant alors urbaniser des zones potentiellement inondables (Veyret & Reghezza, 2005 ; Mancebo, 2006).

Entre 1999 et 2006, près de 100 000 logements ont encore été construits dans les zones inondables de 424 grandes communes françaises (Laporte, 2009). L'accroissement du nombre de logements dans les zones inondables provient essentiellement de la pression

démographique qui s'est répercutée dans les parcelles exposées, comme dans les parcelles hors d'eau. Néanmoins, il est intéressant de constater que ce taux de croissance a été supérieur dans les zones inondables (Tab. 2.1). Plus précisément, les nouvelles implantations dans les zones inondables ont contribué à densifier les territoires déjà urbanisés plutôt qu'à les étendre, préservant ainsi majoritairement les zones d'expansion des crues (Laporte, 2009).

	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 2.1 : Situation concernant les logements dans les zones inondables (Laporte, 2009).

De plus, si les causes des inondations sont tout d'abord d'origine naturelle, puisqu'elles découlent directement d'un événement météorologique plus ou moins exceptionnel (forte pluie, orage, fonte des neiges), il n'en reste pas moins qu'il existe aussi des causes anthropiques pouvant amplifier ces inondations (Ledoux, 2005). Parmi ces causes anthropiques, l'urbanisation est sans doute la cause principale. En effet, l'urbanisation influe directement sur l'occupation des sols. L'urbanisation engendre alors une importante imperméabilisation des sols. Or, cette imperméabilisation est elle-même à l'origine d'un accroissement du ruissellement urbain. *In fine*, la ville inonde la ville.

Ainsi, afin de différencier l'inondation d'une agglomération consécutive au débordement d'un cours d'eau, et l'inondation d'une agglomération provoquée par l'incapacité du système d'assainissement à canaliser les eaux de ruissellement pluvial provenant des zones urbanisées, il est parfois fait référence (peut-être à tort) à des « crues urbaines ». Dans certains cas (Chap. 9), ces deux types d'inondation se conjuguent et ne peuvent être séparés. Les « crues urbaines » illustrent ainsi l'hybridation des risques en milieu urbain par le biais d'une hybridation de l'aléa.

Cette exposition à l'aléa inondation pose plus largement la question de la vulnérabilité urbaine aux inondations. Or, les facteurs de vulnérabilité en milieu urbain sont nombreux (Guézo & Verrhiest, 2006 ; Rufat, 2007). Ces facteurs peuvent être ceux des différents éléments qui composent une ville (*i.e.* les habitations, les réseaux techniques et plus largement les infrastructures critiques, les entreprises, les populations...). Par exemple, la vulnérabilité de l'habitat aux inondations est liée à la forme du logement, à la structure du bâtiment, à la position géographique, au type de bailleur... (Ledoux, 2005 ; Salagnac, 2006). Ces facteurs de vulnérabilité propres à

l'habitat peuvent donc être considérés comme des facteurs de vulnérabilité urbaine. Pour chacun de ces facteurs, il est possible de déterminer des sous-facteurs qui préciseront alors les sources de vulnérabilité.

On voit vite les limites d'un exercice consistant à énumérer exhaustivement les facteurs de vulnérabilité urbaine, ces facteurs étant en effet très nombreux et ne pouvant être obtenus par une démarche systématique. Par exemple, dans une étude conduite sur le territoire de l'agglomération lyonnaise, plus d'une vingtaine de critères ont été pris en compte (Renard & Chapon, 2010) et pourtant cette énumération n'est pas exhaustive. De plus, cette approche qui procède par décomposition des facteurs de vulnérabilité (approche analytique) est dans ce contexte très critiquable, car ces facteurs ne sont pas nécessairement indépendants (Rufat, 2007) et requièrent une bonne compréhension du fonctionnement urbain (relevant davantage d'une approche systémique).

Plus simplement, la vulnérabilité urbaine peut être classée selon deux dimensions (Guézo & Verrhiest, 2006) : une dimension sociétale et une dimension territoriale (Fig. 2.2). La vulnérabilité territoriale se compose d'une part de la vulnérabilité géographique, qui résulte des caractéristiques physiques du territoire exposé et des caractéristiques des aléas (naturels ou technologiques), et d'autre part de la vulnérabilité structurelle, qui traduit le niveau de protection que les aménagements apportent aux personnes, aux biens et aux activités. La vulnérabilité sociétale se compose, quant à elle, de la vulnérabilité organisationnelle, qui traduit l'influence des organisations (collectivités, établissements recevant du public, centres stratégiques, entreprises...) sur les conséquences d'un événement catastrophique, et de la vulnérabilité individuelle qui traduit la fragilité d'une personne confrontée à un accident majeur (*i.e.* de la vulnérabilité intrinsèque à la personne et de son exposition au phénomène dangereux lorsqu'il survient).

Le spectre de la vulnérabilité urbaine

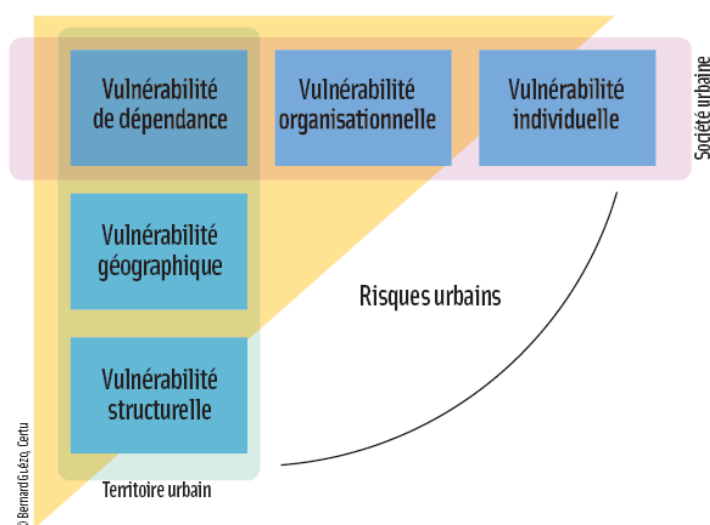


Figure 2.2 : Une nécessaire prise en compte des dépendances pour analyser la vulnérabilité urbaine (Guézo & Verrhiest, 2006).

Enfin, au croisement des vulnérabilités territoriales et sociétales, la vulnérabilité de dépendance est au cœur de la vulnérabilité urbaine (Guézo & Verrhiest, 2006). Cette vulnérabilité de dépendance résulte des proximités, des interactions et des interfaces qui se développent entre les occupations de l'espace, les usages et les activités internes au système urbain ou en relation avec lui. Par exemple, une coupure d'électricité perturbe par ses effets directs le fonctionnement urbain, mais elle peut également interrompre l'alimentation en eau potable de la ville. Ce sont précisément ces aspects fonctionnels, liés à ces dépendances, que les approches analytiques laissent de côté, en favorisant alors des listes de facteurs de plus en plus « exhaustives » et plus ou moins pertinentes.

Quoi qu'il en soit, l'acceptabilité des inondations en milieu urbain est très faible. Ainsi, la méthode « inondabilité » développée par le Cemagref met avant ce manque d'acceptabilité (Tab 2.2). C'est pourquoi, jusqu'à présent, les politiques de gestion se concentrent prioritairement sur des stratégies de protection, visant à lutter contre les inondations ou sur des stratégies « d'évitement », visant à limiter l'urbanisation dans les zones inondables. Les politiques de gestion ne sont donc pas fondées sur un principe de conciliation entre urbanisation et inondation, mais bien plutôt sur un principe d'opposition (Degardin, 2002 ; Beucher & Rode, 2009), alors même que précédemment (2.1.2), il a été souligné que les villes pouvaient être considérées comme les espaces les mieux à même à faire face à des inondations. La gestion des risques d'inondation en milieu urbain soulève donc des contradictions.

Type d'occupation du sol	Durée acceptable	Fréquence acceptable
Zone urbaine	0 minutes	100 ans
Habitat dispersé	0 minutes	10 à 50 ans
Verger	1 jour	5 ans
Peuplier	3 jours	2 fois par an
Friche	1 semaine	3 fois par an

Tableau 2.2 : Acceptabilité des inondations en milieu urbain selon la méthode « inondabilité » du Cemagref.

La gestion des risques en milieu urbain soulève de nombreux questionnements puisque le rapport entre les villes et les risques se révèle ambiguë : la ville apparaissant à la fois comme une source de dangers et comme un espace de protection. De plus, les politiques de gestion des risques d'inondation, qui se sont jusqu'à présent presque uniquement fondées sur des logiques de protection et d'évitement (c'est-à-dire sur un principe d'opposition au danger), montrent leurs limites. La focalisation actuelle concernant la gestion des risques en milieu urbain conduit ainsi à renverser ce paradigme qui se révèle difficilement soutenable. En

effet, les villes doivent se développer pour rester compétitives et attractives, or ce principe d'opposition tend à limiter ce développement. Très clairement, ce principe d'opposition rend la gestion des risques d'inondation trop contraignante et pénalisante pour les collectivités. Saisir la ville dans toute sa complexité afin de mettre à profit les nombreux avantages dont disposent les villes pour faire face aux inondations (notamment la concentration des ressources) est alors un enjeu majeur pour la gestion des risques d'inondation. Gestion des risques d'inondation et urbanisation ne reposeraient alors plus sur un principe d'opposition, mais sur un principe de conciliation, où la gestion des risques ne représente plus nécessairement une contrainte pour les collectivités mais plutôt un investissement. Autrement dit, il convient désormais de mettre en place des politiques de résilience urbaine.

2.2 LA VILLE UN SYSTEME SOCIOTECHNIQUE OU LES RESEAUX SONT CENTRAUX

L'émergence des politiques de résilience urbaine illustre la focalisation actuelle des politiques de gestion des risques sur les villes et en particulier sur les très grandes villes. Ces espaces, qui paradoxalement paraissent à la fois vulnérables et les mieux à même de faire face à des inondations, se doivent donc de faire l'objet d'une attention particulière. Il s'agit alors dans cette partie d'analyser cet objet protéiforme, évolutif et désormais difficile à définir qu'est la ville.

2.2.1 La ville un objet construit par nos représentations

Pour certains chercheurs, la ville est morte au profit de l'urbain (Choay, 1994). En effet, la ville était historiquement un objet pouvant être facilement identifié, se définissant ainsi aisément par rapport à son antonyme (la campagne). Elle était la descendante directe de la cité, espace clairement délimité et entouré par des murailles, représentant un type d'organisation spatiale somme toute minoritaire (Lussault, 2000). Plus récemment, elle répondait encore à un besoin de la société industrielle. Or, aujourd'hui le phénomène urbain traduit la dilution de cette ville dont les limites sont désormais floues et indéterminées.

C'est ce processus d'urbanisation « moderne » qui caractérise l'urbain. L'urbanisation a alors « radicalement bouleversé, à tous les niveaux, sociaux, économiques, spatiaux, idéologiques, culturels, les référents classiques qui faisaient qu'une ville était ville. » (Lussault, 2000). Néanmoins, la ville reste une réalité administrative et symbolique, même si elle n'est peut-être plus aujourd'hui qu'une image duale : « le discours d'usage joue de cette double essence des avantages urbains : je suis mémoire, regarder mes bâtiments ; je suis modernité, mesurer mes câbles. » (Roncayolo, 1990). De plus, la mort annoncée de la ville, n'est-elle pas plutôt celle d'un modèle de ville, le modèle « idéalisé » de la ville européenne (Louiset, 2011) ? Ainsi, la ville aurait-elle changé de nature ? L'étalement urbain, au lieu de diffuser

la ville, l'aurait-il supprimée ? Le « concept » de ville ne devrait-il pas permettre de saisir ces changements ?

Quoi qu'il en soit, il n'existe plus désormais une définition unanimement reconnue de la ville. La définition de la ville a ainsi évolué avec la société, puisque la ville n'est pas uniquement identifiée par des éléments objectifs. En effet, la ville est un espace perçu et vécu par ses habitants. La ville constitue alors un objet difficile à saisir, en ce sens qu'elle est doublement partagée, par ceux qui la vivent (résidents, entreprises, organisations...), et par ceux qui la pensent (aménageurs, politiques, ingénieurs...) (Lajoie, 2007). Ainsi, les villes se révèlent être la projection sur une fraction de l'espace, des conditions naturelles, des héritages de l'histoire, du jeu des forces économiques, des progrès techniques, du génie créateur des architectes, des contraintes administratives et des régimes politiques (Lefèvre, 1970) : « les hommes et les sociétés ne créent pas seulement leur cadre pour satisfaire à des besoins physiques ou sociaux, mais également pour projeter dans un espace réel quelques-unes de leurs ambitions, de leurs espoirs, de leurs utopies. » (Roncayolo, 1990).

La ville ne peut alors pas se réduire à une liste d'objets urbains, tels des bâtiments, des entreprises, des réseaux, ni même à une combinaison de fonctions. « Elle groupe une population, caractérisée par une certaine composition, démographique, sociale ou ethnique. Elle définit une forme de communauté (ou de coexistence de communautés) ou de collectivité, donc essentiellement politique dans son principe » (Roncayolo, 1990). C'est pourquoi, il est difficile de s'accorder sur ce qu'est ou ce que signifie la ville. « Nous saisissons la ville à travers nos représentations, c'est-à-dire les images mentales qui émergent de notre personnalité ou de notre culture, de notre désir de comprendre, de notre volonté d'agir. Ainsi nous voyons la ville à travers ce que nous sommes, mais aussi à travers notre façon de penser, à travers ce que nous voulons. Les représentations de la ville sont donc multiples, comme est multiple l'homme qui la pense. » (Bailly et al., 1995). Comme l'exprime Thierry Paquot « la ville est d'abord vue », elle passe donc immédiatement par le prisme de nos sens, de fait elle se figure en image (Paquot, 2010).

Or, la ville passerait de plus en plus d'une valeur d'usage à une valeur d'image (Ferras, 1990), laissant place à ce qu'il est courant d'appeler aujourd'hui le « marketing urbain ». Autrement dit, si la ville n'est plus uniquement que le produit de représentations, la ville peut être considérée comme un produit commercial (Ferras, 1990). Certaines villes ont d'ailleurs bien compris cette réalité et comme elles sont aujourd'hui en compétition pour leur développement, elles jouent sur ces représentations pour attirer les populations, les investisseurs, les entreprises... Dans ce contexte, la gestion des risques est problématique, car afficher ses vulnérabilités peut apparaître pénalisant, même si les passer sous silence revient à s'exposer à de futures catastrophes peut être plus pénalisantes en termes d'image. L'introduction des politiques de résilience, dont la connotation est semble-t-il plus positive, ne peut se détacher de cette réalité.

Compte tenu de cette subjectivité, tout modèle construit pour saisir la ville se révélera imparfait. Ainsi, il faut reconnaître que « si nous cherchons à comprendre la ville, nous allons sciemment en construire un modèle où nous ne retenons que les caractères et les relations qui nous

semblent nécessaires et suffisants pour rendre compte de ce qui fait l'urbain. » (Bailly et al., 1995).

2.2.2 La ville un système complexe

« *La ville n'est pas un objet aisé à décrire et à analyser, tant il est fait de multiples matériaux aux histoires rarement unifiées.* » (Paquot, 2010). D'ailleurs, « *définir la ville a toujours été une préoccupation embarrassante pour ceux qui se consacrent à l'analyse urbaine* » (Béguin, 1996). Ainsi, la diversité des villes (en termes de tailles, de formes, de fonctions...) implique une grande variété de modèles censés étudier le phénomène urbain. Les modèles d'évolution de l'urbanisation sont par exemple particulièrement complexes à concevoir (Ruas et al., 2011). En effet, une théorie générale des villes pose problème (Roncayolo, 1990). De plus, comme la ville est un objet soulevant des questions d'ordre technique, économique et social, de nombreuses disciplines l'ont étudiée en ayant recours à des méthodes très différentes qui ont objectivement fragmenté les connaissances acquises. Or, en se complexifiant et en se fragmentant, ces modèles n'ont pas favorisé l'émergence d'une connaissance globale du phénomène urbain et de la ville en particulier.

Et pourtant, depuis les années 1970, la naissance du courant de pensée systémique, qui est né de la prise de conscience de la complexité du monde et des limites de la pensée classique pour étudier les systèmes complexes (Morin, 1990), a offert à l'étude du phénomène urbain des méthodes et des outils permettant des approches pluridisciplinaires, afin d'étudier des systèmes complexes comme semble l'être la ville. La difficulté de saisir l'objet ville par une approche directe témoigne de sa complexité et suggère dès lors de considérer cet objet comme un système complexe, au détriment de conceptions plus analytiques qui tendraient à segmenter son étude. Qu'en est-il alors réellement ?

« *Comme nous le rappelle son étymologie (du grec *sustēma* : ensemble), le système peut être défini comme un ensemble d'éléments et d'interactions entre les éléments qui forme un tout organisé, l'organisation interne du système constituant sa structure et le comportement des éléments en interactions définissant sa dynamique* » (Lajoie, 2007). Ce système est alors organisé en fonction d'un but qui définit la finalité du système, autrement dit son aspect téléologique (De Rosnay, 1975).

Selon la littérature consacrée, il est possible d'établir des listes de propriétés caractéristiques d'un système : interdépendances des éléments consécutifs du système ; existence ou émergence d'une entité globale « le tout est plus que la somme des parties » ; phénomène de rétroaction de l'organisation globale sur ses parties constitutives : « le tout est moins que la somme des parties » (Nabaa, 2011). D'après les propriétés caractéristiques énoncées, il est difficile de prouver que la ville est un système. En effet, ces caractéristiques sont plutôt vagues. Néanmoins, la ville semble bien répondre à ces caractéristiques (Tab. 2.3).

Interdépendances des éléments constitutifs du système	Ces interdépendances apparaissent nombreuses. Les relations entre les politiques de transport et les politiques sociales de la ville en sont un bon exemple (Rosales-Montano et al., 2002).
Emergence d'une entité globale	La ville peut être caractérisée par un ensemble plus ou moins exhaustif de caractéristiques synthétiques (population, superficie...). Ces éléments synthétiques, caractéristiques d'une entité globale, émergent des interactions entre une multitude de causes. L'étalement urbain est ainsi le fruit : d'une amélioration du réseau routier, d'une politique de logement, d'une idéalisation du logement individuel... (Péguy et al., 2000).
Phénomène de rétroaction	Le phénomène de rétroaction le plus aisément compréhensible est la production de déchets consécutive à la concentration d'hommes et d'activités dont la gestion influe sur la dynamique de la ville (Lhomme et al., 2010).

Tableau 2.3 : La ville et les caractéristiques d'un système.

La complexité est un terme polysémique faisant désormais presque office de nouveau paradigme (Lajoie, 2007). Il existerait selon la littérature différents types de complexité : la complexité aléatoire ; la complexité déterministe ; la complexité d'agrégat (Dauphiné, 2003). Sans reprendre toute la littérature abondante sur la complexité qui concerne de nombreuses disciplines – de la géographie à l'informatique en passant par l'économie notamment – il est possible de dégager quelques caractéristiques souvent rattachées à la complexité (Arthur et al., 1997 ; Nabaa, 2011) :

- il existe un grand nombre d'entités hétérogènes qui interagissent uniquement avec un certain nombre d'autres (interactions dispersées) ;
- il n'y a pas de centralisme ;
- il existe des organisations hiérarchiques transversales avec un grand nombre d'interactions enchevêtrées ;
- les entités peuvent s'adapter, apprendre et donc évoluer ;
- le système évolue en permanence avec l'apparition et la disparition d'(auto)-organisations ;
- le système n'est jamais à l'optimum global, la dynamique est toujours hors de l'équilibre (il n'existe pas d'équilibre ou on passe d'un équilibre à un autre)...

Une nouvelle fois, il est difficile de prouver qu'une ville est un système complexe. Néanmoins, il est intéressant de constater que la ville a pu constituer un exemple permettant d'appréhender la complexité (De Rosnay, 1975). En fait, « la ville est un terrain

exceptionnel pour approcher la redoutable question de la complexité dont la difficulté théorique est à la mesure de son intérêt scientifique » (Lajoie, 2007).

Pour faire face à cette complexité, la ville fait régulièrement l'objet d'analogies permettant de se référer à des images semblant plus illustratives. Ces analogies sont consubstantielles à l'approche systémique, car cette approche permet d'établir de nombreuses passerelles entre différents systèmes. Une des analogies les plus courantes consiste à qualifier la ville de « métabolisme » par analogie à un système vivant. Certains chercheurs ou praticiens souhaitent alors créer des « laboratoires » pour concevoir la ville et éventuellement « soigner ces maux »... D'ailleurs, la volonté de traiter la ville comme un objet de raison, a très tôt amené les praticiens à considérer la ville comme un « organisme » avec un « tissu » et un « cœur », au sein duquel il faut assurer la fluidité circulatoire afin d'éviter les « congestions » (Roncayolo, 1990 ; Lussault, 2007). Cependant, les analogies avec les organismes vivants peuvent ne pas apparaître pertinentes, car elles mélangent la ville avec la population qui lui donne vie (Laborit, 1971).

Pour la suite de cette recherche, la ville sera donc considérée comme un système complexe, dont la modélisation se révélera nécessairement imparfaite. De plus, cette modélisation fera l'objet de choix qu'il sera nécessaire d'explicitier, la sélection étant en effet inhérente à l'approche systémique. L'objectif de cette recherche n'est clairement pas de s'évertuer à comprendre LA ville d'un point de vue holistique (*i.e.* comme la somme de toutes ses représentations), mais plutôt d'analyser LES villes d'un point de vue théorique et fonctionnel. *In fine*, l'objectif est donc de déterminer des mécanismes, qui sont certes imparfaits et restrictifs, mais qui restent généraux, laissant place ainsi à des interprétations subjectives et dynamiques.

2.2.3 La ville : un système sociotechnique

Selon la définition retenue, la ville « *serait le dispositif topographique et social qui donne leur meilleure efficacité à la rencontre et à l'échange entre les hommes.* » (Roncayolo, 1990). Si les villes ne se ressemblent pas et s'il serait du reste hasardeux de vouloir en proposer une méthodologie stricte et définitive, il est néanmoins possible de remarquer la présence de quelques traits communs (Roncayolo, 1990). Le trait commun retenu dans cette recherche est l'efficacité des échanges entre les hommes.

Pour cela, la ville tendrait à être un « *géotype de substance sociétale fondé sur la co-présence* » (Levy & Lussault, 2003). La ville reposerait alors sur l'utopie d'une distance tendant vers zéro entre tous les objets qui la constituent (principe d'ubiquité). C'est ce modèle, fondé sur la figure géométrique du point, qui serait à l'origine des « économies d'agglomération » nécessaires à la vitalité économique de tout centre urbain (Trouillard, 2010). Autrement dit, c'est premièrement la concentration de la population qui a permis de répondre au mieux au besoin d'efficacité d'échanges entre les hommes. Ainsi, la volonté de « co-présence » se traduit par de fortes densités (population, logements,

réseaux de transport...). Cette densité se caractériserait également par une forte altérité, suffisante pour « faire société » (Trouillard, 2010). Ce sont précisément ces traits caractéristiques liés à la densité que bouscule l'urbanisation en diluant la ville.

Néanmoins, d'un point de vue théorique et fonctionnel, la ville n'est pas seulement une concentration d'objets urbains, de fonctionnalités et de populations, elle est plutôt un ensemble d'interactions entre ses différents composants (Beaujeu-Garnier, 1997). En effet, comme la « co-présence » n'est qu'une utopie, la ville s'est progressivement organisée de façon à maximiser les interactions et non plus la « co-présence ». Dans les faits, la ville est un carrefour où tous les composants se nouent. Ce sont donc les réseaux qui vont permettre à la ville de remplir ses diverses fonctions (bancaire, commerciale, administrative, hospitalière, éducative...) en maximisant les interactions.

Si cette vision est très techniciste, c'est que la ville est un objet technique. « *Qu'il y ait un lien essentiel entre la ville et la technique est visible dès les formes les plus embryonnaires de l'une et de l'autre* » (Hottois, 1986). Ainsi, « *nous vivons tous dans des technocosmes emboîtés et interconnectés qui ne fonctionnent d'ailleurs qu'ordonnés en chaînes ou en réseaux* » (Hottois, 1986). Ce lien entre nos sociétés et la technologie dépasse l'échelle de la ville, ce lien est en effet planétaire : « *il s'agit aussi et peut être plus profondément de la perception du monde comme un objet technique hypercomplexe et systémique* » (Hottois, 1986). Ainsi, la ville peut être étudiée à travers un cadre technique qui cherche à prendre la mesure du lien entre « villes et techniques » : un lien vu par certains comme un mariage de raison (Dupuy, 1977).

D'ailleurs, pour Thierry Paquot, si l'urbain a tué la ville, c'est en partie parce que la ville n'a pu résister aux assauts de la technique et de la croissance démographique, elle s'est alors diluée dans un espace aux frontières floues et fluctuantes, proches et lointaines (Paquot, 2010). Cette évolution est étroitement liée à un système économique. Ainsi, « *la civilisation urbaine s'appuie-t-elle sur la dynamique de la modernité pour s'implanter* » (Paquot, 2010), la ville répondant alors à cette évolution uniquement par une « logique de flux » très fonctionnaliste, que seule « sa mise en technique » (sa technicisation) lui permet d'assurer. C'est pourquoi, le binôme économie-technologie semble aujourd'hui dominer la ville. Ainsi, l'analyse des transformations technico-économiques – la flexibilisation de l'économie, la nouvelle organisation industrielle, les nouveaux moyens de communication – permettent de discerner l'émergence d'un espace des « flux » se dissociant de l'espace des « lieux » (Castells, 2006). Cette émergence dessine les traits d'une ville duale, segmentée au plan social et fonctionnel (Castells, 2006).

Par espace des flux, il faut comprendre ici un espace des réseaux. Ainsi, les réseaux techniques sont aujourd'hui au centre du fonctionnement et du développement urbain. Les réseaux techniques urbains alimentent, solidarisent, irriguent l'ensemble des composants des territoires urbains. Cette place stratégique les rend extrêmement influents dans la dynamique de maintien du système urbain global. « *Ce mode d'organisation technique ne constitue pas simplement une infrastructure indispensable au fonctionnement de la ville occidentale contemporaine, il en est consubstantiel. Il est la ville*

occidentale d'aujourd'hui [...] La ville, qui rassemble aujourd'hui plus de la moitié des habitants de la planète, est non seulement une forme d'habitat dense, qui rassemble un certain nombre de fonctions politiques, administratives et économiques, mais aussi une forme de prise en charge des questions d'eau potable, d'eaux usées, d'énergie et de déchets » (Petitet, 2011).

Pour expliciter un peu plus l'importance accordée dans cette recherche aux réseaux techniques, il est possible de partir d'une définition cursive des réseaux techniques : « *un indicateur simple caractéristique du réseau sur un territoire est l'existence d'échanges ou, plus généralement, de mise en relation entre les différents acteurs* » (Groupe Réseaux, 1987). La ville n'échappe pas à cette définition. Il y a donc un lien direct et inaliénable entre la mise en relation des composants du système « ville » et les réseaux techniques. En effet, ces réseaux ont pour mission de relier des composants qui ont été au préalable disjointes. En cela, ils constituent le sous-système relationnel du système ville. Or, cette mise en relation est le critère retenu pour définir une ville. La dynamique de la ville et la dynamique des réseaux apparaissent ainsi synchrones, car sans réseau pas d'échanges, et sans échange pas de villes.

C'est pourquoi, la concentration d'hommes, d'activités et de richesses, ainsi que la présence de hiérarchies politiques et économiques favorisent la multiplication des flux de matières, d'énergies et d'informations et par conséquent des infrastructures qui les soutiennent (Blancher, 1998).

Ce positionnement semble caractéristique d'un urbanisme de réseaux qui ne fait pas consensus chez les urbanistes. Ildefonso Cerda, souvent cité comme père de l'urbanisme, est pourtant le pionnier de cet urbanisme de réseaux (Dupuy, 1991). Cependant, depuis « *la théorie générale de l'urbanisation* », l'urbanisme s'est davantage contenté d'être un urbanisme de zonage. C'est pourquoi, le lien direct entre la ville et ses réseaux techniques n'est pas toujours intuitif. D'autant que, les sociétés ont enterré la plupart des réseaux techniques afin de les dissimuler. Or, l'organisation territoriale, rendue possible par les réseaux, procure au contraire de multiples possibilités de connexion qu'il faut savoir utiliser au mieux pour favoriser la vie urbaine (Dupuy, 1991).

D'un point de vue théorique, il semblerait que cet urbanisme de réseaux interroge l'espace comme étant le produit de l'effet structurant de flux et de nodalités. « *L'existence même de réseaux implique une hétérogénéité de l'espace, ce que le géographe suisse Claude Raffestin nomme des « nodosités territoriales ». La relation implique altérité ; pas de liens sans lieux* » (Offner, 2000).

Si la place désormais omniprésente des réseaux techniques dans l'espace urbain est aujourd'hui bien établie, la ville apparaissant de plus en plus comme un territoire « urbanisé » au plus juste par les réseaux (Roncayolo, 1990), il est important de signaler que l'urbanisme se préoccupe finalement peu des réseaux techniques – mis à part des réseaux de transport. L'urbanisme tend alors à négliger les nouveaux rapports des sociétés à la ville induits notamment par l'émergence des nouveaux réseaux de télécommunication. « *Les réseaux techniques ne serait que (sale) affaire d'ingénieurs et de financiers* » (Offner, 2000). C'est pourquoi, « *dans la cité des chercheurs, les réseaux techniques*

restent encore rejetés dans les bas-fonds de la connaissance, véritable impensée urbanistique » (Offner, 2000).

Pour conclure, cette recherche considère la ville comme un système sociotechnique où les réseaux techniques tiennent une place centrale, système lui-même inséré dans un système global (Berry, 1964).

La ville est un objet protéiforme difficile à appréhender puisqu'elle est premièrement construite par nos représentations. Ainsi, la ville est d'abord vue, elle passe donc immédiatement par le prisme de nos sens. C'est pourquoi, définir la ville est toujours problématique, sa définition étant subjective. Compte tenu de cette subjectivité, tout modèle créé pour la saisir sera imparfait. Si les villes ne se ressemblent pas et s'il serait hasardeux de vouloir en proposer une méthodologie stricte et définitive, il est néanmoins possible de remarquer la présence de quelques traits communs. Le trait commun retenu dans cette recherche est l'efficacité des échanges entre les hommes. Or, ce trait commun met en avant le rôle central des réseaux techniques qui permettent d'organiser l'espace pour maximiser ces échanges. Dans cette recherche la ville est considérée comme un système complexe. Plus précisément, la ville est considérée comme un système sociotechnique où les réseaux techniques prennent une place centrale.

2.3 LA VILLE ET LES RESEAUX TECHNIQUES DANS UN CONTEXTE DE RISQUES

Dans un premier temps, les ambiguïtés inhérentes à la relation entre les villes et les risques ont été soulevées. Puis, dans un second temps, la ville a été définie comme un système sociotechnique où les réseaux techniques sont centraux. L'objectif de cette troisième partie est alors de formaliser la relation entre les villes et les risques en tenant compte de l'importance des réseaux techniques.

2.3.1 La relation « risque territoire » : entre évidence et complexité

L'approche traditionnelle concernant les risques naturels repose sur la distinction entre deux composantes du risque, l'aléa, qui désigne le processus physique source du danger et la vulnérabilité, qui renvoie à la propension de l'enjeu à subir un endommagement. Néanmoins, « si les définitions du risque tournent autour du binôme aléa-vulnérabilité, elles évoluent d'un chercheur à un autre sans qu'elles donnent pleine satisfaction pour autant » (Pigeon, 2005). En effet, cette dichotomie plutôt simple pose un certain nombre de problèmes méthodologiques en favorisant notamment les approches analytiques (Meschinet de Richemond & Reghezza, 2010). De plus, le concept de vulnérabilité se révèle polysémique. Ainsi, différents courants, correspondant à

différentes manières d'appréhender la vulnérabilité, peuvent être identifiés (Reghezza, 2006).

Or, ces deux composantes du risque s'inscrivent dans l'espace. « *L'aléa se caractérise ainsi par son étendue. De même, le site et la situation d'une catastrophe constituent d'importantes clés pour comprendre les origines du danger, les formes des dommages et les populations qui sont le plus touchées* » (Reghezza, 2006). Le risque semble donc par essence de nature spatiale. Ainsi, « *une des façons d'appréhender les situations à risques (pour les chercheurs comme pour les praticiens) consiste généralement à circonscrire spatialement ces phénomènes. Délimiter une zone inondable, situer un sol pollué, identifier un habitat ne répondant plus aux normes de sécurité sont quelques exemples fréquents parmi d'autres de cette activité sociale visant à identifier – à des fins de traitement – des espaces d'émergence des risques* » (November et al., 2008).

La spatialité des risques justifie à elle seule l'étude géographique de ces risques, elle fait même de la géographie une discipline incontournable des cindyniques. « *L'originalité de la démarche géographique est atteinte lorsque la localisation fait preuve, lorsque la spatialisation des faits réels ou potentiels fait progresser la compréhension des phénomènes* » (Vinet, 2010). En cela, la définition du risque de Valérie November est intéressante, puisqu'elle intègre directement l'espace : « *le risque peut être défini comme quelque chose de potentiel, qui ne s'est pas encore produit, mais dont on pressent qu'il se transformera en événement néfaste pour les individus ou une collectivité dans un ou des espaces donnés* » (November, 2010).

La nature spatiale du risque ancre profondément le risque dans le territoire. De fait, l'analyse spatiale semble être un outil pertinent pour étudier les risques. « *Le territoire, comme la société qui le peuple, est délimité par le risque et tout risque est inscrit dans un territoire. Il en résulte que l'analyse spatiale s'applique, plus ou moins efficacement, à tous les risques* » (Brugnot, 2001). Ainsi, « *l'espace sur lequel s'exercent les menaces n'est pas neutre, il constitue la composante intrinsèque du risque* » (Veyret, 2003). L'analyse spatiale, qui propose des méthodes et des outils permettant une « *analyse formalisée de la configuration et des propriétés de l'espace géographique, tel qu'il est produit et vécu par les sociétés humaine* » (Pumain & Saint-julien, 1997), peut alors permettre d'appréhender ce rapport ténu entre les risques et les territoires.

Aujourd'hui, ce rapport est si évident, qu'il est en partie institutionnalisé et réglementé. La cartographie des risques présente dans les plans de prévention des risques en est le meilleur exemple, car cette représentation joue un rôle essentiel pour l'élaboration des textes réglementaires qui s'en suivent. Par ce biais, « *il est important de mettre en exergue que toute identification de risques a une incidence sur le devenir des espaces qu'ils concernent* » (November, 2010). La localisation des risques est alors un enjeu primordial, puisque toute représentation graphique a une influence sur l'action publique qui va être décidée (Debarbieux et Vanier, 2002).

Pourtant, bien que la relation entre les risques et les territoires semble évidente, cette relation ne fait que rarement l'objet de formalisation. Paradoxalement, cette relation évidente a sans doute contribué à évincer une question fondamentale puisqu'elle

semblait triviale. Or, de nombreuses problématiques restent en suspens concernant ce couple.

Premièrement, si les Systèmes d'Information Géographique (SIG) sont des systèmes répandus dans le domaine des risques, l'analyse spatiale est souvent minimaliste (*i.e.* simple et très limitée) dans les études de risques. On assiste ainsi à une simple spatialisation des aléas et des vulnérabilités, puis par agrégation de ces couches d'informations à une spatialisation des risques. Cependant, « spatialiser de l'information » sur un territoire, ce n'est pas « territorialiser ces informations ». C'est pourquoi, ces approches ont contribué à favoriser des études où « *la dimension spatiale des risques est souvent réduite à une conception de territoire support* » (November et al., 2008). Autrement dit, le risque est traité comme un objet externe aux espaces qu'il touche. Or, ce lien relève d'une relation complexe. *De facto*, il est nécessaire de penser le risque en interaction avec le territoire et ainsi « *tenter la difficile prise en compte des nombreux « attachements » présents dans chaque problématique du risque* » (November et al., 2008).

L'approche méthodologique choisie n'est donc généralement pas pertinente pour saisir la relation complexe entre les risques et les territoires. C'est pourquoi, « *malgré l'affirmation d'une nécessaire gestion territorialisée du risque, l'analyse des dispositifs actuels montre une séparation entre risque et territoire* » (Meschinet de Richemond et Reghezza, 2010). La territorialisation des risques est ainsi déconnectée des territoires, puisque ces territoires ne sont pas saisis dans toute leur complexité. Pour résumer, « *le risque est pensé indépendamment du territoire, au sens fort que la géographie donne à ce mot* » (Meschinet de Richemond et Reghezza, 2010).

Deuxièmement, « *comment exprimer cartographiquement des « espaces de synthèse du risque » de façon claire, sans caricature ni perte d'information?* » (Propeck-Zimmerman, 2003). Alors même que la relation entre les risques et les territoires est complexe, comment le géographe, par le biais de la carte, peut-il rendre compte de cette complexité ? En effet, la carte est un support qui permet difficilement de représenter cette complexité. Il faut notamment faire preuve de créativité afin de faire figurer les différentes formes (ponctuel, linéaire ou surfacique) que peuvent prendre les deux composantes « traditionnelles » du risque.

De même, il est tout aussi difficile de représenter des informations qui se chevauchent si elles sont de même nature géométrique. Plutôt qu'une simple carte, le SIG peut alors se révéler plus efficace. « *De par leur caractère interactif, les SIG offrent l'opportunité de mettre un phénomène en perspective de sa complexité spatiale et peuvent ainsi apporter une aide à la concertation et à la prise de décision* » (Propeck-Zimmerman, 2003). Mais là encore, cette solution se révèle imparfaite, car la représentation synthétique des différentes couches, sous la forme d'une carte de synthèse, est souvent nécessaire. De plus, le caractère probabiliste et dynamique des composantes du risque en complique un peu plus la représentation.

Pour résumer, la relation entre les risques et les territoires se révèle complexe (Propeck-Zimmerman, 2003). Ainsi, les territoires se comportent comme des milieux hétérogènes et anisotropes, les risques ne se répartissant pas proportionnellement à une distance à l'aléa. Dès lors, « il s'agit de se donner les moyens, non pas de réfléchir uniquement en termes de contiguïté des risques, mais également de les saisir dans leurs relations de connexité » (November, 2006) (Fig. 2.2).

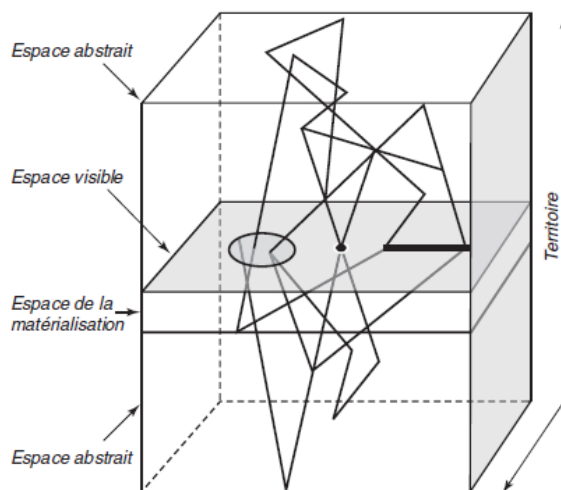


Figure 2.2 : Penser les relations de connexité du risque (November, 2006).

Cette complexité incite donc à quitter la zone d'aléa pour étudier les conséquences en dehors de celle-ci et à identifier les relations de connexité qui sont à l'origine de cette diffusion non graduelle et discontinue. Or, pour certains, « la vulnérabilité des territoires se ramifie à l'image des réseaux et une catastrophe naturelle paralyse non seulement les régions sinistrées, mais également toutes celles qui en dépendent par l'intermédiaire des réseaux » (Gleyze, 2005). Les réseaux peuvent alors caractériser en partie la diffusion des risques sur les territoires et mettre en avant des relations de connexité plutôt que de proximité (Groupe réseaux, 1987).

2.3.2 Les « risques réseaux »

Si les réseaux techniques sont fortement exposés aux inondations, les inondations ne représentent qu'un cas particulier d'aléas pouvant fortement impacter les réseaux techniques (*i.e.* les endommager ou les faire dysfonctionner). Par exemple, suite à la tempête qui a ravagé la France du 26 au 28 décembre 1999, le délégué-adjoint aux risques majeurs du Ministère de l'aménagement du territoire et de l'environnement écrit : « la vulnérabilité des réseaux aux tempêtes de décembre a en particulier révélé que cet aspect avait sans doute été insuffisamment pris en compte par les gestionnaires ». Plus récemment, le séisme survenu au Chili a fortement perturbé l'ensemble des réseaux techniques (Araneda et al., 2010 ; Chang & Wu, 2011). Ainsi, les aléas naturels, dans leur grande majorité, perturbent fortement les réseaux techniques (séismes, cyclones, tempêtes...). De plus, les réseaux techniques sont vulnérables à de nombreux autres types d'aléas d'origine anthropique.

- Les aléas économiques : les réseaux techniques font partie de secteurs concurrentiels soumis à de fortes pressions économiques, ils requièrent notamment des investissements importants.
- Les aléas sociaux : les réseaux sont soumis à des mouvements de grèves, à la variabilité des demandes des usagers...
- Les aléas politiques : les flux transportés peuvent notamment être des ressources sensibles impliquant des pays en conflit.
- Les aléas d'origine humaine : les réseaux sont soumis à des actes de malveillance, à des sabotages...
- Les aléas techniques : les réseaux sont vulnérables aux vieillissements des équipements, aux dépendances envers d'autres réseaux, aux endommagements liés à des catastrophes technologiques...
- Les aléas organisationnels : les réseaux peuvent dysfonctionner à cause d'un manque d'informations, d'un manque de connaissances sur les vulnérabilités des infrastructures dont ils dépendent...

Cette liste d'aléas ne peut prétendre à l'exhaustivité. Une approche plus formelle pourrait simplement distinguer les aléas « internes » – les causes du dysfonctionnement sont propres au réseau étudié – et les aléas « externes » – les causes du dysfonctionnement sont extérieures au réseau étudié. Par exemple, les aléas techniques peuvent être des aléas internes (défaillance d'un composant du réseau le faisant dysfonctionner) ou des aléas externes (dysfonctionnement d'un composant d'un autre réseau dont le réseau dépend pour fonctionner). Cela remet en question certaines définitions données au concept d'aléa. En effet, les aléas sont souvent considérés comme externes au système étudié. De plus, cette caractérisation (aléa interne ou externe) dépend de la manière dont les réseaux (ou plus largement les systèmes) techniques sont appréhendés. Ces réseaux peuvent ainsi être considérés comme des systèmes purement techniques, ou plutôt comme des systèmes sociotechniques, voire même comme des systèmes socioéconomiques... Or, si ces réseaux sont considérés comme des systèmes purement techniques, les aléas politiques seront caractérisés comme des aléas externes. En revanche, s'ils sont considérés comme des systèmes sociotechniques, les aléas politiques pourront être caractérisés comme des aléas internes.

Parallèlement à ces aléas caractérisés par leur amplitude et par leur probabilité d'occurrence, les réseaux techniques sont aussi caractérisés par des vulnérabilités. En reprenant, la classification établie par Rocher (1987), les facteurs de vulnérabilité peuvent être définis de la manière suivante :

- Les facteurs de vulnérabilité liés à la localisation spatiale et la densité des réseaux : ces facteurs augmentent le niveau d'exposition à l'aléa.
- Les facteurs de vulnérabilité liés à l'enterrement des réseaux et à l'urbanisme souterrain : ces facteurs augmentent la sensibilité de l'architecture.

- Les facteurs de vulnérabilité liés aux interdépendances et aux effets de concentration de réseaux : définissant la sensibilité du réseau à son environnement.
- Les facteurs de vulnérabilité liés à la concentration du commandement et des pouvoirs en milieu urbain : définissant la sensibilité du réseau à son mode d'organisation.

Cependant, cette classification des facteurs de vulnérabilité ne correspond pas à une grille de lecture formalisée, mais plutôt à une connaissance empirique des défaillances de ces réseaux, la rendant par là même très critiquable. Par exemple, cette classification n'est pas exhaustive. D'autres facteurs de vulnérabilité auraient pu figurer dans cette liste, comme notamment des facteurs conjecturels. En effet, les réseaux d'énergie sont très exposés aux aléas climatiques durant les périodes de grands froids, alors même qu'ils sont très sollicités durant ces mêmes périodes. D'autre part, certains facteurs peuvent être critiqués, car ils ne sont pas assez génériques. Par exemple, reconnaître une vulnérabilité liée à l'enterrement des réseaux est très critiquable, puisqu'en ce qui concerne les cyclones ou les tempêtes, l'enterrement des réseaux contribue à leur sécurisation. En fait, toutes les classifications non formalisées concernant les facteurs de vulnérabilité des réseaux techniques sont confrontées à des imperfections, en particulier pour des approches multi-aléas.

Enfin, les impacts des aléas sur les réseaux techniques se manifestent d'autant de manières qu'il existe de types de réseaux et de fonctionnements (Gleyze, 2005). Ces impacts varient aussi selon les vulnérabilités de ces réseaux. Au-delà des dommages purement matériels, les dysfonctionnements des réseaux se répercutent sur les activités et les échanges qui en sont tributaires. En outre, les interdépendances entre les réseaux techniques rendent l'estimation de ces dommages potentiels délicate. L'importance de ces impacts dépend alors de nombreux paramètres comme : le nombre de coupures ; la sévérité des dommages ; le délai de l'interruption ; le coût de réparation ; le coût du service de remplacement ; les conséquences sur les autres réseaux ; la localisation des dommages ; la nature des activités touchées ; la gravité des désordres causés ; la réaction de la société pour permettre à la reprise du fonctionnement (Leone et al., 1995 ; Gleyze, 2005).

Ces impacts peuvent alors être considérés comme des aléas pour les territoires qui les supportent. En fonction des vulnérabilités territoriales, ces aléas engendrent alors des « risques réseaux ». Quoi qu'il en soit, ces « aléas réseaux » sont de natures très diverses. Il est néanmoins possible d'établir une typologie des aléas dont les réseaux sont à l'origine (Blancher, 1998) :

- des aléas liés à des nuisances et à des pollutions dues au fonctionnement normal des réseaux ;
- des aléas liés à des ruptures d'approvisionnement, des pannes ou des grèves (rupture du service, mais pas de l'infrastructure qui la sous-tend) ;

- des aléas dus à la fuite, à l'accident, à la rupture de l'infrastructure, ou à la dégradation d'un de ses composants (l'accident peut provenir d'une erreur technique, d'un défaut de conception, de terrorisme, d'une catastrophe naturelle, de la saturation, du sous-dimensionnement du réseau (sur-demande, saturation...)) ;
- des aléas liés au parasitage, au piratage, à la pollution externe du réseau, à leur utilisation détournée ;
- des aléas liés à leur construction ou à des travaux.

Cependant, cette classification est très imparfaite, car elle mélange ce qui révèle de l'aléa et du risque. Dans les faits, les multiples conjonctions entre d'une part les « aléas réseaux » et d'autre part les « vulnérabilités territoriales » (dont les « vulnérabilités réseaux » font partie) font émerger les « risques réseaux » (Fig. 2.3).

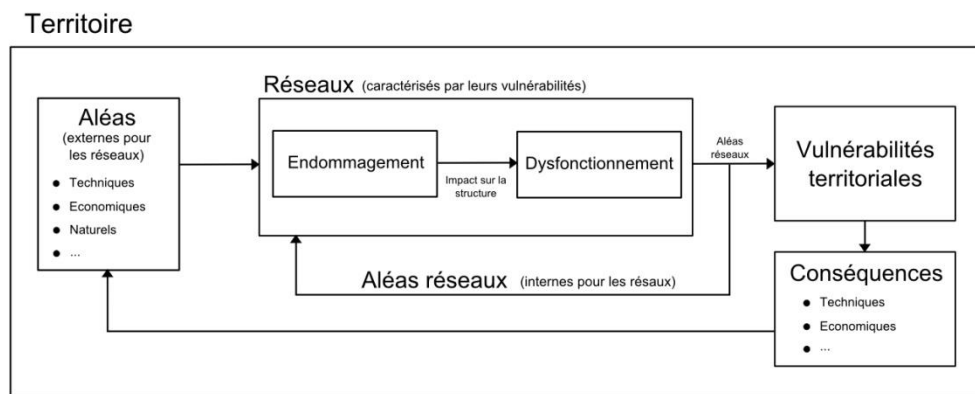


Figure 2.3 : Les risques réseaux.

Le recours à la notion de « risques réseaux » permet alors d'englober les éléments liés aux aléas et aux vulnérabilités qui se mélangent souvent, notamment lorsque les réseaux sont interdépendants et leurs rapports avec l'environnement ténus. Cette notion de « risques réseaux » permet ainsi de dépasser la dichotomie aléa-vulnérabilité. Dichotomie qui semble, dans une première approche, de plus en plus difficile à maintenir quand les systèmes étudiés deviennent complexes et lorsque la volonté de compréhension de ces systèmes se veut systémique.

2.3.3 Les réseaux techniques : une clef de compréhension des relations entre les risque et les territoires

Le binôme aléa-vulnérabilité peut amener à considérablement simplifier la relation entre les risques et les territoires. En effet, dans ce cadre, « l'exposition directe à l'aléa devient un critère commode de recensement des enjeux vulnérables. Ce qui signifie ipso facto que dans la plupart des cas, seuls les enjeux matériellement vulnérables sont recensés et font l'objet de mesures de gestion » (Meschinet de Richemond & Reghezza, 2010). Les problématiques liées à ce binôme sont évidentes, car tout élément situé en dehors d'une zone d'aléa peut difficilement être caractérisé comme étant à risque. De fait, ce binôme élude les relations

complexes que les risques entretiennent avec les territoires. Par conséquent, ce binôme met en exergue les aspects matériels du risque au détriment des aspects fonctionnels.

Pour éviter cet écueil, il a pu être proposé de centrer les réflexions autour des mécanismes d'endommagement. Il s'est alors révélé nécessaire de complexifier la notion d'endommagement. Désormais, trois niveaux d'endommagement peuvent être distingués : le niveau matériel, le niveau structurel et le niveau fonctionnel (Gleyze et Reghezza, 2007). L'endommagement matériel implique le contact direct des différents enjeux matériels avec l'aléa. Ainsi, selon le système étudié, ce niveau d'endommagement se traduira plus ou moins fortement par un endommagement fonctionnel. Ce niveau d'endommagement fonctionnel se caractérise par des dysfonctionnements plus ou moins importants pour le territoire. Les endommagements fonctionnels peuvent alors dépasser très largement les endommagements matériels généralement circonscrits à la zone d'aléa (Fig. 2.4). Or, « pour comprendre comment on passe d'un niveau à un autre, il est souvent nécessaire d'introduire un niveau intermédiaire » (Reghezza, 2006) : le niveau structurel (Fig. 2.5).

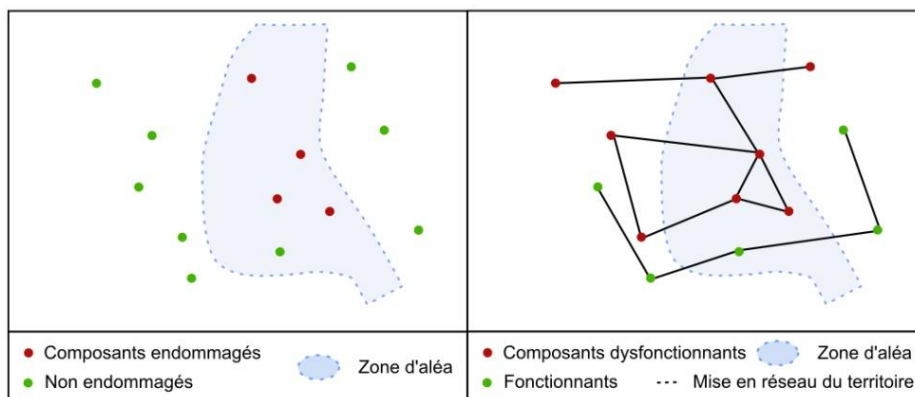


Figure 2.4 : De l'endommagement matériel à l'endommagement fonctionnel.

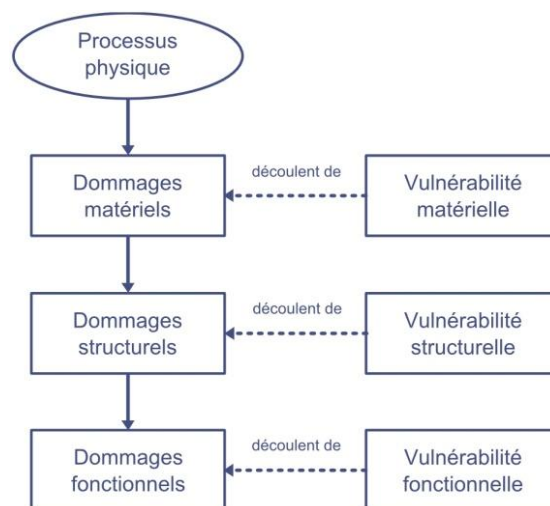


Figure 2.5 : Les niveaux matériel, structurel et fonctionnel et leur vulnérabilité associée (Reghezza, 2006).

Ce niveau intermédiaire caractérise la mise en relation des composants d'un système, c'est à dire sa mise « en réseau ». Il requiert d'étudier l'organisation spatiale du système, autrement dit sa configuration spatiale. Par exemple, lorsqu'un aléa endommage l'infrastructure matérielle d'un réseau, cet endommagement modifie la trame du réseau, autrement dit son organisation : les chemins entre deux stations ne sont alors plus en service, ce qui entraîne une reconfiguration de la structure du réseau. En d'autres termes, « les potentialités relationnelles de la structure sont altérées » (Gleyze, 2005). Ces dommages structurels débouchent alors sur des dommages fonctionnels. *In fine*, à chaque niveau d'endommagement, il est possible d'associer un niveau de vulnérabilité (Fig. 2.5).

Cette grille de lecture des mécanismes d'endommagement, qui repose sur le triptyque endommagement matériel, endommagement structurel et endommagement fonctionnel, trouve ses origines dans des travaux concernant l'analyse de la vulnérabilité des réseaux de transport (Gleyze, 2005) (Fig. 2.6). Cette formalisation a été reprise très récemment concernant l'analyse des réseaux viaires dans un contexte de risques (Nabaa, 2011). Elle fait aussi l'objet de développement concernant d'autres types d'organisations en réseaux comme les services de traitement des déchets (Béraud, 2011).

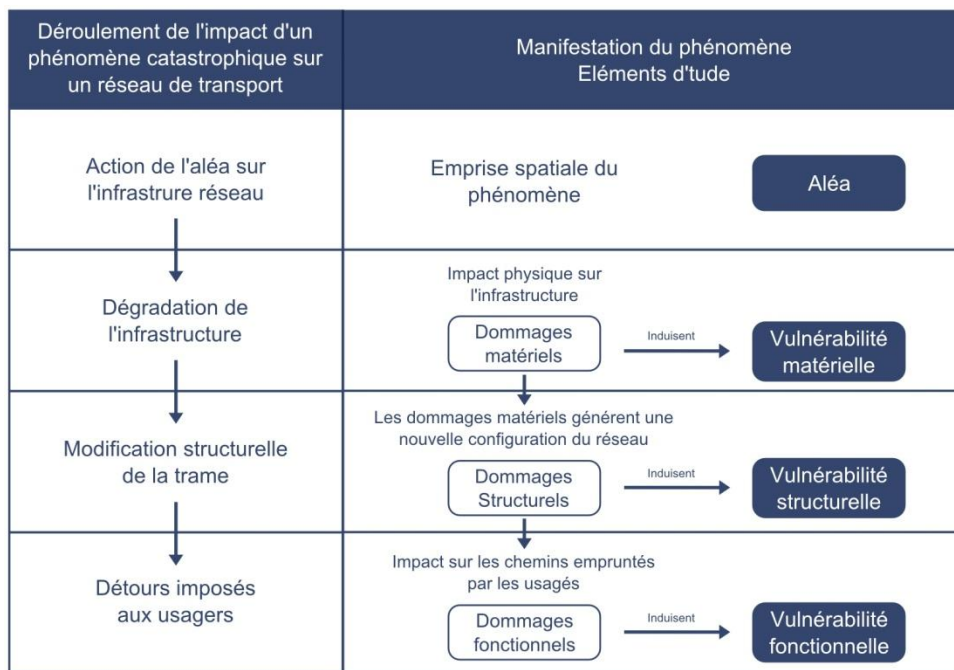


Figure 2.6 : Impact d'un événement catastrophique sur un réseau de transport – détails des dommages et des vulnérabilités impliqués (d'après : Gleyze, 2005).

De plus, cette grille de lecture s'est montrée particulièrement pertinente afin d'analyser la vulnérabilité de la métropole parisienne (Reghezza, 2006). Elle a alors été spécifiquement appliquée au réseau de la RATP et à une entreprise « type ». Plus généralement, elle s'est révélée particulièrement adaptée pour la compréhension des mécanismes d'endommagement en milieu urbain. Ainsi, ces applications montrent

qu'actuellement cette grille de lecture constitue le meilleur formalisme permettant de rendre compte de la relation complexe entre les risques et les territoires.

Cette vision des mécanismes d'endommagement est caractéristique d'une vision plus systémique des territoires. Elle tend à prendre en considération les relations entre les risques et les territoires davantage en termes de connexité que de contiguïté. Plus précisément, cette grille de lecture met en exergue le fonctionnement réticulaire des territoires organisés autour des réseaux techniques. De fait, l'intérêt pour cette grille de lecture illustre que les réseaux techniques permettent en partie de rendre compte de la relation complexe existant entre les risques et les territoires.

Au-delà de ce formalisme, compte tenu des positionnements adoptés (2.2.3), il est logique de lier vulnérabilité des réseaux techniques et vulnérabilité urbaine. Ainsi, si les réseaux techniques constituent la pierre angulaire du fonctionnement du système urbain, les périodes de crise en sont le révélateur. Si les réseaux d'infrastructure apparaissent comme des moyens permettant de véhiculer des biens, des personnes, de l'énergie, etc., le revers de ce fonctionnement est qu'ils véhiculent aussi des perturbations, aboutissant parfois à des catastrophes (Kerven & Pateyron, 1995).

C'est donc « *par les réseaux que se règle le fonctionnement des villes (ou qu'il se dérègle)* » (Roncayolo, 1990). Ainsi, Marcel Roncayolo, qui n'est pas à proprement parler un spécialiste des risques, mais qui est en revanche un fin connaisseur du phénomène urbain écrit : « *l'importance des réseaux explique, en grande partie, que nos sociétés se considèrent comme particulièrement vulnérables.* » (Roncayolo, 1990). Or, comme ces réseaux se concentrent en ville, la ville apparaît vulnérable par ses réseaux.

La ville qui bénéficie de la concentration (de la densification) des réseaux techniques peut en contrepartie en subir les conséquences. Sachant que ces réseaux techniques sont fortement reliés entre eux, il est alors facile de créer des scénarios apocalyptiques : « *les réseaux, reliés entre eux, sont menacés d'une thrombose généralisée* » (Izrealwicz, 1999). Néanmoins, le bon fonctionnement ou la remise en service rapide de ces réseaux peuvent apparaître comme des facteurs permettant de faire face à des catastrophes. Ainsi, la gestion de crise peut se trouver facilitée si les réseaux techniques fonctionnent. Autrement dit, la résilience des réseaux techniques est un facteur de résilience urbaine.

D'un point de vue purement systémique et fonctionnel, comme l'existence et la persistance d'un système requiert la persistance des relations entre ses sous-systèmes, la persistance de la ville requiert la persistance des réseaux techniques qui font liens. Dans les faits, la rupture de ces réseaux implique l'isolation de l'ensemble des composants urbains et par conséquent une remise en question du fonctionnement du système urbain. Déduction faite, ces réseaux jouent un rôle essentiel dans les mécanismes de diffusion du risque (entre les différents composants urbains) et dans les mécanismes de remise en service du système urbain. L'existence et la persistance du système « ville » sont alors subordonnées à l'existence et à la persistance du fonctionnement des réseaux techniques.

La nature spatiale des risques ancre profondément les risques au sein des territoires. Bien que la relation entre les risques et les territoires semble évidente, cette relation ne fait que rarement l'objet de formalisation. Or, cette relation se révèle complexe. Ainsi, les territoires se comportent comme des milieux hétérogènes et anisotropes, les risques ne se répartissant pas proportionnellement à une distance à l'aléa. Il convient dès lors de se donner les moyens, non pas de réfléchir uniquement en termes de contiguïté des risques, mais également de les saisir dans leurs relations de connectivité. Les « risques réseaux » illustrent cette complexité qu'il convient alors d'appréhender par-delà la simple dichotomie aléa-vulnérabilité, pour favoriser plus généralement une compréhension des mécanismes d'endommagement. Une grille de lecture fondée sur les mécanismes d'endommagement des réseaux de transport a alors été très vite appliquée à des mégapoles comme Paris. Cette grille de lecture illustre que les réseaux techniques permettent de rendre compte en partie de la relation complexe que les risques entretiennent avec les territoires et en particulier avec les villes. L'existence et la persistance du système « ville » sont alors subordonnées à l'existence et à la persistance du fonctionnement des réseaux techniques. Il se trouve que c'est par les réseaux techniques que se règle ou se dérègle le fonctionnement urbain.

2.4 SYNTHÈSE DU CHAPITRE 2

La ville concentre actuellement l'attention des gestionnaires puisque les enjeux s'y concentrent : populations, habitations, entreprises, infrastructures critiques... Le développement des politiques d'amélioration de la résilience urbaine illustre bien cette tendance. Ainsi, la gestion des risques en milieu urbain constitue un des défis majeurs du XXI^{ème} siècle. Si cette attention semble tout d'abord justifiée, il n'en reste pas moins que la relation entre les villes et les risques reste ambiguë. En effet, si les villes concentrent les enjeux, l'exposant ainsi à des catastrophes, elles concentrent aussi les ressources leur permettant de faire face à ces catastrophes.

Dans les faits, la relation entre les villes et les risques se révèle complexe. Ainsi, les risques « naturels » en ville apparaissent être le fruit d'un environnement spécifique né d'une hybridation entre d'une part un aléa naturel et d'autre part un objet anthropique. Tout l'enjeu de la gestion des risques d'inondation en milieu urbain est alors d'analyser ces phénomènes d'hybridation. Or, les politiques classiques de gestion des risques d'inondation en milieu urbain reposent principalement sur un principe d'opposition visant à lutter contre les inondations ou à les éviter en limitant l'urbanisation dans les zones inondables. C'est pourquoi, les villes, qui tendent à se développer afin d'être compétitives et attractives, considèrent cette gestion comme une contrainte visant à limiter leur développement, et non comme un investissement pouvant contribuer à un développement urbain durable.

Afin de mieux appréhender les relations qu'entretiennent les villes avec les risques, il convient dès lors de se focaliser sur cet objet protéiforme et difficile à saisir qu'est la ville. La ville apparaît alors avant tout comme une construction subjective. Elle est le fruit de nos représentations et elle ne peut passer outre le prisme de nos sens. C'est pourquoi, il n'existe pas une définition unanimement reconnue de la ville et tout modèle élaboré afin de la saisir sera donc imparfait. Dans cette recherche, la ville sera considérée comme un système complexe. Plus précisément, elle sera considérée comme un système sociotechnique où les réseaux techniques tiennent une place centrale. En effet, les réseaux techniques alimentent, solidarisent et irriguent l'ensemble des composants des territoires urbains. Cette place stratégique les rend extrêmement influents dans la dynamique de maintien du système urbain.

Si ce positionnement relatif à la ville est placé dans le contexte des réflexions menées sur les relations qu'entretiennent les risques avec les territoires, il est possible de mieux formaliser ces relations en élaborant une grille de lecture fondée sur les mécanismes d'endommagement des réseaux techniques. En l'occurrence, une grille de lecture a déjà été formulée concernant les réseaux de transport. Elle repose sur la distinction entre les dommages matériels, structurels et fonctionnels. Cette grille de lecture illustre que les réseaux techniques permettent en partie de rendre compte de la relation complexe que les risques entretiennent avec les territoires, en particulier avec les territoires urbains. Ce chapitre conclut alors que c'est par les réseaux techniques que se règle ou se dérègle le fonctionnement urbain.

CHAPITRE 3

La résilience urbaine : la mise en œuvre pratique d'un concept théorique

Les politiques d'amélioration de la résilience urbaine menées dans des projets européens (comme FloodResilienCity) ou promues par des campagnes internationales (comme celle de l'ISDR) mettent en exergue les difficultés liées à la gestion des risques en milieu urbain. Néanmoins, ces différents travaux tendent surtout à promouvoir le concept de résilience. Ainsi, la résilience est « à la mode » aussi bien chez les gestionnaires que chez les scientifiques. Comfort et al. (2010) parlent alors de « *buzzword* » et datent la consécration du terme suite aux événements du 11 septembre et de Katrina. Klein et al. (2003) montrent plutôt son lien avec les travaux et les préoccupations sur le climat.

Ce recours croissant au concept de résilience peut être interprété comme émanant d'un besoin croissant de résilience dans des sociétés technologiques qui deviendraient de plus en plus complexes et vulnérables (Boin et al., 2010). Quoi qu'il en soit, l'omniprésence de la résilience interroge sa pertinence. En effet, l'utilisation abondante du concept, en particulier dans les sciences sociales, ne s'accompagne pas toujours, loin s'en faut, d'un socle théorique solide (Brand et Jax, 2007). Le terme devient une sorte de mot valise sollicité à des fins très diverses, à l'instar d'autres notions en vogue (durabilité, gouvernance, etc.) qui lui sont d'ailleurs souvent attachées (Aschan, 2000 ; Gallopin, 2006). Brand et Jax (2007) font référence à cette « tendance » en définissant la résilience comme un « *boundary object* », Klein et al. (2003) préfèrent le qualifier d'« *umbrella concept* », tandis que Damienne Provitolo (2009) parle d'un concept à « géométrie variable ». Le sort du concept de résilience suivrait ainsi la trajectoire inéluctable décrite par Deleuze et Guattari : « *la généalogie de tout concept est structurée en trois moments : d'abord la formation et la formulation, puis la vulgarisation et enfin la commercialisation* ».

Or, les gestionnaires sont à la recherche de concepts opérationnels nouveaux, permettant de tenir compte de contraintes économiques, historiques, culturelles et sociologiques, afin d'établir *in fine* des politiques de gestion des risques efficaces jugées acceptables par l'ensemble des parties prenantes. Dans ce contexte, l'émergence du concept de résilience dans les cindyniques suscite des attentes opérationnelles importantes. Cependant, quelle que soit la portée opérationnelle du concept, la résilience est un concept scientifique qui ne peut pas être abordé seulement par sa mise en pratique : une mise en pratique qui laisse d'ailleurs apparaître des ambiguïtés. De plus, l'apparente polysémie du concept ne peut qu'interroger sa mise en œuvre.

L'objectif de ce chapitre est de définir une approche générale permettant d'analyser la résilience urbaine. Pour cela, ce chapitre se focalisera dans un premier temps sur le concept de résilience. Il sera notamment question de replacer ce concept par rapport aux concepts préexistants dans les cindyniques. Dans un deuxième temps, il s'agira d'analyser la manière dont la résilience urbaine est mise en pratique pour faire face aux inondations. Enfin, il conviendra de définir l'approche générale retenue.

3.1 LA RESILIENCE : CLARIFICATION CONCEPTUELLE

La polysémie du concept de résilience n'est pas nécessairement problématique : elle peut même se révéler féconde en termes de questionnements heuristiques et méthodologiques (Folke, 2006). Les difficultés surgissent, lorsque peu à peu, la polysémie du concept semble légitimer un flou sémantique qui débouche parfois sur des impasses théoriques et opérationnelles. Face à des injonctions parfois contradictoires, le concept deviendrait alors « inopérant », la résilience se résumant alors à une sorte d'utopie discursive inatteignable, au point que certains chercheurs ont déjà pu juger ce concept trop vague pour être utilisé dans une démarche de réduction des risques (Manyena, 2006). Pour d'autres encore, la résilience illustre les questionnements épistémologiques actuels relatifs à l'importance accordée dans le domaine scientifique à la précision conceptuelle (Strunz, 2012).

3.1.1 La résilience un concept pluridisciplinaire et polysémique

Le concept de résilience a fait l'objet de nombreux travaux. Si l'étymologie est très souvent sollicitée pour appuyer les définitions de la résilience et si cette étymologie fait globalement consensus, ce n'est pas le cas pour la genèse du concept scientifique (Tisseron, 2009 ; Klein et al., 2003 ; Godschalk, 2003). Ainsi, selon les sources, la résilience apparaîtrait par le biais des sciences de l'ingénieur, de l'écologie ou de la psychologie. Chacun s'accorde toutefois sur le fait que le concept est pluridisciplinaire (Cutter et al., 2008 ; De Bruijne et al., 2010) et qu'il s'est largement répandu en dehors de ses champs disciplinaires d'origine (Fig. 3.1).

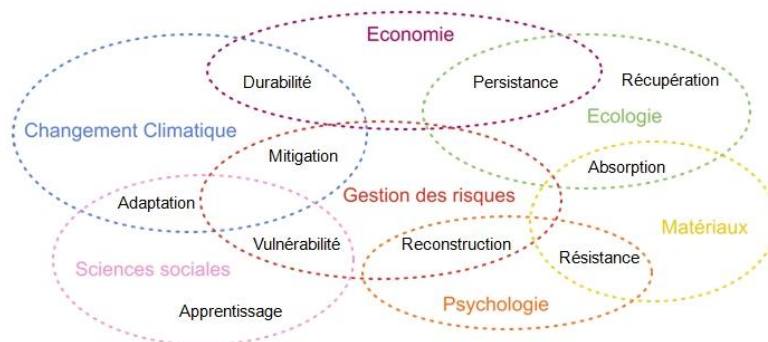


Figure 3.1 : La résilience un concept pluridisciplinaire (Lhomme et al., 2010).

Cette pluridisciplinarité serait d'ailleurs pour certains à l'origine de la polysémie du concept (Brand et Jax, 2007). Néanmoins, cette vision est un peu « simplificatrice », puisque au sein même d'une seule discipline plusieurs courants peuvent exister. Ainsi, il existe aujourd'hui au moins deux courants distincts étudiant la résilience en écologie : l'« *ecological resilience* » courant qui découle directement des travaux de C.S. Holling et l'« *engineering resilience* » courant qui dérive d'une vision plus traditionnelle de la stabilité en écologie (Holling, 1996). Ces deux courants illustrent deux conceptions antagonistes de la stabilité entraînant, par là même, deux types de management des écosystèmes.

Dans les faits, en introduisant le concept de résilience, l'écologie a dans le même temps complexifié sa conception des écosystèmes. Ainsi, l'écologie a premièrement étudié des systèmes stables situés autour d'un point d'équilibre, puis des systèmes instables situés loin de l'équilibre avec plusieurs points d'équilibre (*i.e.* correspondant à des systèmes « multistables »), pour *in fine* étudier des systèmes où la notion de stabilité n'a plus réellement de sens pour un non écologue – *i.e.* des systèmes où les points d'équilibre et les bassins d'attraction correspondants sont dynamiques (Fig. 3.2).

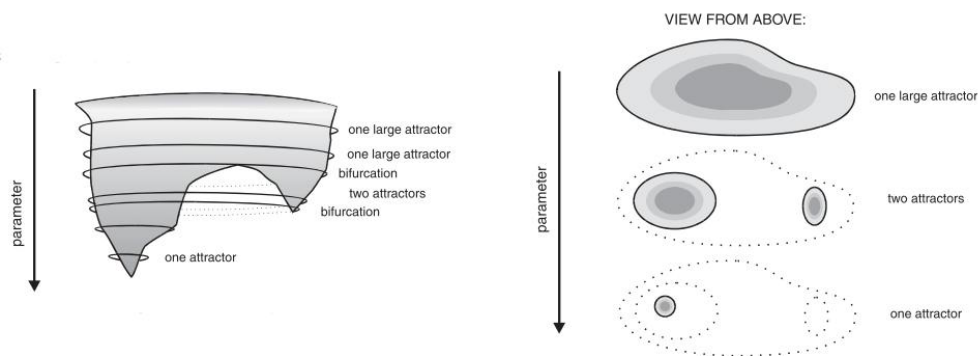


Figure 3.2 : Illustration didactique de l'évolution d'un bassin d'attraction en fonction des changements de paramètres du système (Gallopín, 2006).

Cette complexification a alors nécessité une certaine extension de la définition de résilience, qui insiste dès lors sur les phénomènes de transformation, d'apprentissage et d'innovation au sein des systèmes (Brand et Jax, 2007). Or, par ce biais, la résilience gagnerait en applicabilité dans les sciences sociales, alors qu'elle perdrait en précision en écologie (Brand et Jax, 2007).

Quoi qu'il en soit, il est désormais reconnu que la résilience étudie des systèmes : que ce soit des écosystèmes, des systèmes sociaux, des systèmes économiques, des systèmes spatiaux... Par cet ancrage systémique, la résilience favorise des approches pluridisciplinaires étudiant des systèmes de natures différentes. Il semble d'ailleurs pertinent de faire référence à une résilience systémique par opposition aux résiliences disciplinaires (Dauphiné et Provitolo, 2007 ; Provitolo, 2009). Parmi ces approches pluridisciplinaires, les recherches concernant les systèmes socio-écologiques – ou *socio-ecological systems* (S.E.S) – semblent être les plus structurées. Ainsi, des organismes, comme la *resilience alliance*, promeuvent les études concernant la résilience des S.E.S. Ces

travaux se situent dans la continuité de l'*ecological resilience* et ont donné naissance à ce qui est couramment nommé la *socio-ecological resilience*.

Il ne faut donc pas associer la polysémie du concept uniquement à sa pluridisciplinarité. Le concept tend en effet à évoluer en même temps qu'évolue la conception des systèmes étudiés. Le résumé des différentes acceptations du concept peut alors laisser perplexe (Tab. 3.1).

Théorique / Pratique	Stabilité (équilibre) / Persistance	Propriété / Processus	Antonyme vulnérabilité / continuité ou complémentarité
Holling, 1973 ; Provitolo, 2009	Pimm, 1985 ; Dovers & Handmer, 1996 ; Sheffy, 2006 ; O'Rourke, 2007	Klein et al., 2003; Pelling, 2003	Folke et al., 2002, Dovers & Handmer, 1996 ; UNISDR 2005
Folke et al., 2002 ; Godschalk 2003 ; UNISDR, 2005	Holling, 1973 et 1996 ; Berkes et al., 2002 ; Walker & Salt, 2006	Manyena, 2006 ; Mc Entire et al., 2002	Cutter et al., 2008 ; Provitolo, 2009 ; Gallopin, 2006
Résistance /Adaptation	Social /Physique	Systémique / Analytique	Positif /Neutre
Mileti, 1999; Alwang et al., 2001	Mc Manus et al. 2008 ; Dovers & Handmer, 1996 ; Vale et Campanella, 2005	Berkes et al., 2002 ; Carpenter et al., 2001 ; Gallopin, 2006	Godschalk, 2003; Folke et al., 2002
Comfort, 1999; Dovers & Handmer, 1996; Fiksel, 2003	Cimellaro et al., 2010 ; Sheffy, 2006 ; O'Rourke, 2007 ; Bruneau et al., 2003	Cardona, 2003 ; Mc Manus et al., 2008	Klein et al., 2003 ; Boin et al., 2010

Tableau 3.1 : Les contradictions attachées au concept de résilience.

Si d'une part la rigueur des travaux n'est pas interrogée et si d'autre part ces travaux ne sont pas placés dans le cadre théorique leur donnant une certaine cohérence logique, alors la résilience perd tout sens. L'apparente polysémie du concept s'accompagne alors de positionnements pouvant apparaître multiples, voire contradictoires. Ainsi, pour être résilient, il faudrait être à la fois : résistant, flexible et adaptable ; redondant, diversifié et efficace ; autonome et dans une démarche collaborative ; capable d'apprendre du passé et de faire face aux incertitudes du futur.

Malgré ces sources possibles d'ambiguïtés, la résilience est présentée par certains comme un nouveau paradigme. En effet, la résilience est parfois utilisée dans des travaux qui se placent en rupture par rapport à des travaux ou des pratiques antérieurs. C'est notamment le cas des premiers travaux d'Holling dans le champs de l'écologie (Holling, 1973), tandis qu'en matière de Sûreté de Fonctionnement, la résilience apparaît comme un moyen logique permettant de dépasser les approches existantes (Hollnagel, 2006).

Ainsi, parallèlement à l'« *engineering resilience* » définie par Holling, la « *resilience engineering* » s'est développée dans le domaine de la Sûreté de Fonctionnement. La résilience s'oppose ici au management classique des risques qui met traditionnellement des normes et des programmes en face de chaque cause éventuelle de dysfonctionnements (Hollnagel, 2006). Pour reprendre le vocable d'Edgar Morin (1990), il apparaît alors nécessaire de penser en termes de stratégies et non plus en termes de programmes. Dans ce contexte, pour être résilient, un système se doit d'être en mesure de ne plus nécessairement respecter les consignes prévues lorsqu'il a été identifié que l'environnement avec lequel il interagit a changé (Hollnagel, 2006). Il se trouve aussi nécessaire de remplacer la vision traditionnelle de causalités linéaires par une vision plus complexe de « concurrence » (causalités multiples combinées de manière complexe, voire apparition d'événements contingents sans causes clairement identifiables) (Hollnagel, 2006).

La résilience apparaît dans ce contexte comme un nouveau paradigme de management des risques permettant *in fine* de faire face à un environnement complexe. C'est pourquoi, pour certains, la résilience semble davantage être un concept issu du paradigme de la complexité (Ahern, 2011) (Tab. 3.2).

Equilibre	Non-équilibre
Linéaire	Réticulaire
Rationnel	Chaotique
Fermé	Ouvert
Prédictible	Incertain
Stable	Résilient
Hierarchique	Panarchique

Tableau 3.2 : La résilience un concept de la pensée complexe (inspiré de : Ahern, 2011).

En effet, ce concept pose notamment à la « pensée complexe » (*i.e.* à ses outils, méthodes ou théories) deux questions principales : Comment un système complexe peut-il persister dans le temps, alors que sa complexité semble l'exposer à de nombreux dangers ? Et plus généralement, comment un système peut-il ne pas être « vulnérable » dans un univers complexe ? Pour répondre à ces deux questions, il est alors nécessaire de mettre en avant des questionnements concernant l'adaptation, l'apprentissage, la persistance, la stabilité, la résistance, etc., correspondant à un ensemble de concepts mis en relation avec la résilience.

3.1.2 Le lien entre résilience et vulnérabilité

Le concept de résilience s'est développé récemment concernant la gestion des risques naturels (De Bruijne et al, 2010). Ainsi, « le concept de résilience est à présent utilisé dans une très grande variété de travaux interdisciplinaires qui concernent les interactions nature-société, incluant la réduction des catastrophes naturelles » (Klein et al., 2003). Néanmoins, l'introduction du concept de résilience dans ce domaine n'est pas si récente (Timmerman, 1981). Par exemple, le concept de résilience a été introduit en France en même temps que celui de vulnérabilité (Fabiani & Theys, 1987). Il est donc possible de faire référence, pour ce concept, à un développement à rebours. Dans les faits, le concept de résilience a mis du temps pour s'imposer, les chercheurs lui préférant dans un premier temps le concept de vulnérabilité, notamment en France où la résilience n'est pas un terme vernaculaire.

Désormais, le rapport entre les concepts de résilience et de vulnérabilité se révèle pluriel. En effet, il est nécessaire de rappeler ici un truisme, comme les deux concepts ne possèdent pas de définitions unanimement reconnues, la relation entre ces deux concepts dépend directement des définitions retenues (Klein et al., 2003). Ainsi, certains chercheurs ont pu résumer de façon didactique, diverses acceptations de cette relation (Cutter et al., 2008) (Fig. 3.3).

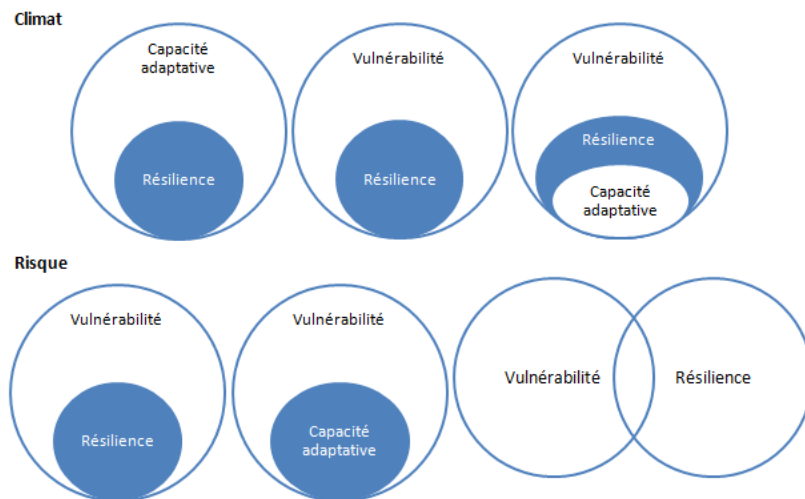


Figure 3.3 : Différentes acceptations de la relation « résilience – vulnérabilité – capacités adaptatives » (Cutter et al., 2008).

La mise en opposition de ces deux concepts a été fortement discutée et contestée (Klein et al., 2003 ; Cutter et al., 2008 ; Dauphiné et Provitolo, 2007 ; Provitolo, 2009). Ainsi, si la résilience est envisagée comme un processus, ce concept et celui de vulnérabilité se placeraient dans un même continuum (Manyena, 2006). En fait, la mise en opposition des deux concepts repose principalement sur deux acceptations critiquables. Premièrement, la résilience serait un attribut positif d'un système qu'il serait nécessaire d'augmenter, tandis que la vulnérabilité serait un attribut négatif qu'il serait nécessaire de diminuer (Pelling, 2003). Deuxièmement, la résilience et la vulnérabilité seraient l'inverse l'une de l'autre et constitueraient ainsi les deux faces opposées d'une même médaille (Folke et al., 2002).

Or, ces deux postulats sont contestables. En effet, les aspects négatifs de la résilience sont établis et toute résilience ne serait pas « bonne à prendre » (Rufat, 2010 ; Reghezza et al., 2012). Le deuxième postulat mènerait, quant à lui, à un raisonnement tautologique consistant à vouloir diminuer la vulnérabilité pour augmenter la résilience et inversement à vouloir augmenter la résilience pour réduire la vulnérabilité (Klein et al., 2003). Pourtant, c'est cette mise en opposition plutôt simple et critiquable qu'a retenue la *resilience alliance* (groupe de travail reconnu sur la résilience). L'objectif sous-jacent de ces recherches est notamment de donner une interprétation compréhensible du concept de résilience, dans le but *in fine* de proposer à des acteurs politiques des solutions permettant d'améliorer la résilience de leur système.

Toujours dans une perspective pratique et empirique, la résilience peut apparaître comme « englobant » (intégrant) la vulnérabilité. 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 & Clarck, 2000) et dans ce cadre le concept de résilience dépasse largement la notion de « recovery » (*i.e.* la post-crise). Ainsi, la résilience serait le *modus operandi* permettant de mettre en place des politiques de gestion des risques plus durables (Pasche & Geisler, 2005).

Pour justifier ce positionnement, il est possible de s'appuyer sur le changement de paradigme opéré par plusieurs pays européens en matière de gestion des risques d'inondation (Berlin, Mayence, Stuttgart). La résilience est alors présentée comme une politique de gestion des risques, consistant à ne plus uniquement lutter contre l'aléa, mais consistant à vivre avec celui-ci afin d'en réduire les impacts négatifs au minimum (Pasche & Geisler, 2005). On retrouve par exemple cette vision dans les projets INTERREG (FloodResilienCity & FREEMAN project). Par conséquent, les chercheurs associés à ces projets peuvent proposer d'étudier et d'évaluer la résilience en tenant compte de tous les paramètres contribuant à améliorer la gestion des risques (Schelfaut et al., 2011). Dans ce contexte, une politique de résilience nécessite une politique de réduction de vulnérabilité.

Cependant, la résilience peut être étudiée par le prisme de la vulnérabilité, la vulnérabilité englobant alors le concept de résilience. Ainsi, les études de vulnérabilité qualifiées de « biophysiques » étudient de façon analytique les vulnérabilités de différents enjeux. Elle est fonction du degré d'exposition à un aléa et d'une sensibilité face à celui-ci (Reghezza, 2006). Cette approche très « techno-centrée » de la vulnérabilité a longtemps dominé (et dans la pratique domine encore largement) les études de vulnérabilité. Cependant, l'approche biophysique ne tient pas compte des capacités des sociétés à faire face à l'événement, c'est-à-dire de leur capacité de réponse et d'adaptation (Provitolo, 2009). C'est pourquoi, la prise en compte d'une vulnérabilité « sociale » est nécessaire afin de compléter l'approche biophysique.

Or, la vulnérabilité sociale, telle qu'elle est réapparue, étudie la réaction des sociétés face aux risques (capacité d'adaptation, capacité à faire face). Ces capacités sociales sont aujourd'hui en partie « assimilées » à une résilience sociale (Cardona, 2003). Cette résilience sociale peut alors être mise en rapport avec les approches « biophysiques » afin

de compléter ces dernières. Il est dès lors fait référence à une vulnérabilité « synthétique » (Fig. 3.4). Pour étudier cette approche globale de la vulnérabilité, qui s'oppose à une vulnérabilité analytique, il est nécessaire de s'appuyer sur le triptyque, exposition-sensibilité (ou au contraire résistance)-résilience (Pelling, 2003). En effet, comme le souligne André Dauphiné, « la vulnérabilité intègre trois composantes : l'exposition à l'aléa, la résistance et la résilience » (Dauphiné et Provitolo, 2007). Cette approche permet alors de dépasser la segmentation des études de risques en géographie, entre d'une part une géographie « physique » centrée sur l'étude de la vulnérabilité biophysique, et d'autre part une géographie « humaine » centrée sur l'étude de la vulnérabilité sociale.

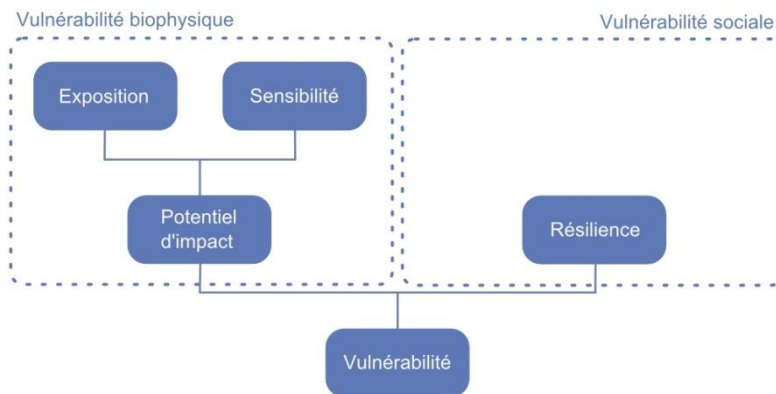


Figure 3.4 : La vulnérabilité synthétique. Dans ce cadre, la résilience est considérée comme synonyme des capacités des sociétés à faire face à une perturbation (*i.e.* synonyme d'une vulnérabilité sociale) et n'est qu'une composante de la vulnérabilité.

En outre, il a été proposé de distinguer la résilience et la vulnérabilité suivant l'emphase accordée par ces deux concepts aux aspects sociaux ou techniques. Il est notamment possible de définir la vulnérabilité comme la propension d'un enjeu à subir des dommages, c'est à dire comme une propriété essentiellement matérielle, et la résilience comme la capacité des sociétés à faire face à ces endommagements, c'est-à-dire comme une propriété plus sociale (Cardona, 2003). Cependant, le positionnement totalement inverse peut être avancé, la résilience étant davantage présentée comme une stratégie matérielle et la vulnérabilité définie comme une propriété sociale (De Bruijn, 2005). Objectivement, les deux concepts s'appliquent aussi bien à des systèmes techniques qu'à des systèmes sociaux, cette distinction n'est donc pas appropriée pour distinguer les deux concepts.

Pour résumer, les concepts de vulnérabilité et de résilience ne sont pas nécessairement opposés, aucun de ces deux concepts n'englobent l'autre et tous les deux s'appliquent aussi bien à des systèmes techniques que sociaux. Ainsi, les concepts de vulnérabilité et de résilience se recoupent plus ou moins et il semble difficile d'établir des frontières claires et précises entre ces deux concepts. Quoi qu'il en soit, les réflexions sur ce binôme mettent en exergue les ambiguïtés soulevées par l'introduction de la résilience dans les cindyniques. Il semble alors intéressant de considérer l'introduction de la résilience dans les cindyniques comme une opportunité pour repenser le cadre théorique des risques.

3.1.3 Vers un nouveau cadre théorique des risques

Malgré les ambiguïtés pouvant être soulevées par le concept de résilience, il ne faudrait pas exagérer sa polysémie. Dans le cas contraire, il serait d'ailleurs fait référence dans cette recherche à une notion et non à un concept. Ainsi, à partir d'une étude pluridisciplinaire, il est possible de proposer une définition de la résilience (Lhomme et al., 2010). En effet, deux termes semblent se dégager des définitions afférentes aux différentes acceptations du concept : l'absorption et la récupération. Le terme d'absorption est notamment très utilisé en écologie (domaine de référence en termes de réflexions conceptuelles sur le sujet) pour définir la résilience, tandis que la récupération est très présente dans les études de risques (Tab. 3.3). *Ainsi, la résilience est définie dans cette thèse comme la capacité d'un système à absorber une perturbation et à récupérer ses fonctions à la suite de celle-ci.*

Notion	Nombre d'occurrences	Notion	Nombre d'occurrences
Adapt	2	Cope with	4
Absorb	1	Recover	8
Withstand	3	Maintain	1
Return	1	Bounce back	1

Tableau 3.3 : Notions utilisées dans les définitions de la résilience concernant les risques naturels, d'après celles retenues dans (Mayunga, 2007).

Néanmoins, définir la résilience ne lève pas toutes les ambiguïtés liées à ce concept. Par exemple, à partir de cette première définition, il est possible de définir la résilience urbaine. Ainsi, en postulant que la ville peut être définie comme un système, la définition retenue peut être transposée. La résilience urbaine est ainsi la capacité d'une ville à absorber une perturbation et à se remettre de celle-ci. Or, cette définition n'abolit pas les ambiguïtés pouvant être soulevées par le concept de résilience, car celle-ci reste vague. En effet, deux questions principales restent en suspens et sont laissées à la libre interprétation de ceux qui l'utilise : que signifie absorber une perturbation pour un système urbain ? À quoi correspond la récupération pour un système urbain ?

Dans les faits, l'introduction de l'objet d'étude permet de mettre en exergue les ambiguïtés soulevées par une définition somme toute assez vague (Lhomme et al., 2012a). Plus précisément, en dehors de questionnements purement sémantiques, l'objet d'étude soulève aussi des questionnements d'ordre méthodologique. En effet, dans le cadre de la résilience, cet objet est un système, or il existe deux grandes méthodes pour étudier un système : la méthode analytique et la méthode systémique.

L'approche analytique, en négligeant les relations entre les composants, a été sévèrement critiquée concernant l'étude des systèmes, en particulier concernant l'étude

des systèmes complexes. L'approche analytique conduit à définir le risque selon un triptyque : aléa ; endommagement ; reconstruction (Fig. 3.5). Les composants d'un système étant considérés isolément dans cette approche (les composants sont indépendants les uns des autres), ils sont alors confrontés individuellement à l'aléa. Ils seront alors plus ou moins endommagés en fonction de leur sensibilité et de leur exposition. Ces dommages sont alors circonscrits à la zone d'aléa. En revanche, dans une vision systémique, les composants endommagés sont en relation avec les autres composants. Il est dès lors nécessaire d'introduire les possibilités de dysfonctionnements liés aux endommagements des composants (Fig. 3.5). Cette approche nécessite donc d'étudier différemment les conséquences d'un aléa sur un système, car un composant peut dysfonctionner sans nécessairement être endommagé. Les dommages peuvent alors très largement dépasser la zone d'aléa initial.

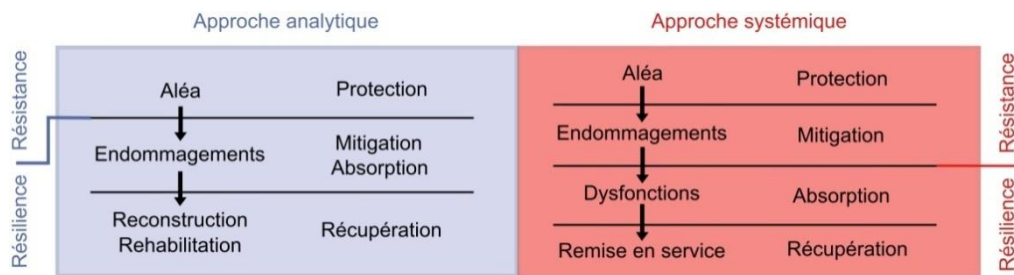


Figure 3.5 : Les notions d'absorption et de récupération selon les approches analytique et systémique (Lhomme et al., 2012a).

Ainsi, si le système urbain est étudié de façon analytique, son absorption est caractérisée par son niveau d'endommagement (matériel), qui est lui-même fonction des mesures de mitigation mises en place, c'est-à-dire de l'ensemble des mesures prises pour atténuer les dommages (diminution de l'exposition à l'aléa ou réduction des vulnérabilités) (Fig. 3.5). La récupération se caractérisera par la reconstruction et la réhabilitation des enjeux endommagés. Si le système est étudié de manière systémique, l'absorption du système est davantage caractérisée par son degré de fonctionnement. L'absorption caractérise alors la capacité du système à continuer de fonctionner en mode dégradé. L'endommagement relève toujours des mesures de mitigation, mais ne caractérise plus nécessairement l'absorption puisque un système peut fonctionner même s'il est endommagé (Fig. 3.5). La récupération se caractérise par la remise en service du système.

En fonction de la méthode choisie pour analyser le système (qui doit être choisie selon la nature du système), les notions d'absorption et de récupération seront donc définies différemment, ces deux notions devenant équivoques. Par conséquent, les définitions de la résilience seront différentes selon la méthode d'étude choisie.

Il existe une approche intermédiaire qui synthétiserait les deux premières approches décrites. Cette méthode, intégrative et holistique, permet de tenir compte très finement des composants du système et des relations que chacun des composants entretient avec les autres composants. Les notions d'endommagement et de dysfonctionnement sont

abandonnées au profit de la notion d'impact qui intègre les deux notions. Le risque est alors défini par un nouveau triptyque : aléa ; impact ; réponse (Fig. 3.6). La séparation entre mitigation et absorption devenant floue. Cette approche est qualifiée ici de synthétique.

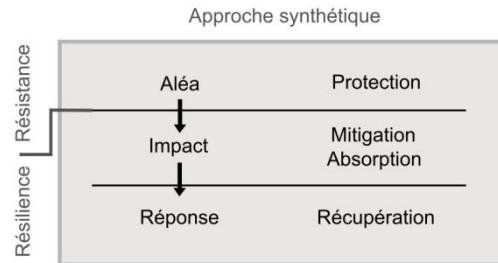


Figure 3.6 : Les notions d'absorption et de récupération selon l'approche synthétique (Lhomme et al., 2012a).

À partir de cette étude, une schématisation conceptuelle de la résilience a été proposée (Fig. 3.7). 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 nécessite de différencier endommagement et dysfonctionnement pour bien analyser le système (approche systémique). Un deuxième processus tient compte de l'apprentissage et de l'adaptation du système consécutifs aux perturbations que le système a pu subir au cours de son histoire (résilience de temps long) (Fig. 3.7). Cette approche plus globale de la résilience nécessite de regrouper l'endommagement et le dysfonctionnement sous le terme plus général d'impact (approche synthétique), la résilience devenant à cette échelle temporelle une véritable stratégie tendant à diminuer ces impacts (aussi bien matériels que fonctionnels).

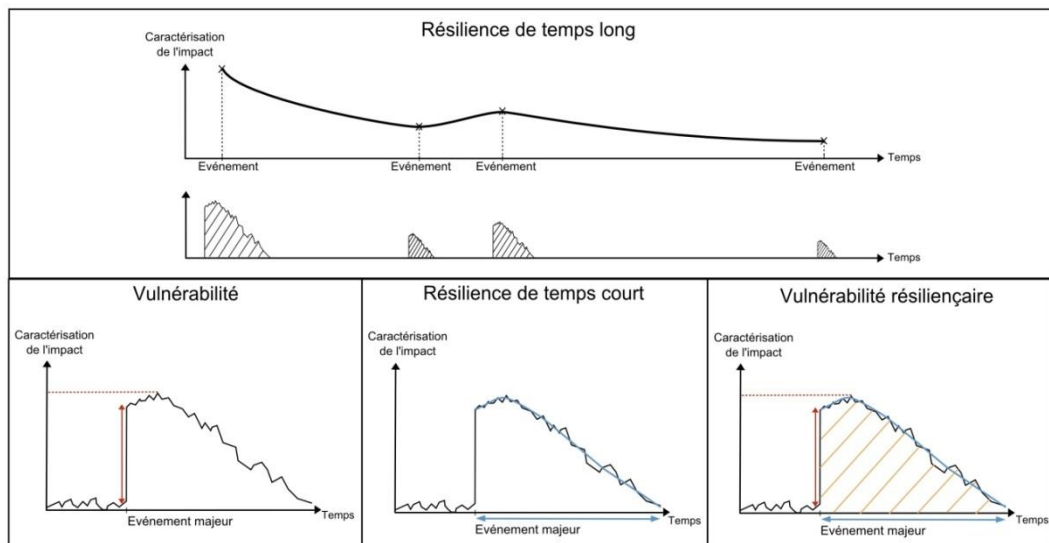


Figure 3.7 : La résilience envisagée selon deux échelles de temps (Lhomme et al., 2012a).

La résilience de temps court se caractérise principalement par une réponse (autrement dit une réaction qui a pu être en partie programmée sans pouvoir l'être totalement) du système consécutive à une perturbation ayant provoqué des endommagements. Dans ce contexte, la résilience correspond à la capacité d'un système à assurer en partie son fonctionnement durant le temps de l'endommagement (temps représenté par la double flèche bleue) et à retrouver ensuite un fonctionnement « normal » (capacité représentée par la courbe bleue). La résilience se différencie ici 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 (Fig. 3.7). C'est pourquoi, la vulnérabilité peut être évaluée par l'amplitude des dommages, autrement dit par les impacts directs (représentés sur le schéma par la double flèche rouge), ou bien encore par le niveau maximum de ces dommages (représentés sur le schéma par la ligne rouge en pointillé) prenant en compte les effets matériels induits. La résilience et la vulnérabilité se placent alors dans un même continuum (Fig. 3.8) couvrant plus ou moins partiellement les notions d'endommagement, d'absorption et de récupération.

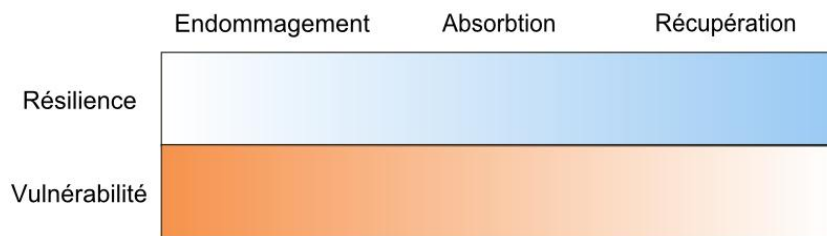


Figure 3.8 : Résilience et vulnérabilité dans un même continuum (Lhomme et al., 2010).

Cependant, ces deux concepts étant placés dans une même continuité, il est difficile de les étudier distinctement et de manière totalement indépendante. Par exemple, la réaction préventive d'un système (caractéristique d'une résilience de temps court) face à une perturbation éminente peut contribuer à diminuer les impacts directs, autrement dit l'endommagement, et par conséquent la vulnérabilité.

Le recours au concept de vulnérabilité résilience (Provitolo, 2009) permet alors de caractériser l'ensemble des mécanismes dont résultent les impacts causés par la perturbation (*i.e.* les impacts directs, les impacts indirects, la réaction du système, la remise en service...). L'aire, représentée en orange sur le schéma (Fig. 3.7), permet d'évaluer l'impact global de la perturbation correspondant à la vulnérabilité résilience du système. Cette évaluation tient compte de la vulnérabilité et de la résilience du système (concepts étroitement reliés). L'exemple d'une mesure synthétique du concept de vulnérabilité résilience 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 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 très théorique d'une

répétition d'événements de même amplitude et de même nature sur un système dont les caractéristiques restent inchangées dans le temps, les impacts globaux de ces événements (qui correspondent à la mesure synthétique du paragraphe précédent) 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 donc à une stratégie visant à diminuer les impacts globaux liés aux perturbations que le système est amené à affronter.

Si les questionnements qui découlent de la polysémie du concept de résilience peuvent être féconds d'un point de vue théorique, ces concepts caractériseront plus difficilement les mécanismes de réalisation du risque, en particulier les mécanismes d'endommagement et de reconstruction. Pour cela, il semble nécessaire de s'appuyer sur une nouvelle formalisation du risque afin de distinguer, d'une part les concepts d'étude et d'analyse du risque (permettant d'étudier la production du risque) et d'autre part les mécanismes de réalisation du risque (qui offrent des perspectives intéressantes en matière de gestion « praticienne » des risques, car elles auront un fort potentiel « prédictif »).

Alors même que les concepts d'aléa, de vulnérabilité et de résilience se recoupent plus ou moins, il semble possible de caractériser la réalisation du risque en ayant recours à trois notions, celles d'événement, d'impact et de réponse (Fig. 3.9). Ces trois notions interagissent entre elles, créant un véritable système de réalisation du risque, pouvant alors être formalisé mathématiquement. Chaque notion met en exergue un des aspects centraux des concepts d'étude du risque, sans pour autant que ces concepts puissent y être réduits : l'aléa est étroitement associé à la notion d'événement, la vulnérabilité à celle d'impact et la résilience à celle de réponse.

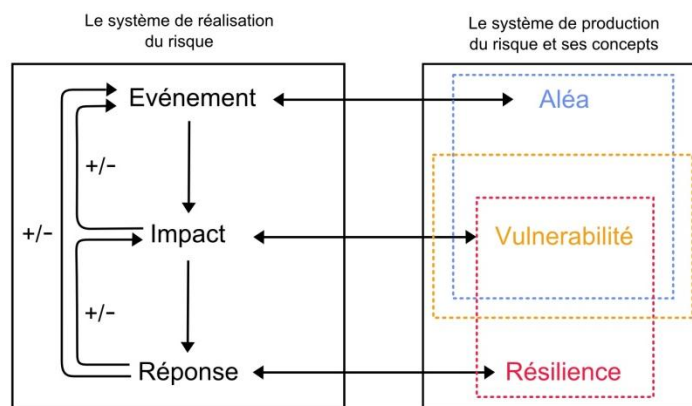


Figure 3.9 : Proposition d'un nouveau formalisme du risque (Lhomme et al., 2012a).

Compte tenu de sa pluridisciplinarité et de sa polysémie le concept de résilience n'est pas facile à appréhender. Ce concept pose ainsi de nombreuses questions d'ordre théorique et méthodologique. Paradoxalement, cette polysémie n'est pas induite par

une profusion de définitions divergentes, mais provient plutôt des interprétations qui sont faites de ces définitions. En effet, ces définitions restent vagues et peuvent ainsi être interprétées différemment selon les objets étudiés et les méthodes choisies pour étudier ces objets. Pour recourir au concept de résilience de façon opérationnelle, encore faut-il garder à l'esprit les problèmes théoriques et les limites méthodologiques attachés aux différentes acceptions du concept, en portant une attention toute particulière aux contradictions inhérentes à certains emplois. Quoiqu'il en soit, la résilience est définie dans cette thèse comme la capacité d'un système à absorber une perturbation et à récupérer ses fonctions à la suite de celle-ci. De plus, l'émergence du concept de résilience dans les cindyniques se révèle être une opportunité pour repenser le cadre théorique des risques.

3.2 LA RESILIENCE FACE AUX RISQUES D'INONDATION : LES APPROCHES DOMINANTES

Alors même que la résilience fait l'objet de nombreux débats conceptuels dans le domaine académique, ce concept est déjà mis en pratique pour faire face aux risques. Ce concept est notamment utilisé dans les politiques de gestion des risques d'inondation. Dans ce cadre, la résilience s'applique à différentes échelles – du bâtiment au bassin versant – avec des mesures qui sont extrêmement diverses. La résilience des communautés censées faire face aux aléas est aussi prônée et la résilience des infrastructures critiques est posée comme un impératif.

3.2.1 La résilience à l'échelle des bâtiments

Compte tenu de l'importance accordée à la résilience des bâtiments en matière de gestion des risques d'inondation, des indicateurs de résilience des territoires face aux inondations reposent sur l'étude des impacts causés par les inondations sur les bâtiments. Ainsi, il a été proposé, pour évaluer la résilience, d'étudier le rapport entre les dommages causés aux structures des bâtiments et les dommages causés aux éléments intérieurs à ces bâtiments. Plus les dommages intérieurs sont faibles par rapport aux dommages causés aux structures extérieures, plus la résilience sera forte, car ce rapport est censé caractériser l'adaptation des populations face aux risques d'inondation (Pasche & Geisler, 2005).

Dans ce contexte, il est possible de trouver une littérature de plus en plus importante et de plus en plus complète relative à la résilience des bâtiments. Certains documents peuvent même faire office de référence (Environment Agency, 2007). Cette expression regroupe toute une série de stratégies tendant à diminuer les impacts causés par une inondation sur un bâtiment et sur les éléments situés à l'intérieur de ce bâtiment. Les stratégies de résilience des bâtiments se placent dans un paradigme d'acceptation des inondations et des dommages associés. Le déplacement de ces bâtiments (correspondant

à une stratégie d'évitement) se révélant souvent ne pas être viable d'un point de vue économique et social, il est donc nécessaire de les adapter. Ces stratégies concernent aussi bien l'ingénierie que l'architecture du bâtiment, voire même son aménagement intérieur (Fig. 3.10).

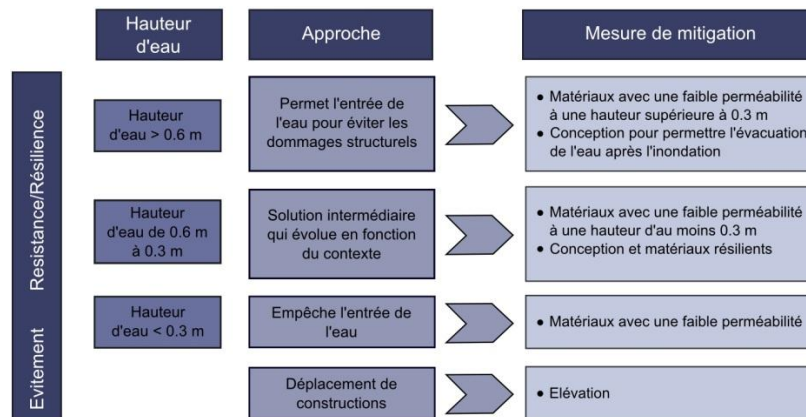


Figure 3.10 : La résilience des bâtiments selon l'Environmental Agency.

Les stratégies contribuant à rendre le bâti résilient se placent dans la continuité des travaux visant à réduire la vulnérabilité des bâtiments, correspondant à des mesures de mitigation. Ainsi, dans ces études, résilience et vulnérabilité sont très souvent considérées comme des antonymes. Il s'agit alors principalement d'appliquer des solutions déjà existantes. La contextualisation de ces solutions est très importante, car il n'existe pas un unique bâtiment résilient. La résilience des bâtiments est ainsi fonction des perturbations auxquelles ceux-ci doivent faire face. Il est alors nécessaire de tenir compte des hauteurs d'eau, des débits, des fréquences et des durées.

Il existe deux grandes familles de stratégies de résilience concernant les bâtiments. La première consiste à lutter contre l'intrusion de l'eau dans le bâtiment, la seconde tolère, voire recommande, l'intrusion de l'eau afin d'éviter de trop gros dommages sur la structure du bâtiment. La première grande famille de stratégies regroupe la construction de murs tout autour de la propriété pour faire face à l'inondation ou éventuellement la mise en place de batardeau. Ces techniques sont actuellement critiquées car elles restreignent l'espace que l'eau pourrait occuper sans ces dispositifs. Elles ont donc pour conséquence d'augmenter les hauteurs d'eau et les débits en aval. Seront alors privilégiées les constructions de murs étanches, correspondant à une « étanchéification » externe du bâtiment (dry waterproofing). La deuxième grande famille de stratégies nécessite l'adaptation de l'aménagement intérieur du bâtiment pour éviter le contact avec l'eau (rehaussement des prises électriques, « mobilier mobile »...), ou pour permettre le contact avec l'eau (mise en place d'une « étanchéification » interne, le wet waterproofing).

Dans ces bâtiments résilients, qui peuvent être inondés, les points de branchement avec les réseaux techniques sont particulièrement sensibles. Ainsi, des listes de recommandations existent afin de protéger au mieux ces points sensibles : pour le réseau électrique, les prises doivent être situées hors d'eau, de même que les tableaux

électriques ; pour le réseau d'assainissement, la pose de clapets anti-retour, doit permettre d'éviter l'inondation de l'habitat par les canalisations d'eau...

3.2.2 La résilience à l'échelle du quartier

L'échelle du quartier se révèle être intéressante pour mettre en place de nouvelles politiques d'aménagement. Bien que cette échelle semble moins pertinente que celle du bassin versant pour gérer les risques d'inondation (l'échelle de l'aléa étant désormais bien souvent considérée comme l'échelle de référence des politiques de gestion des risques d'inondation), elle permet néanmoins de tester des pratiques et des techniques innovantes. Ainsi, à l'image des éco-quartiers, des initiatives sont apparues pour mettre en place des quartiers résilients.

L'expression de « quartier résilient » est rarement explicitée de manière claire en faisant appel à une définition reconnue. Néanmoins, cette expression fait référence à des quartiers aménagés afin d'appréhender spécifiquement les problématiques de risques. La gestion des risques est alors mise au centre de l'aménagement de ces quartiers. C'est une pratique plutôt rare en matière d'aménagement urbain. La promotion de cette expression, aussi floue soit elle, ne peut apparaître alors que positive concernant la gestion des risques.

L'objectif est de redonner sa place à l'eau au sein de ces quartiers, afin d'une part de sensibiliser les populations à l'existence de cet élément « naturel » et d'autre part de réhabituer les populations aux fluctuations de cet élément naturel. Le principe est alors de ne pas opposer la gestion des inondations à l'urbanisation, mais bien de chercher à concilier l'urbanisation à la gestion des inondations. L'inévitable inondation de certaines zones requiert alors la définition d'un niveau de risque acceptable. Comme il n'est pas possible de gérer l'aléa à cette échelle, la résilience des quartiers nécessite la mise en place de moyens de protection « légers » pour assurer la protection de certains enjeux (Fig. 3.11).

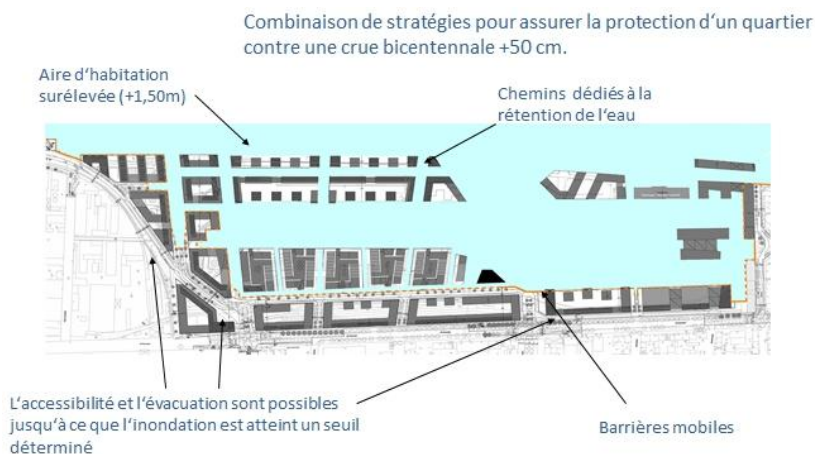


Figure 3.11 : « Quartier résilient » à Francfort, avec la combinaison de stratégies « légères » pour lutter contre les inondations (ex : barrières mobiles) et de stratégies d'assimilation de l'inondation (ex : routes utilisées pour la rétention de l'eau).

Dans la pratique, actuellement, les réseaux techniques ne sont pas toujours centraux dans l'aménagement des quartiers résilients. Et pourtant, un quartier sans eau potable, ni électricité, est un quartier qu'il faut évacuer comme les autres. En quoi est-il alors plus résilient ? Néanmoins, quelques travaux accordent une place centrale aux réseaux techniques. Ainsi, dans certains quartiers, les rues sont amenées à jouer le rôle de cours d'eau, pour pallier au débordement des canalisations en période de crues (www.floodresiliency.eu). Certaines rues font aussi l'objet d'une attention particulière afin de permettre l'évacuation de personnes en danger.

3.2.3 La résilience à l'échelle du bassin versant

Le domaine des risques est sans doute aujourd'hui un des domaines au sein duquel le concept de résilience est le plus polysémique. En effet, selon les sources, la résilience englobera plus ou moins entièrement les différentes phases de la gestion des risques. Ainsi, selon l'acceptation du concept, la manière d'appréhender la résilience à l'échelle du bassin versant sera différente.

Concernant l'étude des catastrophes, la résilience caractérisera la plus ou moins grande capacité des systèmes à se remettre de celles-ci (Vale & Campanella, 2005). La résilience est alors un processus post-catastrophe qui s'évalue *a posteriori*. Dans le même temps, la résilience pourra être considérée comme une stratégie consistant à diminuer les dommages et les pertes consécutives à une perturbation. La résilience comprend alors les mesures de prévention et de mitigation, et intègre les pratiques traditionnelles de la gestion des risques (Mayena, 2006). Cette vision de la résilience se révèle être proche des approches praticiennes adoptées dans les projets de recherche européens (Schelfaut et al., 2011). Ainsi, la résilience d'un système se caractérisera par ses probabilités de défaillances, l'amplitude des conséquences (économiques, sociales...) liées à ces défaillances et le temps de retour à la normale, schématisés par le triangle de Bruneau et al. (2003) (Fig. 3.12). Cette approche de la résilience est donc plus englobante que la précédente.



Figure 3.12 : Le triangle de la résilience (Bruneau et al., 2003 ; Tierney & Bruneau, 2007)

Concernant plus précisément les risques d'inondation, la résilience est généralement envisagée comme une stratégie de gestion à l'échelle du bassin versant. La résilience ne peut alors être définie sans faire référence à une autre stratégie, celle de résistance. Dans ce contexte, la réaction d'un système à une inondation dépend de sa résilience et de sa

résistance (De Bruijn, 2005). En effet, la réponse d'un système face à une inondation peut être envisagée de deux manières (De Bruijn, 2005). Premièrement, cette réponse peut être caractérisée par une absence de réaction, car l'inondation a été annihilée par les systèmes de protection, relevant d'une stratégie de résistance. Deuxièmement, les impacts engendrés par l'inondation nécessitent une réaction (évacuation, reconstruction...), relevant d'une stratégie de résilience (De Bruijn, 2005).

Une stratégie de résistance consiste alors à ne pas être inondé et une stratégie de résilience consiste à se remettre rapidement d'une inondation avec peu de dégâts (De Bruijn, 2005). Tandis que les stratégies de résistance consistent à lutter contre les inondations afin de les supprimer jusqu'à un certain niveau (c'est une stratégie du tout « protection »), ce qui implique la mise en place de mesures structurelles, les stratégies de résilience admettent l'inondation et nécessitent de se préparer à faire face à celle-ci, ce qui implique des mesures structurelles et non-structurelles. Cette position est alors intermédiaire entre celle centrée sur la post-catastrophe et celle plus englobante. Il s'agit de « vivre avec les inondations » (Vis, 2003).

Dans ce cadre, les questions de reconstruction sont souvent abordées pour au moins deux raisons. Premièrement, le concept de résilience repose sur la reconnaissance de l'irréductibilité des risques à zéro. Or, si le risque est admis, il en est de même pour les conséquences qui en découlent. Il devient alors nécessaire de se focaliser sur les conséquences à long terme des impacts et par conséquent sur la phase de reconstruction.

Deuxièmement, le terme de résilience est souvent défini à l'aide du terme difficilement traduisible en français de « recovery ». Bien que la reconstruction (des bâtiments et de tous les éléments matériels) ne soit pas suffisante pour caractériser les phénomènes pouvant être attachés à ce terme, celui-ci y est souvent associé et réduit. En effet, « recover » n'est pas l'équivalent de « rebuilding ». Ainsi, « *la reformation des réseaux sociaux, la réapparition des commerces et services publics essentiels, le réinvestissement des espaces publics et le retissage des liens politiques avec les autorités de la ville semblaient autant d'étapes nécessaires à une reconstruction intégrée et durable des espaces urbains* » (Hernandez, 2010).

Quoi qu'il en soit, la reconstruction a fait l'objet d'études spécifiques récentes et l'émergence du concept de résilience n'y est sans doute pas étrangère. Ainsi, des études mettent en exergue l'importance de certains facteurs dans les processus de reconstruction comme :

- l'importance du voisinage (Wallace & Wallace, 2008) ou autrement dit l'importance des réseaux locaux (Hernandez, 2009) ;
- l'importance des réseaux techniques et des services urbains (Hernandez, 2009) ;
- l'importance de l'éducation (Hernandez, 2009), car dans le cas particulier de la Nouvelle-Orléans, la reconstruction s'est révélée être

un processus complexe où il fallait être capable de comprendre les formalités administratives pour bénéficier des aides.

Ces facteurs de reconstruction contribuent alors à améliorer la résilience des territoires. La reconstruction peut alors être envisagée à différentes échelles, l'échelle du bassin versant étant pertinente pour des catastrophes de grandes ampleurs.

3.2.4 La résilience des communautés

Que ce soit à l'échelle du bâti, du quartier, de la ville, ou du bassin versant, la résilience des communautés (ou des populations) est indispensable pour faire face aux inondations. Ainsi, à chaque échelle étudiée précédemment, il est fait référence à la culture du risque et à la sensibilisation de la population.

Il semble que cette expression caractérise une capacité des populations à faire face aux événements perturbateurs. Plus exactement, des communautés résilientes possèderaient les connaissances qui leur permettraient de minimiser leurs dommages et d'assurer leur sécurité (Boin et al., 2010). Elles auraient aussi accès aux informations permettant de mettre en pratique efficacement ces connaissances. De plus, ces communautés seraient en mesure d'assurer le mieux possible la phase de récupération et éventuellement de reconstruction. L'idéal étant que cette reconstruction soit rapide et permette de mieux gérer les risques à l'avenir.

L'émergence de cette expression peut être interprétée comme la nécessité de rapprocher les populations des politiques de gestion et plus encore comme la nécessité de rendre en partie autonome cette population. C'est pourquoi, le terme de communauté est important, car il n'est pas fait référence à des individus pris isolément, mais bien à un groupe social pouvant s'entraider (Li et al., 2010). Ces communautés se doivent alors d'être diversifiées, car une certaine mixité est nécessaire afin d'avoir une large palette de compétences et de connaissances disponibles au sein de celles-ci.

Pour mettre en pratique la résilience des communautés, il semble nécessaire de travailler sur la sensibilisation des populations afin de contribuer à favoriser la « culture du risque ». Cette construction nécessite de diffuser de l'information en période normale afin de sensibiliser ces communautés, tout comme en période de crise afin que ces populations disposent des informations nécessaires pour pouvoir mettre en pratique ces connaissances (Ashley et al., 2012). Pour cela, il est possible de mettre en place des plans de mise en sûreté et des plans de remise en service au sein des communautés, des familles et des entreprises afin de favoriser l'adaptation et l'indépendance de la population.

Conscients de leur limite, les Etats et leurs collectivités ne peuvent à eux seuls gérer les risques (Vinet, 2010). Ils doivent ainsi se spécialiser dans la gestion des urgences et des événements exceptionnels pour laisser plus d'autonomie aux communautés lorsque celles-ci peuvent faire face. De plus, seules les populations sont à même d'assurer une

adaptation face à des événements difficilement prévisibles. Néanmoins, pour faire face à des inondations, les populations dépendent des politiques de gouvernance et de technologies qui leur sont indispensables. Ainsi, comme les communautés sont devenues extrêmement dépendantes du fonctionnement des réseaux techniques, leur résilience est grandement affectée par le dysfonctionnement de ces infrastructures.

3.2.5 La résilience des infrastructures critiques et des réseaux techniques

La mise en œuvre de politiques de résilience des réseaux techniques, dans un contexte spécifique de risques d'inondation, est rare. Cela est en partie dû au fait que les problématiques liées aux dysfonctionnements de ces infrastructures dépassent le seul cadre des inondations. Plus généralement, il en est de même pour les infrastructures critiques. En effet, les plans stratégiques relatifs aux infrastructures critiques sont nationaux et internationaux (Galland, 2010). Ils sont alors génériques et concernent un large éventail de menaces. Les inondations ne constituent alors qu'un cas particulier parmi d'autres. C'est pourquoi, en pratique, la résilience des infrastructures critiques et des réseaux techniques dépassent, en termes d'échelles, d'acteurs et de moyens politiques, les politiques de gestion des inondations.

La résilience des infrastructures critiques est souvent envisagée comme une stratégie ou comme un ensemble de mesures permettant à ces systèmes sociotechniques de faire face à des événements inattendus. Contrairement à une infrastructure robuste qui pourra encaisser des chocs prévisibles importants sans subir de dommages, mais qui ne pourra pas faire face à des événements inattendus, un système résilient se déformera sans se rompre quels que soient les événements perturbateurs (Théron, 2011) (Fig. 3.13).

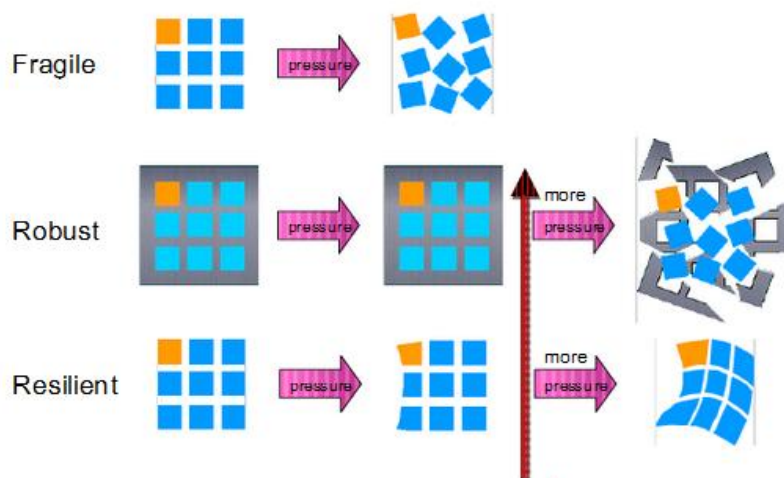


Figure 3.13 : la résilience des infrastructures critiques – plier mais ne pas rompre (Théron, 2011).

De plus, la résilience des infrastructures critiques se focalise sur la gestion des interdépendances entre ces infrastructures (O'Rourke, 2007). Or, compte tenu de la

diversité de ces interdépendances qui peuvent être organisationnelles, techniques, économiques, etc., il semble que la résilience de ces infrastructures se doit d'être aussi bien organisationnelle, que technique, qu'économique... Il en est de même pour les réseaux techniques.

La résilience de ces réseaux techniques constitue alors un enjeu majeur pour la résilience des territoires face aux risques d'inondation.

3.2.6 Un urbanisme résilient aux inondations est-il envisageable ?

Comment passer de la résilience urbaine aux inondations à un urbanisme résilient aux inondations ? La solution la plus simple consiste à faire de l'urbanisme résilient le dispositif de mise en pratique de la résilience urbaine. Ainsi en partant d'indicateurs, de méthodes, de pratiques, de techniques, etc., qui permettent d'améliorer la résilience urbaine, l'urbanisme résilient s'évertuerait à les appliquer. Par exemple, un urbanisme résilient nécessiterait de construire des bâtiments résilients, des infrastructures critiques résilientes, des communautés résilientes, etc., afin de faire face aux inondations.

Cependant, cette approche empirique est confrontée à des problèmes contextuels, car toutes les solutions dépendent du cadre dans lequel elles s'inscrivent. L'urbanisme résilient n'est pas un urbanisme « clef en main », il doit faire face à des défis multi-scalaires. De plus, les questions de risques dépassent les seules problématiques urbanistiques et inversement les problématiques urbanistiques dépassent les seules questions de risques.

Compte tenu des enjeux que représentent les problématiques urbaines dans les sociétés actuelles, il devient urgent de penser un urbanisme capable d'évoluer selon des temporalités différentes mettant ainsi en adéquation les rythmes d'évolution des sociétés, des technologies, de l'économie et des aléas naturels avec le rythme de la ville. Ainsi, « *les plans et les schémas étaient destinés à maîtriser le futur, à réduire l'incertitude, à réaliser un projet d'ensemble* » (Ascher, 2001). Or, la performance et la durabilité s'obtiennent plutôt par la variété, la flexibilité et la réactivité.

C'est pourquoi, « *les solutions uniques et monofonctionnelles, fragiles et peu adaptables font place à des réponses multifonctionnelles et redondantes, plus à même de faire face aux évolutions, à la variété des circonstances, aux dysfonctionnements et aux crises* » (Ascher, 2001). Il semble temps de raisonner en termes de stratégie et non plus en termes de programmation, pour privilégier les démarches heuristiques, itératives, incrémentales et récurrentes. Un urbanisme résilient s'inscrit en tout cas dans ce cadre.

Alors même que la résilience est un concept difficile à appréhender, ce concept est déjà mis en pratique pour faire face aux risques d'inondation. La résilience s'applique alors à différentes échelles – du bâtiment au bassin versant – à l'aide de mesures qui sont extrêmement diverses. Si ces approches contribuent à améliorer la

résilience urbaine face aux inondations, elles intègrent très peu les aspects liés à la résilience des réseaux techniques. Et pourtant, la résilience des bâtiments, des quartiers et des communautés requièrent des réseaux techniques résilients. Paradoxalement, les questions liées à la résilience des réseaux techniques, qui dépassent la seule gestion des risques d'inondation, ne sont pas placées au centre des approches tendant à améliorer la résilience face aux risques d'inondation.

3.3 L'ANALYSE DES RESEAUX TECHNIQUES UN PREALABLE NECESSAIRE A L'ANALYSE DE LA RESILIENCE URBAINE FACE AUX INONDATIONS

« La résilience d'une ville sera jugée à travers différents filtres mentaux, conditionnés à la fois par le type de formation professionnelle et l'attachement personnel à la ville des évaluateurs. Les économistes chercheront la restauration des activités économiques, les planificateurs du secteur des transports mesureront les flux de trafic local et régional, les architectes se préoccuperont de la cicatrization des paysages urbains et de la construction de nouveaux bâtiments et monuments commémoratifs, les psychologues, les religieux et les enseignants évalueront le bien-être émotionnel des populations » (Campanella & Vale, 2005)³. En accord avec ce constat, il ne s'agit pas ici de définir un cadre unique pour analyser la résilience urbaine face aux inondations, mais de proposer une approche alternative aux approches existantes. En particulier, il convient de mettre au centre de cette approche la résilience des réseaux techniques dont l'importance a été soulignée dans les chapitres précédents. Plus précisément, cette approche repose sur un raisonnement qu'il convient de synthétiser.

3.3.1 Définitions

Premièrement, l'approche mise en place repose sur deux définitions.

La résilience : la résilience est définie dans cette recherche comme la capacité d'un système à absorber les perturbations et à récupérer ses fonctions à la suite de ces perturbations.

La résilience urbaine : la résilience urbaine est définie dans cette recherche comme la capacité d'une ville à absorber des perturbations et à récupérer ses fonctions à la suite de ces perturbations.

La résilience est ici considérée sur un temps court. La résilience est alors analysée à partir d'un événement majeur, en l'occurrence une inondation de référence. De plus, cette approche ne vise pas à recenser ou à analyser l'ensemble des endommagements causés par une inondation sur une ville. Elle s'intéresse davantage au fonctionnement de la ville face à ces inondations. Autrement dit, dans cette recherche, la résilience se distingue du

³ Traduction de Julie Hernandez (Hernandez, 2010).

concept de vulnérabilité qui se focalise précisément sur ces endommagements. Résilience et vulnérabilité se placent alors dans un même continuum (Fig. 3.8).

3.3.2 Postulats

➤ *Postulat n°1 : la résilience étudie des systèmes*

Ce postulat découle directement de la définition retenue de la résilience. Cette définition de la résilience s'applique en effet à des systèmes. Dans la majorité des disciplines, la résilience concerne effectivement des systèmes. Ainsi, il est fait couramment référence à la résilience des écosystèmes, des systèmes industriels, des systèmes économiques... Julie Hernandez utilise précisément la résilience dans ce sens : « elle renvoie à une approche systémique qui englobe les multiples couches (le bâti, le social, le politique...) et structures qui permettent de produire une vision intégrée de l'objet urbain » (Hernandez, 2010).

Ce postulat requiert de préciser la définition de la résilience urbaine, car il n'existe pas une unique approche pour étudier un système. Or, en fonction de l'approche adoptée, la définition de la résilience urbaine peut être amenée à évoluer (3.1.3). La ville pouvant être considérée comme un système complexe (De Rosnay, 1975 ; Pumain, 1997 ; Lajoie, 2007 ; Nabaa, 2011), l'approche systémique semble préférable à l'approche analytique. La définition de la résilience urbaine peut alors être précisée.

La résilience urbaine (bis) : la résilience urbaine correspond à la capacité d'une ville à fonctionner malgré la perturbation de certains de ses composants, c'est-à-dire à fonctionner en mode dégradé, puis à remettre en service les composants perturbés de manière à pouvoir retrouver un fonctionnement optimal le plus vite possible et ce en tenant compte des impacts subis afin de les minimiser lors des prochaines perturbations.

➤ *Postulat n°2 : la ville est un système*

Le premier postulat, spécifiant que la résilience s'applique à des systèmes, nécessite de considérer la ville comme un système afin de pouvoir appliquer ce concept à la ville. Il s'agit d'un postulat, en ce sens que ce positionnement ne peut être justifié, la notion de système étant extrêmement vague. Il est néanmoins possible de s'appuyer sur une littérature importante définissant la ville comme un système (De Rosnay, 1975 ; Pumain, 1997 ; Lajoie, 2007 ; Nabaa, 2011). Plus précisément, dans cette recherche, la ville est considérée comme un système sociotechnique (2.2.3). Il convient dès lors de modéliser ce système.

La dynamique des systèmes urbains est fortement liée à l'activité économique (Vilmin, 2008). Ainsi, pour certains, il est difficile de séparer la finalité de conservation de la structure d'un groupe social à l'origine de la création d'une ville et la volonté de conservation de la structure socio-économique du groupe « économiquement » dominant (Laborit, 1971). En effet, l'activité économique, par la création d'emplois qu'elle engendre,

attire la population au cœur du système urbain. L'exode rural, consécutif à la révolution industrielle, est sans doute l'exemple qui illustre le mieux l'importance de l'activité économique concernant le dynamisme d'une ville. Aujourd'hui, cette importance est illustrée par l'attraction qu'une ville économiquement dynamique exerce sur les populations des autres villes. Cependant, cet aspect concurrentiel entre pôles d'emplois souligne l'importance d'autres composants urbains permettant d'accueillir les populations : les logements et les équipements. Ces équipements contribueront notamment à attirer de nouvelles entreprises. Ainsi, il est possible de définir un système circulaire (très simplifié et critiquable) permettant d'analyser les dynamiques urbaines (Fig. 3.14).

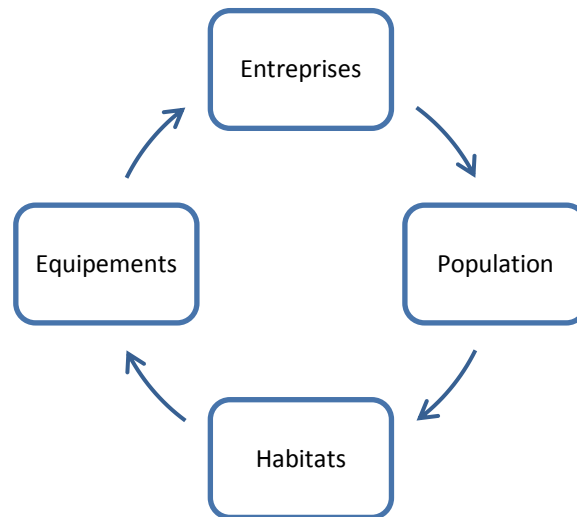


Figure 3.14: Une vision simplifiée des dynamiques urbaines (Lhomme et al., 2010).

Plus précisément, il semble pertinent de décomposer les équipements en deux composants distincts : (1) d'un côté les systèmes techniques (comme les réseaux), (2) de l'autre les infrastructures publiques qui constituent 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 bien l'imbrication des composants urbains (et leurs interrelations autour de son centre décisionnel) qui est à l'origine de sa dynamique. Il est aussi nécessaire de prendre en considération le support sur lequel se développe cette dynamique et y contribue directement : le milieu physique. Le système développé est alors défini à partir de 6 composants en interrelation (Fig. 3.15).

En outre, la ville est considérée comme un système ouvert, c'est-à-dire qu'elle entretient des relations avec son environnement puisqu'elle n'est pas autosuffisante. Il convient donc d'analyser les relations que la ville entretient avec son environnement. Par exemple, les relations « villes – campagnes » sont très importantes et permettent aux villes d'assurer leur 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 alors le deuxième type de relation avec l'environnement du système. Les déchets sont l'une des principales productions de la ville, constituant d'ailleurs un enjeu majeur pour celle-ci. Cette production va mettre en relief une caractéristique de l'analyse systémique : les rétroactions. Ainsi, les déchets peuvent être considérés comme des éléments en sortie du système, mais ceux-ci ne sont pas sans conséquences pour la ville et son environnement. Ces déchets peuvent alors être considérés comme entrant dans le système. Une liste non exhaustive des entrants et des sortants caractérisant les échanges avec l'environnement peut dès lors être établie (Fig. 3.15).

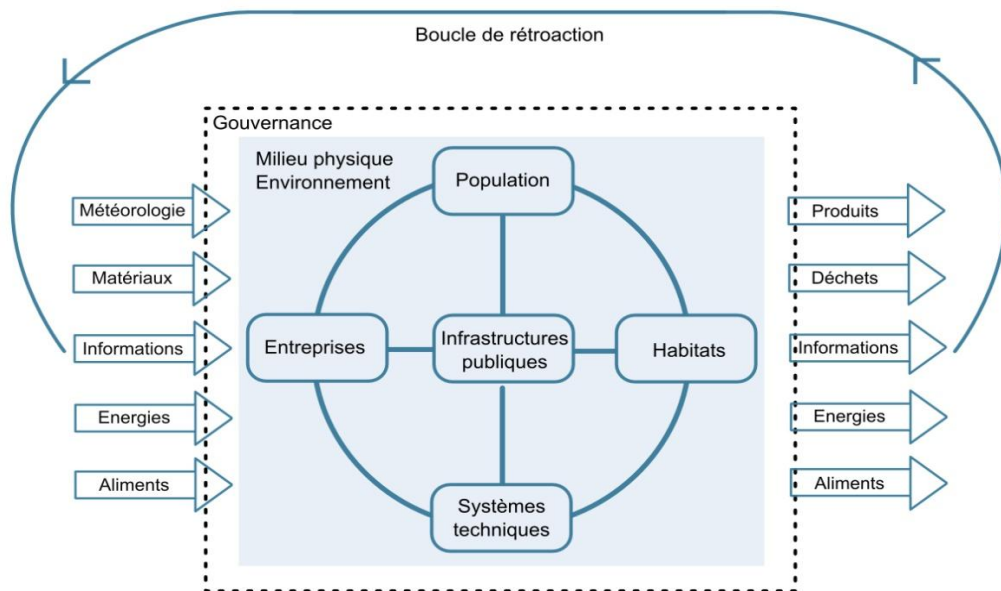


Figure 3.15 : Modélisation systémique simplifiée de la ville (Lhomme et al., 2010).

Enfin, se pose la question de la définition des limites du système. Or ces limites sont difficiles 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 (Fig. 3.15).

Ce modèle systémique se veut simple et ne prétend pas du tout à l'exhaustivité, ni à rendre compte de toute la complexité de l'objet ville. Chaque sous-système (composant) est très générique et d'une grande complexité. Ce modèle a pour unique objectif d'instaurer une réflexion centrée sur la ville dans une recherche concernant les risques d'inondation. Les limites de cette modélisation systémique sont nombreuses. « *Le paradigme structuraliste, à la base de la modélisation systémique, ne suffit pas à rendre compte de ce qui « fait » la ville, dans la mesure où celle-ci n'est pas seulement un ensemble de composantes*

(bâtiments, réseaux, bassin d'emploi, services) organisées de manière interdépendante » (Hernandez, 2009). Néanmoins, cette approche se révèle être opérationnelle.

3.3.3 Hypothèse principale : les réseaux techniques sont les éléments clés de la continuité du fonctionnement de la ville

Dans cette recherche, la ville est considérée comme un système sociotechnique où les réseaux techniques prennent une place centrale (Chapitre 2). Ces réseaux constituent alors le sous-système relationnel du système ville. Ce sont des éléments clés pour le fonctionnement urbain, ce rôle étant particulièrement perceptible dans un contexte de risques. Ainsi, les réseaux techniques se sont révélés être à la fois des éléments critiques et vulnérables face aux inondations (Chapitre 1).

C'est pourquoi, il existe une littérature de plus en plus abondante consacrée à la performance, à la vulnérabilité ou à la robustesse des réseaux techniques. Dans les faits, il semble que les risques liés aux réseaux techniques expliquent, en partie, l'existence des risques à grande échelle caractérisés par : des niveaux de risques qui explosent ; un niveau de diffusion important ; une probabilité d'occurrence incalculable ; des vulnérabilités inconnues (Michel-Kerjan, 2000). « Chaque exemple le montre, les pertes sociales et financières sont de plus en plus importantes, sans doute parce que les réseaux en question regroupent un nombre croissant d'utilisateurs » (Michel-Kerjan, 2000). Erwann Michel-Kerjan fait référence, ci-dessus, à tous les types de réseaux, mais les réseaux techniques sont principalement visés et représentent la majorité des exemples donnés.

Plus précisément, en matière de prévention des risques d'inondation, les réseaux d'énergie et de transport ont été identifiés par les gestionnaires comme l'un des principaux facteurs de l'augmentation de la vulnérabilité de la métropole parisienne (Reghezza, 2006). Le cas francilien montre alors à quel point les réseaux techniques ont pris une place importante dans la vie quotidienne de leurs usagers (Reghezza, 2006). Ces réseaux traduisent de manière tangible la dimension que peuvent prendre les dommages indirects induits par le fonctionnement des territoires (Gleyze, 2005). Le bon fonctionnement des réseaux techniques se révèle alors nécessaire à l'absorption des perturbations afin notamment de limiter les impacts indirects.

Concernant la remise en service et la reconstruction sur le long terme des territoires touchés, les réseaux techniques jouent aussi un rôle important. Par exemple, durant le séisme de Kobe, l'interdépendance des réseaux s'est faite cruellement sentir, les services d'urgence n'ont ainsi pu se coordonner (réseau de télécommunication hors d'usage), ni se déplacer (réseaux de transports hors d'usage) (Michel-Kerjan, 2000). Les Retours d'EXpérience mettent presque toujours en exergue les perturbations provoquées par les réseaux techniques sur la gestion de crise (Chapitre 1). Ces réseaux conditionnent alors en partie un retour à la normale rapide. Des travaux ont ainsi insisté sur leur importance dans les processus de reconstruction. Les réseaux sont alors des éléments primordiaux pour la récupération du système urbain.

Sur les territoires, « on l'aura bien compris, l'utilisation grandissante des réseaux change totalement les données » (Michel-Kerjan, 2000), que ce soit en termes d'absorption et de récupération des perturbations, c'est-à-dire concernant les deux composantes de la résilience. D'un point de vue purement systémique et fonctionnel, comme l'existence et la persistance d'un système requièrent la persistance des relations entre ses sous-systèmes, la persistance d'une ville requiert la persistance de ses réseaux techniques (Fig. 3.16).

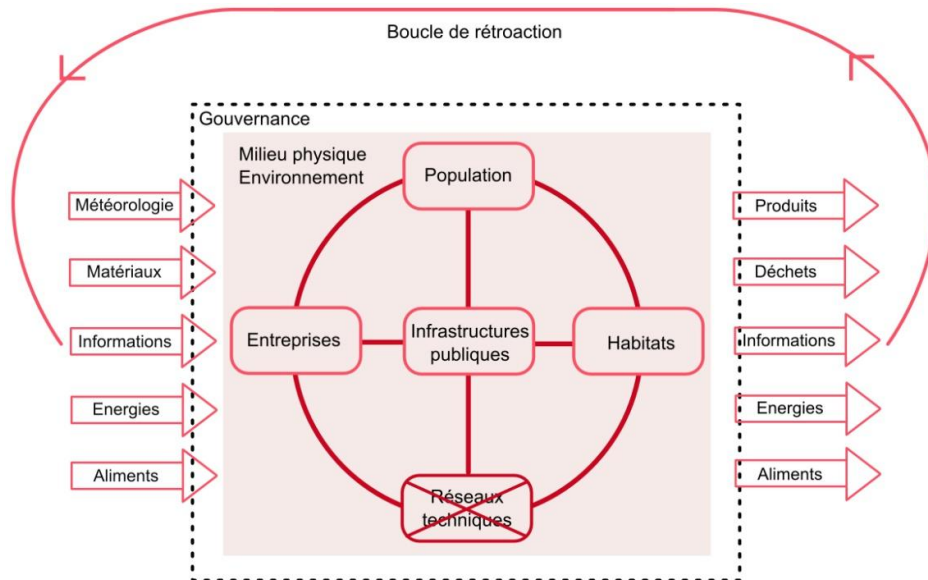


Figure 3.16 : Modélisation systémique simplifiée de la ville en période de crue.

Pour conclure, d'après l'hypothèse posée, les réseaux techniques apparaissent comme les éléments principaux à prendre en considération en matière d'analyse de la résilience urbaine face aux inondations. Néanmoins, il convient de préciser que si l'analyse de la résilience des réseaux techniques constitue un préalable nécessaire à l'analyse de la résilience urbaine, cette seule analyse n'est pas suffisante pour analyser la résilience urbaine. En effet, l'analyse des réseaux techniques ne peut à elle seule rendre compte de toute la complexité du fonctionnement urbain, ni des multiples représentations attachées à la ville.

3.3.4 Proposition d'une approche simplifiée et générale d'analyse de la résilience urbaine

Partant d'une définition du concept de résilience, pour analyser la résilience urbaine, il se révèle nécessaire de postuler que la ville est un système. Puis, afin d'être en mesure de déterminer ce à quoi correspond « absorber » et « récupérer » pour un système urbain, il est nécessaire d'émettre des hypothèses sur le fonctionnement de ce système. L'hypothèse émise dans cette recherche est alors la suivante : les réseaux techniques apparaissent comme les éléments clés de la continuité du fonctionnement de la ville, car ils permettent la mise en relation de l'ensemble des composants urbains.

C'est pourquoi, il semble dans un premier temps nécessaire d'analyser la résilience des réseaux techniques avant d'analyser la résilience urbaine. Ainsi, l'approche générale retenue pour analyser de la résilience urbaine repose sur une analyse préalable de la résilience des réseaux techniques. Un focus sur les réseaux techniques n'empêche pas d'analyser, par la suite, plus généralement le système urbain, en étudiant par exemple les enjeux majeurs des autres sous-systèmes (Fig. 3.17). C'est alors la mise en relation des informations liées aux réseaux techniques et aux autres enjeux majeurs urbains qui permettrait de déterminer la résilience urbaine.

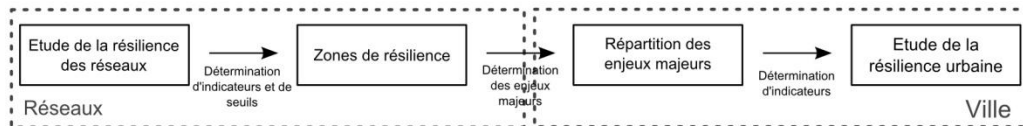


Figure 3.17 : Approche générale d'analyse de la résilience urbaine face aux inondations.

Dans un premier temps, l'analyse de la résilience des réseaux techniques doit permettre de déterminer des zones plus ou moins résilientes (du point de vue de leurs réseaux). Dans un deuxième temps, l'analyse de la répartition des enjeux majeurs (autres que les réseaux) au sein de ces zones donnera des indications sur la résilience de la ville analysée. Dans ce cadre, l'amélioration de la résilience urbaine passe par l'amélioration de la résilience des réseaux techniques.

L'approche générale d'analyse de la résilience urbaine face aux inondations repose sur une démarche scientifique qui considère la ville comme un système complexe. Dans ce système, les réseaux techniques se révèlent être le support des relations entre les différents composants du système urbain (entreprises, habitants, productions...). Ipso facto la rupture de ces réseaux implique l'isolation de certains composants et par conséquent une remise en question du fonctionnement du système urbain. On en déduit que ces réseaux jouent un rôle essentiel dans les mécanismes de diffusion du risque (entre les différents composants urbains) et dans les mécanismes de remise en service du système urbain. Cette hypothèse semble être corroborée par les résultats de certains retours d'expérience post-catastrophe et par l'analyse des impacts engendrés par les dysfonctionnements des réseaux techniques. C'est pourquoi, l'approche générale d'analyse de la résilience urbaine face aux risques d'inondation propose de s'appuyer sur une analyse préalable de la résilience des réseaux techniques.

3.4 SYNTHÈSE DU CHAPITRE 3

Ce chapitre conclut que pour analyser la résilience urbaine face aux inondations, il est au préalable nécessaire d'analyser la résilience des réseaux techniques. L'analyse de la résilience des réseaux techniques constitue même un préalable nécessaire, mais non

suffisant, à la mise en place de politiques d'amélioration de la résilience urbaine face aux inondations. Cette approche constitue alors une alternative à des approches davantage focalisées sur la résilience des bâtiments ou des communautés.

Cette conclusion se place dans la continuité des raisonnements menés dans le deuxième chapitre, au sein duquel, les réseaux techniques sont considérés comme des éléments clés du fonctionnement urbain. Ainsi, l'existence et la persistance du système « ville » sont subordonnées à l'existence et à la persistance du fonctionnement des réseaux techniques. De plus, en reprenant les conclusions issues du premier chapitre, l'enjeu semble de taille. En effet, la vulnérabilité de ces réseaux techniques aux inondations est avérée. Il est donc nécessaire de développer des méthodologies permettant d'analyser la résilience des réseaux techniques.

De surcroît, il ne faut pas négliger l'importance de l'analyse épistémologique de la résilience dans ces réflexions. En effet, la résilience apparaît comme un concept polysémique et pluridisciplinaire difficile à appréhender. Néanmoins, l'émergence du concept de résilience dans les cindyniques peut être considérée comme une opportunité pour repenser le cadre théorique du risque. D'ailleurs, un nouveau cadre théorique a été proposé à cet effet. Quoi qu'il en soit, une certitude émerge de cette analyse : la résilience étudie des systèmes (des écosystèmes, des systèmes économiques, des systèmes sociaux...). Pour appliquer le concept de résilience à la ville, il est donc nécessaire de considérer la ville comme un système. Or, les réseaux techniques se révèlent centraux pour le bon fonctionnement urbain lorsque la ville est considérée comme un système.

L'objectif de cette recherche est donc de développer une méthodologie permettant d'analyser la résilience des réseaux techniques. Cette méthodologie doit de surcroît s'accompagner des outils permettant de la rendre opérationnelle.

Néanmoins, l'analyse de la résilience des réseaux techniques n'est pas suffisante pour analyser la résilience urbaine. C'est pourquoi, afin d'analyser la résilience urbaine, il a été proposé d'analyser la localisation des enjeux majeurs. Quoi qu'il en soit, l'analyse des réseaux techniques ne peut à elle seule rendre compte de toute la complexité du fonctionnement urbain, ni des multiples représentations attachées à la ville.

SYNTHESE DE LA PREMIERE PARTIE

Cette première partie avait pour objectif d'explicitier le postulat adopté sur le rôle des réseaux techniques dans l'amélioration de la résilience urbaine. Pour cela, dans le premier chapitre, la vulnérabilité des réseaux techniques envers les inondations et la « criticité » de ces infrastructures pour les sociétés contemporaines (*i.e.* l'importance de ces infrastructures pour le bon fonctionnement, le maintien de la qualité de vie et la sécurité des sociétés) ont été exposées. Ainsi, les atteintes aux réseaux et les interdépendances entre ces réseaux ont été synthétisées (Tab. 1.5). Ce chapitre, à travers notamment l'analyse empirique des retours d'expérience, justifie alors que des travaux soient spécifiquement consacrés à l'analyse de la résilience des réseaux techniques.

Dans la mesure où les politiques de prévention se focalisent aujourd'hui sur les villes et les espaces de fortes densités, l'analyse des relations entre les villes, les risques et les réseaux techniques a fait l'objet du deuxième chapitre. Il est alors apparu que les réseaux techniques permettent de rendre partiellement compte des relations complexes que les risques entretiennent avec les espaces urbanisés. En effet, dans cette recherche, la ville est considérée comme un système complexe (plus précisément comme un système sociotechnique complexe) où les réseaux techniques prennent une place centrale. C'est alors par les réseaux que se règle (ou se dérègle) le fonctionnement des villes.

Enfin, dans le troisième chapitre, le concept de résilience a fait l'objet d'une analyse épistémologique afin de mieux appréhender la résilience urbaine. Alors même que la résilience fait l'objet de nombreux débats conceptuels dans le domaine académique, ce concept est déjà mis en pratique pour faire face aux inondations. Dans ce cadre, la résilience s'applique à différentes échelles – du bâtiment au bassin versant – avec des mesures qui sont extrêmement diverses. Si ces approches contribuent à améliorer la résilience urbaine face aux inondations, elles intègrent très peu les aspects liés à la résilience des réseaux techniques. Et pourtant, les réseaux techniques se révèlent être le support des relations entre les différents composants du système urbain. *Ipsa facto* la rupture de ces réseaux implique l'isolation de certains composants et par conséquent une remise en question du fonctionnement du système urbain. On en déduit que ces réseaux jouent un rôle essentiel dans les mécanismes de diffusion du risque et dans les mécanismes de remise en service du système urbain.

C'est pourquoi, l'approche générale d'analyse de la résilience urbaine face aux risques d'inondation proposée dans cette recherche repose sur une analyse préalable de la résilience des réseaux techniques. L'analyse de la résilience des réseaux techniques constitue un préalable nécessaire, mais non suffisant (en effet, l'analyse des réseaux techniques ne peut à elle seule rendre compte de toute la complexité du fonctionnement urbain, ni des multiples représentations attachées à la ville), à la mise en place de politiques d'amélioration de la résilience urbaine face aux inondations.

DEUXIEME PARTIE

Analyser la résilience des réseaux techniques : les choix méthodologiques

Cette deuxième partie se concentre sur la méthodologie développée pour analyser la résilience des réseaux techniques ([Chapitre 4](#)). Cette méthodologie nécessite alors de s'intéresser à diverses thématiques de recherche comme : l'analyse structurelle des réseaux techniques ([Chapitre 5](#)), la modélisation des interdépendances entre réseaux techniques ([Chapitre 6](#)) et l'analyse de la remise en service des réseaux techniques ([Chapitre 7](#)).

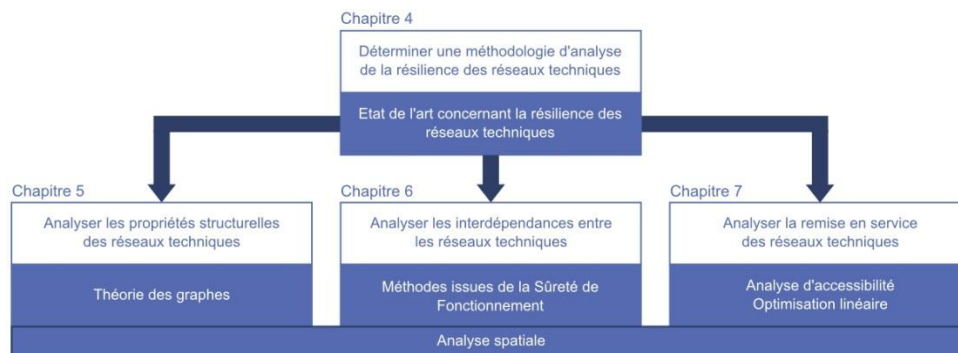


Figure 4 : Plan de la partie 2.

CHAPITRE 4

Méthodologie d'analyse de la résilience des réseaux techniques

L'objectif de ce chapitre est de définir plus précisément comment analyser la résilience des réseaux techniques urbains. Néanmoins, fonder un cadre d'analyse concernant la ville sur l'analyse de ses réseaux techniques n'est pas neutre. En effet, ce positionnement relève d'un urbanisme de réseaux qui rentre dans un certain cadre de pensée : la pensée réticulaire.

En outre, les deux premiers chapitres de cette recherche ont permis de dégager certains traits caractéristiques des réseaux techniques :

- Chapitre 1 – Les réseaux techniques apparaissent à la fois vulnérables aux inondations et critiques pour le fonctionnement des sociétés contemporaines.
- Chapitre 2 – Les réseaux techniques apparaissent comme le sous-système relationnel du système ville permettant de mieux appréhender les relations complexes qu'entretiennent les risques avec les territoires.

Cependant, malgré ces analyses, les réseaux techniques n'ont pas été définis formellement, en ce sens où les considérations théoriques développées jusqu'ici ne tiennent pas compte de la diversité de ces réseaux. Ainsi, seule l'analyse empirique des REX consécutifs à des inondations a pu laisser entrevoir les spécificités propres à chaque réseau technique. Or, compte tenu de cette diversité et de ces spécificités, définir de manière correcte et précise ce à quoi correspond un réseau technique n'est pas chose aisée.

Premièrement, il convient donc dans ce chapitre d'interroger la pensée réticulaire, puis d'exposer les caractéristiques retenues pour définir le plus précisément possible les réseaux techniques analysés dans cette recherche. Deuxièmement, il convient de s'appuyer sur des travaux déjà existants pour définir la méthodologie d'analyse de la résilience urbaine. Ainsi, des listes de critères ont déjà été établies et la modélisation des interdépendances entre ces réseaux techniques apparaît complexe. Enfin, dans un troisième temps, la méthodologie générale peut être introduite. Des choix, qu'il est nécessaire d'explicitier, ont alors été effectués.

4.1 LES RESEAUX TECHNIQUES ANALYSES

La notion de réseau s'est répandue dans de nombreuses disciplines. Cette notion permet ainsi de désigner un nombre important et hétéroclite d'éléments devenant par là même un mot valise. Cette collection hétéroclite d'images n'est en fait pas neutre. Derrière ce terme se cache une idéologie (la rétiologie) où le réseau est réifié (Musso, 2003). Ainsi, l'émergence de certaines innovations importantes, dont internet est l'illustration la plus récente, réactive des discours tendant à magnifier le réseau, en lui prêtant des vertus parfois purement utopiques. Le recours à l'histoire de la notion de réseau est alors nécessaire pour analyser ces discours (Musso, 2003) et comprendre les enthousiasmes et les engouements contemporains pour des termes dont l'usage paraît aller de soi.

« Si la notion de réseau a connu un tel engouement, c'est d'abord parce qu'elle se trouvait en phase avec la technicisation croissante de la société puis, un peu plus tard, avec l'agenda politique de la libéralisation des services... en réseau. C'est aussi par sa réelle valeur heuristique » (Dupuy et Offner, 2005). Ainsi, derrière l'idéologie, le concept de réseau possède une puissance heuristique indéniable, permettant d'une part des analogies intéressantes (bien que parfois problématiques et dangereuses) et d'autre part une représentation graphique du monde certes très simplifiée, mais qui semble être un point de passage obligé pour la compréhension du monde dans toute sa complexité. Ainsi, tel que l'a écrit Lucien Sfez *« un tel concept est bien un concept de passage et acclimate les esprits à cette refonte des éléments traditionnels de la connaissance que sont la causalité et la linéarité, le déterminisme et la non contradiction » (Sfez, 1991).* Pour résumer : *« À dénoncer sans précautions les dangers des métaphores, on risque tout d'abord de jeter le bébé méthodologique avec l'eau du bain paradigmatique » (Dupuy et Offner, 2005).* C'est en étudiant ce « noyau rationnel » qu'il semble possible de définir précisément ce qu'est un réseau technique.

4.1.1 Éléments critiques de la pensée réticulaire : entre imaginaire et rationalité

« La notion de réseau rencontre, nous le savons depuis plusieurs années, une faveur considérable dans les médias. On veut voir des réseaux partout, on veut mettre des réseaux partout. Le territoire, l'entreprise, l'université, la recherche s'organisent en réseaux : appartenir à un réseau semble déjà une nécessité, créer un réseau devient un indice de rayonnement » (Parrochia, 2001). Il n'est donc pas illogique de voir cette notion fortement critiquée ou remise en question, un peu à l'instar du concept de résilience. Ainsi, *« l'omniprésence de la notion de réseau dans les sciences sociales, est plutôt l'indice de sa faiblesse théorique, d'un concept passe-partout, d'une technologie destinée à recoller les morceaux d'une société fragmentée. La figure usée et concept dégradé se rencontrent et fusionnent dans la diffusion commerciale et idéologique de la notion » (Musso, 2003).* D'ailleurs, comme pour la résilience, le réseau est

défini tour à tour comme un concept ou plus simplement comme une notion, voire même comme un paradigme.

Néanmoins, « le mot « réseau », en deçà et au-delà de l'idéologie qu'il véhicule, est un concept scientifique. [...]. De la même manière, aux diverses étapes de développement de sociétés dans l'histoire, on a pu mesurer l'importance des nœuds et des liaisons. Les villages et les villes n'existent que dans les trames où ils s'insèrent : routes et voies ferrées, rivières et canaux, réseaux de transports et d'énergies tissent un ensemble de toiles structurant le territoire » (Parrochia, 2001). En fait, historiquement « l'invention de la notion moderne de réseau passe par le filtre de sa mathématisation, pour l'arracher aux images et à l'imaginaire épais et structurés autour des techniques textiles, et devenir nouvelle technique opérationnelle sur le territoire, grâce à une géométrie appliquée et à la science des ingénieurs » (Musso, 2003).

Les liens entre les sciences géographiques et la notion de réseau sont ténus. Ainsi, les représentations géométriques du territoire se multiplient dès le XVII^e siècle, grâce à la triangulation de l'espace en réseau (Parrochia, 2005). Puis, cette notion de réseau passe progressivement des « géomètres » aux « géographes ». Dès le milieu du XIX^e siècle, une réflexion se développe concernant la distribution des voies de communication et le semis des villes. Elle est le fait d'ingénieurs, comme Reynaut ou Léon Lalanne (Lalanne, 1863). D'Allent, quant à lui, dans son Essai de Reconnaissance Militaire, montre l'importance stratégique des voies de communication et décrit l'espace géographique comme le « double canevas des routes et des eaux » (Parrochia, 2005). Les travaux de Christaller, qui constituent en partie les bases de l'analyse spatiale, consacrent des développements importants aux voies de communication. En effet, c'est par les relations qu'elle établit avec les points qui l'entourent que la ville structure l'espace, la ville implique alors l'existence de voies de communication qui acheminent les flux. Néanmoins, la théorie des lieux centraux fait fi de ces considérations.

Aujourd'hui, le lien entre la géographie et la notion de réseau est devenu si fort, qu'étudier les transformations géographiques du monde, c'est souligner la multiplication des réseaux qui se mettent en place pour faciliter la circulation des hommes, des biens et des idées (Claval, 2005). En fait, la prise en compte progressive des structures en réseaux a modifié profondément la nature de l'enquête géographique. Le passage d'une géographie des formes à une géographie des réseaux marque donc une étape majeure dans le développement de la géographie : celle où l'on passe de la saisie de points, de lignes, de contours et de surfaces aux processus qui les structurent (Claval, 2005). « La prise en compte des réseaux a ainsi contribué de deux manières décisives à la modernisation de la discipline : (i) en lui apprenant à lire, derrière les formes visibles, les réseaux qui les structurent et les flux qui les animent; (ii) en lui montrant qu'entre formes sociales et structures spatiales, des liens étroits existent. Ils ne prennent cependant jamais la forme de rapports de causalité directe : il s'agit de correspondances complexes. La valeur de la géographie tient au rôle qu'elle joue dans leur déchiffrement » (Claval, 2005).

Réciproquement, « un réseau s'identifie à la distribution cohérente et ordonnée d'une pluralité de liaisons dans l'espace » (Parrochia, 2001). Un réseau peut donc être considéré

comme un ensemble dispersé de liaisons (d'autres définitions se focaliseront plutôt sur les lieux ou les sites) localisées à un moment donné dans l'espace géographique. Ce sont alors les distances entre ces éléments disjoints qui nécessitent la mise en place d'un réseau. Ce rapport à l'espace fait émerger une géométrie, une topologie du réseau. Etudier un réseau, c'est premièrement étudier des configurations, des dispositions d'éléments, autrement dit cela revient formellement à étudier un graphe (*i.e.* des points et des lignes situés dans l'espace).

Ces graphes ont une véritable puissance heuristique. Ainsi, ils sont présents dans de nombreux domaines de la vie quotidienne. La recherche opérationnelle s'appuie notamment sur ces modélisations sous forme de graphe pour résoudre des problèmes dits « d'optimisation linéaire ». Or, la recherche opérationnelle connaît – avec le développement de l'informatique qui permet d'implémenter des algorithmes élaborés – un véritable engouement. « *De nombreux et importants problèmes opérationnels se greffent sur ces situations paradigmatiques : constitution d'équipages, rotation de flottes aériennes, problèmes d'affectation ou d'ordonnancement de tâche ou de taxinomie* » (Parrochia, 2001).

Cette puissance heuristique repose sur des outils de formalisation constituant « le noyau rationnel de la notion de réseau. Mathématiquement élaboré dans le courant du XXe siècle, celui-ci se constitue dans le contexte de la théorie des graphes, qui plonge ses racines les plus lointaines dans un travail du mathématicien L. Euler » (Parrochia, 2005). Cependant, il faut lever une ambiguïté, « *mathématiquement parlant, il faut savoir qu'un réseau n'est pas seulement un graphe. Un graphe $G(X, U)$ n'est qu'un ensemble de nœuds (X) reliés par un ensemble d'arêtes ou d'arcs orientés (U), auquel on peut associer différents caractères, eux-mêmes complexes : ainsi sa structure topologique (densité, connexité, cohésion, redondance, centralité, intermédiarité, etc.), ou encore son aspect rhéologique (le mode de circulation des flux qui le caractérise)* » (Parrochia, 2005). Il faut donc se méfier de la quasi symbiose entre la représentation graphique sous forme de graphe et la notion de réseau. « *La représentation graphique ne semble pas apte – sinon par essence du moins en l'état des méthodes – à rendre compte pleinement de la richesse de la notion de réseaux, dans sa dimension heuristique comme dans ses traductions techniques.* » (Offner, 1990).

Pour faire simple, la définition de la notion de réseau repose principalement sur le terme de relation. Ainsi, il n'y a « réseau » que s'il existe au moins une relation, voire une interrelation, entre des éléments disjoints. Or, ces relations peuvent être de natures différentes. C'est pourquoi, cette notion de réseau devient floue. Plus précisément, si ces relations sont intangibles, éphémères ou aspatiales, elles sont le fruit d'une création intuitive (voire purement imaginaire) et elles ne sont plus la traduction d'une réalité physique caractérisée par des liens tangibles, permanents et clairement localisés. Un « réseau social » (que ce soit un réseau de connaissances, d'amis, de collègues...), par essence très versatile, peut alors être mis au même niveau qu'un réseau d'infrastructures linéaires, dont la pérennité est généralement assurée sur une quarantaine d'années, ce dernier étant de surcroît bien ancré au sein des territoires. Il existerait donc bien d'une part un imaginaire lié aux réseaux (qui peut d'ailleurs présenter une pertinence théorique) et d'autre part une réalité des réseaux s'appuyant sur une rationalité certaine.

Cependant, cette distinction est loin de faire l'unanimité : « de notre point de vue, la force de l'idée de réseau est liée à un imaginaire associé aux techniques du réticulé, depuis le dessin du filet jusqu'à ses représentations formalisées [...] dans cet ouvrage, on présentera de façon généalogique, le réseau dans son rapport dialectique aux techniques, producteur en retours d'images et de représentation » (Musso, 2003).

4.1.2 Les réseaux techniques : entre diversité et regroupement rationnel

De la thèse d'Henry Atlan, il découle une conséquence épistémologique majeure pour l'analyse critique des réseaux, à savoir la différence entre les « effets de réseaux » observés sur les organismes naturels, et les réseaux techniques conçus et réalisés par les ingénieurs (Musso, 2003). Ainsi, dans un système naturel, « seuls apparaissent clairement les effets du réseau de communication – arrivées de signaux à l'entrée et émission de signaux à la sortie – sans que l'on ait la moindre idée a priori sur l'organisation du réseau. Tel est la différence fondamentale qui existe entre la position d'un neurophysiologiste qui essaie de déchiffrer le mode de fonctionnement d'un système naturel disposé devant lui, et celle d'un ingénieur qui fabrique un système artificiel et essaie d'en accroître les performances » (Atlan, 1992). Ces réseaux dits techniques sont donc d'origine purement anthropique.

En outre, ces réseaux techniques sont caractérisés par leur rapport au développement et à l'évolution de la ville. « Ces réseaux ont été pensés et conçus comme les instruments d'une autonomisation de la ville par rapport à son environnement. Ils ont opéré la prise en charge de la gestion des flux matériels et immatériels circulant dans la ville : flux de personnes (réseaux de voirie et de transports urbains), de matières (transports, cycle de l'eau, déchets), d'énergies (réseaux de gaz, d'électricité et de chauffage urbain) et d'informations (télécommunications). Hormis le réseau viaire, dont la trame se perd dans la nuit des temps et certaines parties des réseaux d'assainissement héritées de l'époque romaine, l'ensemble des réseaux techniques urbains ont véritablement émergé dans une période d'un siècle (entre le milieu du XIX^{ème} et le milieu du XX^{ème}), soit un intervalle relativement bref au regard de l'histoire urbaine dans le monde occidental » (Prost, 1999).

Les réseaux techniques apparaissent donc facilement identifiables, bien que paradoxalement ceux-ci soient dissimulés. En effet, ce sont les réseaux optimisés par les ingénieurs qui permettent le bon fonctionnement urbain et font ainsi partie intégrante du génie urbain. Ces réseaux seraient alors définis en référence à des listes reconnues et plus ou moins exhaustives.

Par exemple, les quatre familles principales de réseaux techniques sont les réseaux d'eau, d'énergie, de télécommunication et de transport. Des listes plus exhaustives peuvent être établies, chaque réseau pouvant être détaillé (Fig. 4.1).



Figure 4.1 : Liste non formalisée et non exhaustive de réseaux techniques. Du concept de « réseaux techniques » à ses éléments constitutifs, il existe différents niveaux d'abstraction.

Ces listes peuvent être développées en incluant d'autres réseaux comme la collecte et l'évacuation des déchets, les réseaux sanitaires (maisons de retraite, hôpitaux), la distribution des repas dans les établissements recevant du public... L'ensemble de ces services constituent ce qu'il convient de nommer les « réseaux urbains » ou « services urbains », mais ceux-ci peuvent aussi être considérés comme des réseaux techniques urbains. Par exemple, le réseau de gestion des déchets est intéressant à plusieurs titres, car son organisation en réseau, sa gestion par des organismes privés ou semi-publics (dont certains sont gestionnaires de réseaux d'eau potable ou d'assainissement) et ses rapports avec le monde de l'ingénierie (notamment avec le développement récent de l'ingénierie environnemental) incitent parfois à le définir comme un réseau technique.

Dans les faits, il n'existe donc pas une définition formelle reconnue des réseaux techniques. Il serait d'ailleurs difficile de s'hasarder à une définition, car si d'une part le terme de réseau est vague (4.1.1), d'autre part le terme de technique l'est tout autant (Dupuy, 1977). Si l'exemple du réseau de collecte des déchets peut paraître anodin, il met en exergue les diversités existantes entre les différents réseaux techniques. Ainsi, selon certains (MEDD, 2005), les modes d'organisation des réseaux d'assainissement sont plus proches des modes d'organisation des réseaux de collecte des déchets qu'ils ne le sont des modes d'organisation des réseaux de distribution d'électricité (Fig. 4.2).

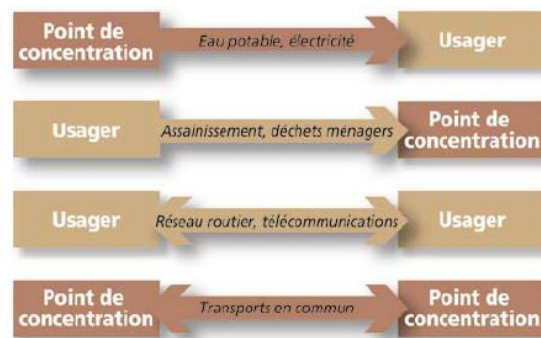


Figure 4.2 : La diversité des réseaux techniques (MEDD, 2005).

Bien que ce rassemblement sous le terme de « réseaux techniques » puisse sembler tout d'abord rationnel, la diversité de ces réseaux interroge cette rationalité.

- Premièrement, les flux transportés par ces réseaux sont de natures très diverses, il n'existe donc aucune unicité à ce niveau. Les modèles rhéologiques sont alors différents.
- Deuxièmement, les modes de transport de ces flux – les moyens de transports : véhicule, pression, gravitation ; les supports : routes, câbles, canalisations... – sont aussi très différents.
- Troisièmement, les modes d'organisation et de fonctionnement peuvent être inversés (Fig. 4.2), les flux allant par exemple des usagers vers les points de concentration ou *a contrario* des points de concentration vers les usagers.
- Quatrièmement, leurs configurations sont diverses. Ainsi, spatialement ils peuvent être enterrés, en surface, ou aériens et topologiquement ils peuvent être maillés ou arborescents.

Dans une même continuité, l'avènement de « nouveaux » réseaux techniques a contribué à diversifier leur nature. Historiquement, les réseaux « techniques » pouvaient être facilement caractérisés, car les liens propres à ces réseaux étaient tangibles et permanents (les routes, les canalisations, les lignes téléphoniques...). Or, aujourd'hui cette singularité tend à disparaître. Par exemple, les réseaux de téléphonie mobile et Wifi, font partie intégrante des réseaux de télécommunication, mais ils ne reposent pas uniquement sur des infrastructures linéaires. En cela, ils peuvent être considérés comme des semis de points, contrairement aux réseaux de téléphonie fixe et aux autres réseaux « historiques ».

De plus, certains réseaux sont en pleine évolution. Le réseau électrique voit ainsi arriver de nouveaux producteurs qui sont aussi consommateurs – la figure 4.2 devient alors fautive – tandis que pour les réseaux d'eaux – dans une perspective de développement durable – des consommateurs tendent à privilégier des modes de gestion plus locaux.

Dans cette recherche, les réseaux techniques sont caractérisés selon des caractéristiques restrictives, afin d'avoir une définition formalisée de la notion de réseau. Premièrement, les réseaux étudiés sont composés entièrement de grands linéaires (des réseaux de type GSM ne sont donc pas pris en compte) et d'éléments plus ponctuels (comme des postes sources), c'est-à-dire d'éléments matériels qui peuvent être en partie réduits à des graphes (au sens mathématique du terme). Deuxièmement, ils sont caractérisés dans l'espace par leur étendue et leur forme (configuration, géométrie), c'est-à-dire par leur propriété topologique. Enfin, ils sont parcourus par des flux qui leur sont singuliers, définissant ainsi leur propriété rhéologique. Un réseau technique est donc caractérisé par au moins trois niveaux – un niveau matériel (les composants constitutifs du réseau : grands linéaires et éléments ponctuels), un niveau structurel (topologie,

configuration du réseau), un niveau fonctionnel (le flux qui se diffuse, la rhéologie) – leur principale particularité étant finalement qu'ils impliquent des infrastructures linéaires matérielles.

Le cadre général de cette recherche n'est pas neutre. En effet, il relève d'un certain cadre de pensée (paradigme) : la pensée réticulaire. Or, l'omniprésence de la notion de réseau, ne s'accompagnant pas toujours d'un cadre théorique solide, interroge sa pertinence. Néanmoins, le réseau possède une puissance heuristique certaine qui s'appuie sur des outils mathématiques comme la théorie des graphes. Témoin de cette dualité, entre d'une part l'imaginaire lié au réseau et d'autre part sa puissance heuristique permettant notamment de résoudre des problématiques de la vie quotidienne, le réseau est alternativement présenté comme une notion ou plutôt comme un concept. Les réseaux techniques, qui constituent en quelque sorte la figure de proue de cette rationalité, ne sont pas pour autant exempts de toute problématique de formalisation. En effet, ces réseaux techniques ne correspondent pas à une classification tout à fait rationnelle. En fait, la notion de réseaux techniques reste plutôt floue, même si ces réseaux peuvent être définis comme les réseaux optimisés par les ingénieurs permettant un bon fonctionnement urbain et faisant ainsi partie intégrante du génie urbain. Cependant, les évolutions récentes de ces différents réseaux perturbent la mise en place d'une définition synthétique précise. Il n'existe donc pas une classification unanimement reconnue des réseaux techniques. Dans cette recherche, les réseaux techniques font l'objet d'une définition restrictive. Ils doivent notamment impliquer des infrastructures linéaires matérielles.

4.2 LA RESILIENCE DES RESEAUX TECHNIQUES

Il semble désormais nécessaire d'analyser plus précisément la résilience des réseaux techniques afin d'être en mesure de définir une méthodologie d'analyse. Pour cela, il convient assez logiquement de s'appuyer sur les travaux existants. Or, une majorité des travaux concernant la résilience des réseaux techniques se place dans la continuité des analyses de risques classiques réalisées depuis les années 1970 pour faire face aux nombreux dangers auxquels ces infrastructures sont soumises. En effet, ces analyses de risques font émerger des connaissances concernant les forces et les faiblesses de ces réseaux. Il est alors possible, à partir de ces analyses, de mettre en place des stratégies permettant d'améliorer la résilience de ces infrastructures et ainsi de renforcer leur niveau de sécurité.

La compréhension de ces analyses est nécessaire afin d'aborder de manière critique les indicateurs et les méthodologies développés en matière d'évaluation de la résilience des réseaux techniques.

4.2.1 Les analyses de risques des réseaux techniques

L'analyse de risques est une pratique courante dans le milieu industriel. Les analyses de risques sont notamment utilisées pour renforcer la sécurité des réseaux techniques. Ces analyses se focalisent alors principalement sur les installations les plus complexes et dont les dysfonctionnements semblent *a priori* les plus problématiques : installations de production d'électricité, installations de traitement des eaux usées... Parmi ces analyses de risques, il est important de distinguer les approches dites « sectorielles » et les approches dites « intersectorielles » ou « multisectorielles ».

➤ Les approches sectorielles

Les travaux sectoriels visent à étudier les risques dans des secteurs particuliers, tels que l'énergie (réseaux électriques, nucléaires, etc.), les transports (aéronautique, aérospatial, etc.)... Dans le milieu industriel, de nombreuses méthodes ont été développées en réaction à des défaillances importantes (Hollnagell et al., 2006). Or, les gestionnaires de certaines installations nécessaires au fonctionnement des réseaux techniques s'appuient sur ces méthodes. Certains gestionnaires ont même contribué à les développer, comme par exemple dans le domaine nucléaire.

Dans ce cadre, le risque est défini comme le produit entre la probabilité d'occurrence d'un événement indésirable, menant à la perturbation de l'installation étudiée, et ses conséquences exprimées par exemple en termes économique (Kaplan & Garrick, 1981). Généralement, l'objectif de ces analyses est de travailler sur des scénarios précis afin d'en déterminer les conséquences économiques. Ces travaux aboutissent souvent à la production de cartes de risques (Robert, 2004 ; Robert & Morabito, 2010). Ils permettent alors d'anticiper et d'identifier des scénarios critiques. Analyser les risques, c'est alors tenter de prédire ce qui va se passer. Ainsi, le risque est défini à l'aide d'un triplet : un scénario (s_i), qui a une certaine probabilité (p_i) et une certaine intensité (x_i). Ainsi, à chaque scénario qu'il convient d'étudier spécifiquement, il peut être attribué une intensité (par exemple une mesure des dommages) et une probabilité (Fig. 4.3).

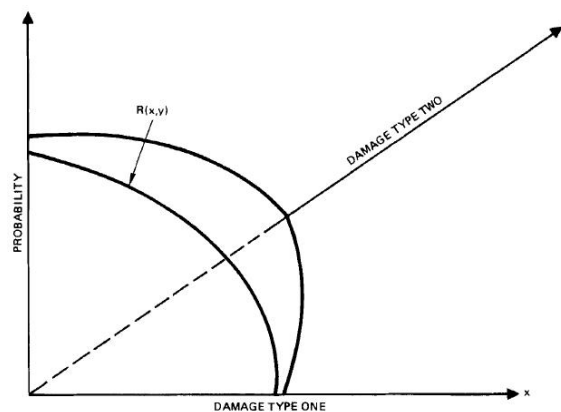


Figure 4.3 : Le risque comme le croisement entre la probabilité d'occurrence d'un scénario et les conséquences de ce scénario (Kaplan & Garrick, 1981).

L'évolution des connaissances en la matière a amené progressivement à complexifier les modèles élaborés en intégrant la question des incertitudes. Il est ainsi possible de différencier deux situations incertaines en utilisant des probabilités. En effet, la détermination des fréquences étant soumise à des incertitudes, il est possible de définir pour chaque fréquence une courbe de probabilité. Le risque n'est alors plus simplement défini par une courbe, mais par un ensemble de courbes auxquelles sont attribuées différentes probabilités (Fig. 4.4).

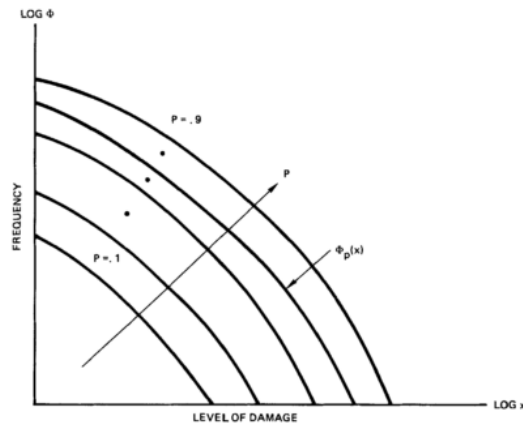


Figure 4.4 : Formalisation de la prise en considération des incertitudes dans les analyses de risques (Kaplan & Garrick, 1981).

Dans ces analyses de risques, la résilience peut être envisagée de deux manières. D'une part, la résilience peut être considérée comme l'ensemble des stratégies mises en place pour diminuer les conséquences des scénarios étudiés. D'autre part, elle peut être envisagée comme un retour à l'état initial après une perturbation (Fig. 4.5). Ainsi, si S_0 représente l'état initial du système, le système parviendra à différents états finaux (ES) selon différents événements initiaux (IE) transitant par le même état intermédiaire (MS). La vulnérabilité du système est alors caractérisée par la trajectoire allant de MS à ES. Le système tendra alors à revenir à son état initial S_0 . La résilience du système est alors caractérisée par la trajectoire allant de MS à S_0 .

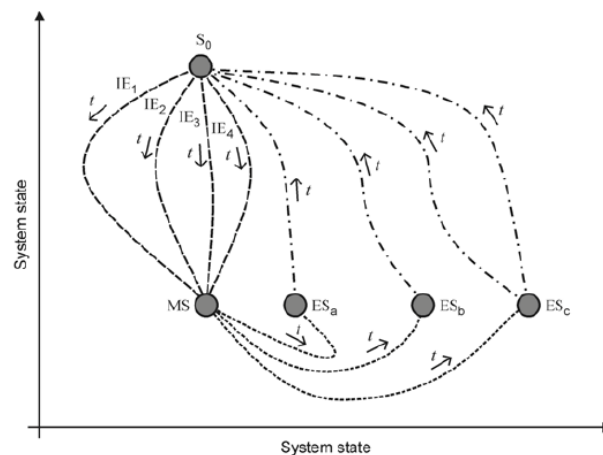


Figure 4.5 : Formalisation du risque fondée sur les travaux de Kaplan (Johansson, 2010).

Compte tenu de la précision recherchée dans ces analyses, celles-ci se focalisent la plupart du temps sur des événements très spécifiques, en l'occurrence sur les événements extrêmes. Les événements étudiés peuvent alors être de différentes natures. Cependant, une attention particulière est portée sur les événements de nature humaine, autrement dit sur les erreurs humaines. En effet, il est possible d'agir afin de diminuer la probabilité d'occurrence de tels événements en mettant en place des barrières ou en automatisant certains processus. Or, la mise en place de ces barrières et l'automatisation de certains processus passent par l'identification des chemins critiques rendue possible par les analyses de risques.

Aussi fines soient-elles, ces approches sectorielles sont très limitées pour analyser les risques des réseaux techniques et par conséquent leur résilience, puisque les interdépendances entre ces différents réseaux ne sont pas prises en compte. De plus, ces analyses se focalisent généralement sur certaines installations et non sur l'intégralité d'un réseau. Enfin, l'importance accordée à l'évaluation des probabilités d'occurrence des scénarios, si elle se révèle pertinente d'un point de vue pratique pour hiérarchiser les actions à entreprendre, conduit néanmoins à négliger les événements dont les probabilités sont difficilement quantifiables ou à se focaliser sur la modélisation des incertitudes. Or, compte tenu de la complexité des mécanismes de défaillances de ces infrastructures, il peut se révéler très vite problématique d'évaluer la probabilité de certains événements.

➤ *Les approches intersectorielles*

Ces travaux se focalisent sur la caractérisation des dépendances et des interdépendances entre différentes infrastructures. Pour cela, les liens existants entre ces infrastructures sont analysés. Compte tenu des interdépendances entre les différents réseaux techniques, ces travaux sont particulièrement intéressants pour analyser leur résilience. Quoi qu'il en soit, les analyses de risques, qui découlent de ces travaux, dépassent le seul cadre des réseaux techniques pour s'intéresser plus généralement aux infrastructures critiques (CI).

Ces travaux ont notamment permis d'établir des typologies d'interdépendances. Ainsi, il est possible de distinguer les interdépendances physiques, les cybers interdépendances, les interdépendances géographiques et les interdépendances logiques (Rinaldi et al., 2001). Dans la lignée de ces travaux, d'autres interdépendances ont été mises en exergue, telles des interdépendances politiques (Dudenhoeffer et al., 2006) ou sociales (Dudenhoeffer et al., 2006 ; De Porcellinis, 2008). D'autres typologies se veulent résolument plus génériques. Ainsi, il est simplement possible de distinguer les interdépendances géographiques (spatiales) et fonctionnelles. Parmi ces interdépendances fonctionnelles, les interdépendances directes (deux CI interdépendantes) et indirectes (deux CI interdépendantes par le biais d'au moins une autre CI) peuvent aussi être distinguées (McNally et al., 2007 ; Johanson & Hansen, 2010).

De plus, l'étude de ces interdépendances a donné naissance à un certain nombre de méthodologies permettant de les modéliser (Ouyang et al., 2011). Il est notamment possible de distinguer deux grandes familles d'approches : les approches prédictives (comme les modélisations issues de la dynamique des systèmes, les systèmes à base d'agents...), et les approches empiriques (comme les analyses de retours d'expérience). Ces deux familles d'approches se complètent, car il est difficile de mettre en place des approches prédictives sans avoir une connaissance empirique d'événements passés (Chap. 6).

Dans les faits, la prise en compte de ces interdépendances nécessite d'interroger la manière dont les infrastructures sont étudiées. En l'occurrence, les infrastructures critiques peuvent être considérées comme des systèmes, c'est-à-dire comme un ensemble de composants (pompes, canalisations...) en interrelation. Compte tenu des interdépendances entre infrastructures critiques, les infrastructures critiques constituent alors un système d'infrastructures critiques (Eusgeld et al., 2011). Il faut ainsi opérer une distinction entre différents niveaux d'analyse (Fig. 4.6) :

- Le niveau élémentaire : l'infrastructure est considérée comme une somme de composants considérés indépendants les uns des autres ;
- Le niveau de l'infrastructure : l'infrastructure est alors considérée comme un système composé d'un ensemble de composants en interrelation ;
- Le niveau des infrastructures : l'infrastructure est considérée en rapport avec d'autres infrastructures ;
- Le niveau du système d'infrastructures : l'infrastructure est considérée comme faisant partie d'un système d'infrastructures critiques en rapport avec son environnement.

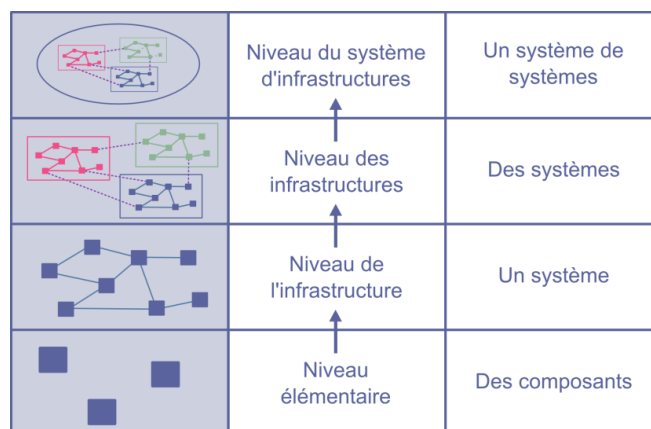


Figure 4.6 : Les différents niveaux d'analyse des infrastructures critiques (Lhomme et al., 2011b).

Pour étudier le système d'infrastructures critiques, il est alors possible d'analyser finement son fonctionnement à partir du niveau élémentaire – en considérant les

composants des infrastructures en interrelation avec les autres composants des infrastructures (Fig. 4.7) – ou plus génériquement au niveau des infrastructures critiques – en considérant les infrastructures en interrelation (Fig. 4.7) - voire même d’opter pour une solution mixte (Eusgeld et al., 2011).

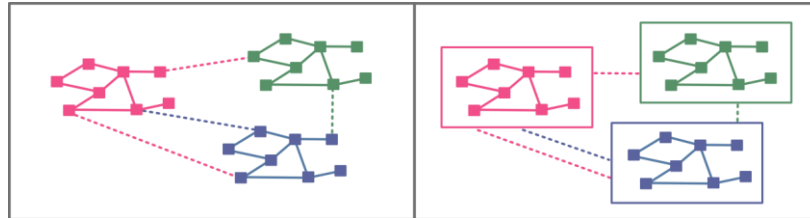


Figure 4.7 : Étude des interdépendances entre infrastructures critiques au niveau élémentaire (à gauche) et plus génériquement au niveau des infrastructures critiques (à droite).

Dans cette première approche multi-scalaire, les infrastructures critiques ont été considérées comme uniquement techniques. Or, il est important de rappeler que ces infrastructures ne sont pas uniquement techniques. Ces interdépendances multi-scalaires nécessitent d’aborder des aspects, par essence, multisectoriels – pour les réseaux techniques on distingue les secteurs de l’énergie, de l’eau, des télécommunications... – ou pouvant être multidisciplinaires – une infrastructure peut être étudiée au niveau de son domaine d’information, de son domaine physique ou de son domaine économique (Fig. 4.8). Ces différents aspects expliquent pourquoi les impacts des défaillances de ces infrastructures critiques dépassent les frontières géographiques, politiques, culturelles et organisationnelles traditionnelles. Concrètement, pour protéger ces infrastructures, il est nécessaire de mettre en place des dispositifs locaux (protection d’un composant précisément localisé) et internationaux impliquant des professionnels de différents domaines.

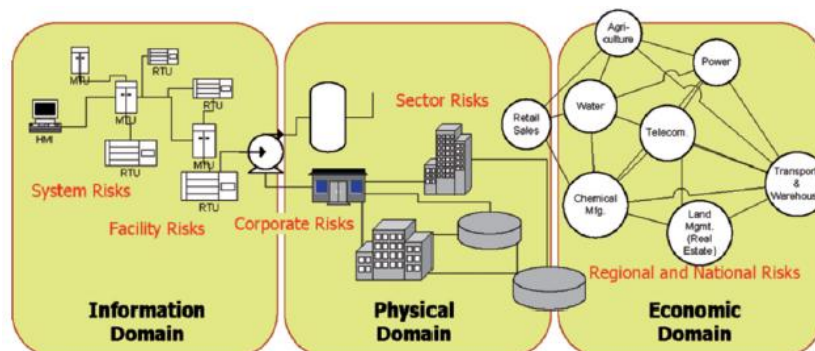


Figure 4.8 : Nécessité d’approcher les différentes interdépendance selon des niveaux différents (Haimes et al., 2005).

L’étude des infrastructures critiques se révèle donc complexe, compte tenu de leur fonctionnement multi-scalaire et multisectoriel induit par leurs interdépendances (Tab. 4.1). De plus, comme ces infrastructures deviennent de plus en plus interdépendantes, ces études deviennent de plus en plus complexes. C’est pourquoi, ces infrastructures sont

caractérisées par des comportements non-linéaires. Ainsi, de petits événements (entraînant notamment de petits changements dans le fonctionnement du système) peuvent avoir des conséquences importantes.

Problématique	Description cursive
Echelle temporelle	Les dynamiques des infrastructures varient énormément : de la milliseconde (pour perturber un réseau électrique) à des décennies (pour construire une nouvelle infrastructure).
Echelle spatiale	Les échelles spatiales se déclinent du composant élémentaire (au niveau technique) à l'échelle internationale (au niveau économique ou politique).
Comportement non linéaire	La défaillance d'un composant peut engendrer un dysfonctionnement important de l'ensemble de l'infrastructure, c'est-à-dire des effets dominos, des défaillances en chaîne ou en cascade.
Social	Ces infrastructures sont des systèmes sociotechniques, leur fonctionnement dépend donc fortement de facteurs humains.
Gouvernance	Les gouvernements par leurs décisions vont fortement influencer le fonctionnement des infrastructures.
Economique	Les politiques de marchés dans lesquelles sont majoritairement impliquées ces infrastructures influent directement sur leur fonctionnement. Cette problématique pose la question de leur mission de service public alors même que ces infrastructures sont généralement privées.
Organisationnel	Que ce soit en période « normale », de crise ou de remise en service, les procédures mises en place au sein de l'infrastructure vont profondément influencer sur son fonctionnement.

Tableau 4.1 : Vision holistique des problématiques concernant l'analyse des infrastructures critiques (adapté de : [Rinaldi, 2004](#)).

Cette complexité croissante est « logique ». En effet, chaque innovation technique s'accompagne de nouvelles vulnérabilités, notamment liées à l'introduction de ces innovations ([Hellstrom, 2007](#)), généralement peu prises en compte devant les avantages que ces innovations peuvent représenter. Or, dans un monde fondant en partie son développement sur l'innovation, ces vulnérabilités sous-jacentes s'accumulent.

Ces travaux sur les infrastructures critiques, qui formalisent les connaissances concernant les interdépendances et contribuent dans le même temps à améliorer les analyses de risques multisectorielles, illustrent la difficulté de mettre en place des approches intersectorielles. Ainsi, la prise en compte des interdépendances se révèle complexe. De plus, compte tenu des nombreuses problématiques soulevées par l'analyse des infrastructures critiques, le traitement holistique de ces infrastructures dans un

contexte de risques semble utopique. Il convient alors de faire des choix qui limitent ces approches multisectorielles à certains aspects particuliers. Ces réflexions se révèlent particulièrement vraies pour les analyses de risques des réseaux techniques.

4.2.2 Les facteurs de résilience des réseaux techniques

Parallèlement à ces analyses de risques, conduisant à se focaliser sur les interdépendances entre les différents réseaux techniques, des travaux cherchent spécifiquement à déterminer des indicateurs permettant d'évaluer la résilience des réseaux techniques. Ces travaux sont particulièrement intéressants pour deux raisons. Premièrement, ils vont permettre d'analyser comment la résilience des réseaux techniques est définie. Ces définitions peuvent alors être comparées à celle retenue dans cette recherche. Deuxièmement, ces travaux vont permettre d'identifier les facteurs de résilience de ces réseaux. Ces facteurs pourront alors servir à élaborer la méthodologie d'analyse de la résilience des réseaux techniques.

Ces travaux sont très diversifiés. Ils peuvent être d'ordre économique, technique, organisationnel... Des approches tentent même de synthétiser ces différents aspects. En outre, certains travaux se focalisent sur la détermination d'indicateurs propres à un réseau, tandis que d'autres adoptent des approches plus génériques. De surcroît, certains travaux pouvant s'apparenter à des analyses de résilience ne font pas explicitement référence à ce concept. En effet, d'autres notions peuvent être privilégiées comme celles de robustesse, de redondance, de restauration... Or, ces notions peuvent être considérées comme faisant partie intégrante de la résilience (Bruneau et al., 2003). C'est pourquoi, cet état de l'art peut difficilement être exhaustif. Il se limite donc aux travaux faisant littéralement référence au concept de résilience et centrant alors leurs recherches autour de ce concept.

Il n'existe pas dans la littérature une unique définition de la résilience des réseaux techniques. D'ailleurs dans un même domaine les définitions peuvent diverger. Par exemple, en ce qui concerne les réseaux de transport, la résilience peut être définie comme (Serulle, 2010) :

- la capacité d'un système à maintenir son niveau de service (normal) ou à se remettre à ce niveau dans un délai limité (Heaslip et al., 2009) ;
- une caractéristique qui permet à un système de compenser les défaillances, permettant ainsi à celui-ci de continuer à fonctionner même lorsque l'infrastructure est endommagée ou détruite (Battelle, 2007) ;
- la capacité d'un système à s'adapter à des conditions variables et inattendues et ce sans défaillance catastrophique (VTPI, 2008) ;

- la capacité d'un système à absorber les conséquences des perturbations, de réduire les impacts de ces perturbations et de maintenir la mobilité des marchandises (Ta et al., 2009).

Ces définitions insistent sur deux aspects. Premièrement, elles insistent sur les capacités des réseaux à continuer à fonctionner en mode dégradé, c'est-à-dire à continuer à fonctionner malgré l'endommagement ou le dysfonctionnement de certains composants de ces réseaux. Le réseau est ainsi en mesure d'assurer un service presque normal malgré des perturbations. Deuxièmement, elles insistent aussi sur la capacité du réseau (il faut comprendre ici le terme réseau au sens large, c'est-à-dire à la fois comme l'infrastructure technique, mais aussi comme le système sociotechnique qui permet son fonctionnement) à se remettre (le plus rapidement possible) de ces perturbations. Le réseau doit être en mesure de revenir à un état de service « normal » si celui-ci a été dégradé, ou de restaurer les composants qui ont pu être endommagés. Ces deux aspects correspondent exactement à la définition de la résilience retenue dans cette thèse, correspondant d'une part à la capacité d'absorption du réseau et d'autre part à la capacité de récupération de celui-ci.

A partir de ces définitions, il est possible de définir différents facteurs de résilience des réseaux techniques. Ainsi, pas moins de dix facteurs ont pu être énumérés (Murray-Tuite, 2006) :

- la redondance ;
- la diversité ;
- l'efficacité ;
- l'autonomie des composants ;
- la résistance ;
- la collaboration ;
- l'adaptabilité ;
- la mobilité ;
- la sécurité ;
- la capacité à récupérer rapidement.

Les indicateurs de résilience des réseaux techniques sont très souvent fondés sur ces facteurs de résilience. Une des possibilités pour évaluer la résilience des réseaux techniques consiste alors à chercher des indicateurs quantitatifs pour chaque facteur, puis éventuellement à agréger les résultats afin d'obtenir une note synthétique. Or, toute la difficulté est de définir ces indicateurs, l'agrégation étant de surcroît une problématique majeure. En dehors de l'étude des réseaux techniques, de nombreuses recherches proposent ce type d'approches. Par exemple, il a été proposé de combiner les concepts de résilience et de vulnérabilité pour déterminer la résilience et la vulnérabilité sociale face au changement climatique, 17 indicateurs quantitatifs ont alors été définis (Brenkert & Malone, 2004). Compte tenu des différents niveaux (économique, technique,

organisationnel...) caractérisant les réseaux techniques, ces approches ne peuvent être édulcorées et des approches plus normalisées pourraient même se révéler pertinentes (RTF-URR, 2008).

C'est pourquoi, à l'aide d'un formalisme plus mathématique – en l'occurrence issu de la logique floue – de telles approches ont effectivement vu le jour afin d'étudier la résilience des réseaux techniques (Serulle, 2010). Huit variables et leur métrique ont ainsi été retenus afin d'évaluer la résilience d'un réseau de transport :

- le niveau de service ;
- la densité du réseau ;
- la moyenne des retards ;
- la moyenne des réductions de vitesses ;
- le coût personnel du transport ;
- le coût industriel/commercial du transport ;
- les infrastructures alternatives ;
- le niveau d'intermodalité et le management du réseau.

La résilience d'un réseau de transport dépend alors d'une part de la disponibilité du réseau et de son accessibilité (*i.e.* de la résilience « intrinsèque » du réseau) et d'autre part de la perception des utilisateurs et du coût du transport (*i.e.* de la résilience des utilisateurs) (Serulle, 2010). Néanmoins, de facteurs en sous-facteurs, la résilience peut très vite devenir un concept inopérant tant il recouvre des problématiques diverses et variées. En effet, ces approches, pouvant être qualifiées d'analytique, peuvent être en contradiction avec l'essence systémique du concept de résilience.

Certaines recherches se focalisent plus particulièrement sur un facteur de résilience et cherchent à l'évaluer. Par exemple, des recherches se concentrent spécifiquement sur l'évaluation de la redondance des réseaux techniques (Batelle, 2007). La redondance apparaît alors comme une propriété difficile à évaluer car elle dépend de nombreux facteurs. Ainsi, concernant les réseaux de distribution d'eau potable, la redondance a été mise en avant comme une caractéristique essentielle (Todini, 2000). L'objectif est alors de déterminer des algorithmes heuristiques permettant pour un réseau d'obtenir la redondance la plus forte malgré de fortes contraintes. En matière de transport, la résilience peut aussi s'opposer à la congestion du trafic. C'est pourquoi, des indicateurs ont été développés afin de déterminer la congestion du trafic, et ce, en tenant compte notamment de la vitesse et des retards des usagers (Hamad & Kikuchi, 2002).

Mathématiquement, la résilience d'un graphe a fait l'objet d'un formalisme récent (Sudakov & Vu, 2008). La résilience d'un graphe correspond au nombre minimum de composants (arcs ou nœuds) à supprimer (ou à rajouter) pour modifier une propriété du graphe. La résilience est alors une caractéristique d'un graphe variant selon les propriétés étudiées. La résilience d'un graphe ne se résume donc pas dans ces recherches à de

simples indicateurs. Néanmoins, un réseau n'est pas seulement un graphe (4.1.1). En cela, ce formalisme ne peut être directement exploité en ce qui concerne la résilience des réseaux techniques.

Enfin, la théorie des graphes est couramment utilisée pour étudier la résilience des réseaux techniques. Un ensemble de travaux concerne notamment l'analyse des forces et des faiblesses des réseaux techniques (autrement dit de leur vulnérabilité et de leur résilience). Ces travaux analysent alors leurs propriétés structurelles (Chap. 5). Par exemple, des indicateurs ont été développés afin d'évaluer la redondance des réseaux techniques (Duenas-Osorio, 2005). Des indicateurs évaluant la vulnérabilité de ces réseaux à leurs interdépendances ont aussi été développés (Duenas-Osorio, 2005).

Les recherches consacrées à la résilience des réseaux techniques permettent de faire émerger des facteurs de résilience et des indicateurs. En se fondant sur ces facteurs, de nombreux travaux concernant les réseaux techniques peuvent s'apparenter à des analyses de résilience. Les analyses retenues dans cette recherche – faisant littéralement référence au terme de résilience – présentent notamment la redondance comme un des principaux facteurs de résilience. Parallèlement à la définition de ces facteurs, ces travaux proposent des méthodologies permettant d'analyser la résilience de ces réseaux. Ces méthodologies reposent principalement sur l'évaluation et l'agrégation de ces facteurs de résilience. Néanmoins, les réseaux techniques sont des infrastructures critiques par excellence. Les interdépendances entre les réseaux techniques constituent donc une de leurs caractéristiques principales. Ces interdépendances sont de natures très diverses rendant par là même l'analyse des réseaux techniques complexe. Or, les recherches consacrées à la résilience des réseaux techniques mettent souvent de côté ces aspects, privilégiant les approches sectorielles. De plus, ces interdépendances rendent les agrégations évoquées ci-dessus très problématiques.

4.3 UNE METHODOLOGIE D'ANALYSE DE LA RESILIENCE DES RESEAUX TECHNIQUES

S'il existe des listes d'indicateurs permettant d'évaluer la résilience des différents réseaux techniques, il semble que le corpus le plus pertinent pour analyser la résilience des réseaux techniques provienne essentiellement des études concernant les infrastructures critiques. Des méthodologies et des outils ont été développés dans ce cadre (Ouyang et al., 2012). Néanmoins, ces méthodologies apparaissent souvent trop générales et ne tiennent pas compte des spécificités des réseaux techniques. *A contrario*, elles peuvent aussi apparaître parfois très sectorielles et par conséquent très spécifiques. De plus, ces méthodologies ne reposent pas nécessairement sur un cadre d'analyse construit à partir et autour d'une définition clairement formulée du concept de résilience.

Ces méthodologies traitent souvent ces infrastructures dans un contexte général de risques.

L'objectif de cette partie est donc de définir une nouvelle méthodologie d'analyse de la résilience des réseaux techniques. Pour cela, il est proposé de s'appuyer sur la définition retenue de la résilience. A partir des propositions faites, de nouvelles perspectives de recherche ont alors émergé.

4.3.1 Analyser les capacités de résistance, d'absorption et de récupération des réseaux techniques

La définition de la résilience retenue dans cette recherche met en exergue deux capacités apparaissant nécessaires pour analyser la résilience d'un système : sa capacité d'absorption et sa capacité de récupération. Il en est donc de même pour la résilience des réseaux techniques. Tout l'enjeu est alors de définir d'une part ce qui permet d'analyser l'absorption d'un réseau technique et d'autre part ce qui permet d'analyser la récupération de celui-ci.

L'absorption d'un réseau technique correspond à sa capacité à fonctionner en dépit d'événements perturbateurs (inondations, tempêtes, dysfonctionnements contingents, malveillances...). Pour cela, un réseau se doit de ne pas être trop fragile, afin de ne pas voir toutes ses installations défaillir (ce qui correspond à une capacité de résistance du réseau). De plus, dans ce cadre, un réseau doit être en mesure de pouvoir faire face à des défaillances lorsque des composants sont amenés à défaillir. Ainsi, un réseau résilient doit être en mesure de réorienter les flux circulant dans le réseau afin de pallier ces défaillances et de maintenir un certain niveau de fonctionnement. C'est notamment à ce niveau qu'intervient un facteur couramment cité en matière de résilience des réseaux techniques : la redondance. De fait, plus un réseau sera redondant, plus celui-ci sera en mesure de faire face à des perturbations.

La récupération d'un réseau technique correspond à sa capacité à remettre en service des composants défaillants. Cette récupération peut correspondre tout simplement au temps nécessaire à la remise en service des composants endommagés afin que le réseau retrouve un service normal. Ici, des aspects purement techniques sont conjugués à des aspects organisationnels. En effet, la remise en service d'un réseau nécessite bien souvent des interventions *in situ* qui requièrent une gestion de moyens humains (Cagnan et al., 2004). Cette capacité de récupération est plus ou moins fonction de l'endommagement du réseau (correspondant à une capacité de résistance), puisque plus un réseau est endommagé, plus il sera difficile de remettre en service l'ensemble des composants endommagés. Ainsi, des deux capacités précédemment citées pour analyser la résilience des réseaux techniques, une troisième capacité émerge : la capacité de résistance.

Pour résumer, trois capacités apparaissent fondamentales pour analyser la résilience des réseaux techniques (Lhomme et al., 2010) :

- **La capacité de résistance** : il est question ici de déterminer les endommagements matériels des réseaux consécutifs à un scénario donné (en l'occurrence une inondation) (Fig. 4.9). Ainsi, plus un réseau est endommagé, plus celui-ci aura une probabilité forte de dysfonctionner et plus il sera difficile de le remettre en service. Il est alors pertinent d'analyser les effets de ces endommagements sur les réseaux afin d'identifier les parties des réseaux qui dysfonctionnent. En ce qui concerne les endommagements des réseaux, les questionnements soulevés concernent principalement l'analyse de risques. Pour ce qui a trait aux dysfonctionnements des réseaux, les questionnements soulevés concernent principalement l'analyse de réseaux.
- **La capacité d'absorption** : il s'agit d'analyser les forces et les faiblesses liées à la configuration des réseaux. Plus précisément, il convient ici d'analyser les alternatives pouvant être offertes par les réseaux suite à la défaillance d'un ou de plusieurs de leurs composants (Fig. 4.9). Autrement dit, il s'agit de caractériser leur redondance. En effet, ce sont ces alternatives qui permettent la continuité du service et le fonctionnement des réseaux en mode dégradé. Dans ce cadre, les réseaux peuvent être analysés indépendamment d'un scénario initial, puisque la redondance est une propriété structurelle (Duenas-Osario, 2005). Les questionnements soulevés concernent ici principalement de l'analyse de réseaux.
- **La capacité de récupération** : la récupération est une capacité essentielle pour la résilience d'un système. Cette capacité requiert notamment d'analyser l'accessibilité des composants pouvant être endommagés vis-à-vis des services qui sont en charge de la remise en état des réseaux (Fig. 4.9). Plus l'accessibilité aux endommagements sera bonne plus la remise en service sera facilitée (Cagnan et al., 2004). Les questionnements soulevés concernent ici principalement de l'analyse spatiale.

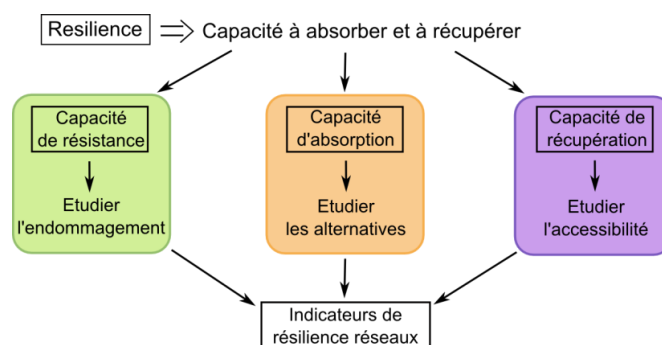


Figure 4.9 : Les capacités à étudier pour analyser la résilience des réseaux techniques (Lhomme et al., 2010).

Si ces trois capacités peuvent être présentées plus ou moins distinctement et si les méthodes utilisées pour les analyser peuvent être différentes – l'analyse de risques pour les capacités de résistance, l'analyse de réseaux pour les capacités d'absorption, l'analyse spatiale pour les capacités de récupération – elles sont loin d'être indépendantes les unes des autres (Fig. 4.10). Par exemple, (en théorie) bien que de mauvaises capacités de résistance puissent être atténuées par de bonnes capacités de récupération, (en pratique) dès que le nombre de composants endommagés est élevé, une remise en service rapide est difficilement envisageable. Dans les faits, toutes ces capacités sont donc interdépendantes (Fig. 4.10). Les interdépendances entre ces trois capacités compliquent dès lors la synthèse des résultats.

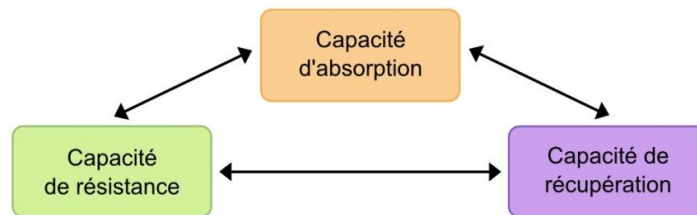


Figure 4.10 : L'interdépendance des capacités à étudier.

Quoi qu'il en soit, la méthodologie générale d'analyse de la résilience des réseaux techniques définie ici (Lhomme et al., 2010) se rapproche *in fine* de méthodologies déjà existantes et éprouvées (Bruneau et al., 2003), comme de méthodologies plus récentes voire postérieures (Ouyang et al., 2012). Cette dernière est d'ailleurs focalisée sur l'analyse des infrastructures urbaines et plus particulièrement sur les infrastructures réseaux. Néanmoins, derrière ce cadre méthodologique commun, des choix méthodologiques différencient les travaux menés.

4.3.2 Des choix méthodologiques faisant émerger des perspectives de recherche

La méthodologie développée reste jusqu'à présent très générale. Pour la rendre opérationnelle, il est nécessaire de la préciser, en opérant notamment des choix méthodologiques.

Ainsi, la méthodologie retenue requiert d'analyser ces réseaux afin notamment d'évaluer leur redondance (capacité d'absorption) et de simuler leur fonctionnement (capacité de résistance). Or, il existe différentes approches pour analyser les réseaux. Par exemple, un réseau possède différents niveaux – matériel, structurel et fonctionnel (Gleyze, 2005) – qu'il est possible d'analyser à partir de méthodes différentes. Plus exactement, faire de l'analyse de réseaux consiste à étudier son niveau structurel (*i.e.* analyser sa configuration, sa forme, sa trame) ou son niveau fonctionnel (*i.e.* analyser la dynamique des flux au sein du réseau). Pour les réseaux techniques, l'approche fonctionnelle requiert des modèles dits « physiques » (car ils modélisent les dynamiques physiques des flux) et l'approche structurelle requiert des modèles dits

« mathématiques » (car ils modélisent la topologie des réseaux à l'aide d'indicateurs mathématiques majoritairement issus de la théorie des graphes) (Fig. 4.11).

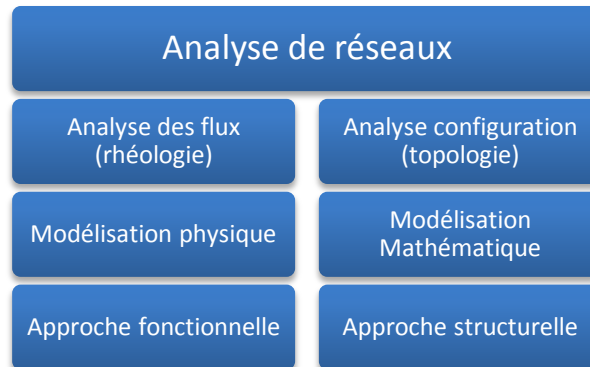


Figure 4.11 : Différence entre les approches structurales et fonctionnelles.

Il est bien entendu possible d'appliquer à la fois des modèles physiques (notamment en ce qui concerne l'analyse des dysfonctionnements des réseaux) et des modèles mathématiques (notamment en ce qui concerne l'analyse de la redondance) à notre méthodologie. Néanmoins, comme ces deux approches peuvent être corrélées (la structure orientant la fonction et la fonction nécessitant une certaine structure), il semble possible d'opter pour une de ces approches afin d'assurer une certaine homogénéité à la méthodologie développée.

Afin d'identifier les dysfonctionnements survenant sur un réseau technique, les modélisations physiques sont les plus pertinentes, car elles permettent de simuler le fonctionnement des réseaux techniques en reproduisant précisément la dynamique des flux. En revanche, les modélisations mathématiques, qui analysent la topologie des réseaux, n'ont pas pour objectif de reproduire ce fonctionnement. Ces modélisations sont alors parfois très imprécises dans ce domaine (Hines et al., 2010). Néanmoins, elles ont connu récemment des développements intéressants en la matière (Chap. 5). Ces modélisations mathématiques présentent alors deux intérêts, puisqu'elles font émerger de nouveaux éléments de compréhension concernant les mécanismes de fonctionnement de ces réseaux et permettent d'obtenir des temps de calcul plus courts en réduisant leur complexité.

De plus, pour évaluer la redondance des réseaux techniques, les modélisations mathématiques sont plus adéquates, puisqu'elles étudient précisément la topologie des réseaux. En revanche, les modélisations physiques des flux permettent seulement de mettre en relief certaines problématiques liées à la redondance, sans analyser précisément cette redondance.

D'un point de vue pratique, les modélisations physiques requièrent énormément de données sur les infrastructures et les usages de ces réseaux. Les modélisations mathématiques analysant la topologie des réseaux requièrent, quant à elles, uniquement des données concernant la configuration des réseaux. Une nouvelle fois, les modèles mathématiques apparaissent plus souples à appréhender. C'est alors l'ensemble de ces

considérations qui a conduit à focaliser cette recherche davantage sur les modélisations mathématiques que sur les modélisations physiques (Tab 4.2).

	Modélisation mathématique	Modélisation physique
Analyser les dysfonctionnements	++	+++
Analyser la redondance	+++	-
Accessibilité des données	+	-

Tableau 4.2 : Tableau comparatif des avantages et des inconvénients des modélisations dans la recherche engagée.

Ce chapitre insiste aussi sur l'existence des interdépendances entre les réseaux techniques. Ainsi, il devient de plus en plus difficile de passer outre ces problématiques lorsqu'il s'agit d'analyser ces réseaux, tout particulièrement dans un contexte de risques. Dans ce contexte, il semble indiqué de modéliser ces interdépendances afin de tenir compte de leurs effets. Ces interdépendances influent notamment sur les capacités de résistance des réseaux techniques puisqu'elles sont à l'origine d'endommagements ou de dysfonctionnements.

Enfin, la méthodologie élaborée requiert d'analyser l'accessibilité des composants endommagés vis-à-vis des services qui sont en charge de leur remise en service. Plus précisément, le choix a été fait d'analyser les capacités de récupération des réseaux techniques par des critères uniquement spatiaux. Or, l'analyse de la remise en service des réseaux techniques dépasse ces seuls aspects. Néanmoins, ce choix permet une nouvelle fois d'homogénéiser la méthodologie en faisant de l'analyse spatiale le trait commun d'analyse des trois capacités.

Trois choix méthodologiques ont ainsi été opérés. Ces choix requièrent désormais d'aborder trois thématiques de recherche plus ou moins disjointes (Fig. 4.12) : l'étude structurelle des réseaux techniques, la modélisation des interdépendances entre les réseaux techniques, l'analyse de la remise en service des réseaux techniques.

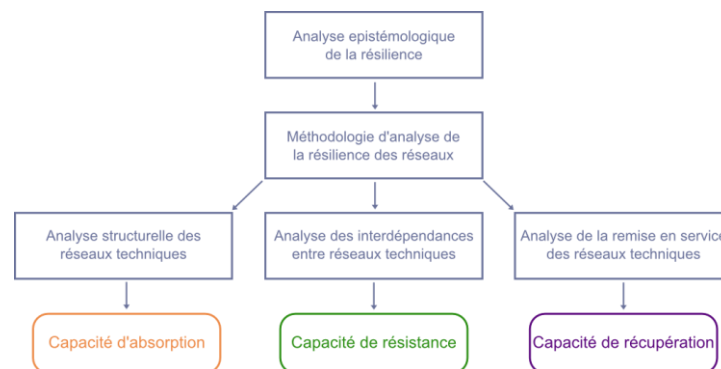


Figure 4.12 : Les thématiques de recherche émergent de la méthodologie d'analyse de la résilience des réseaux techniques.

La méthodologie développée dans cette thèse pour analyser la résilience des réseaux techniques se fonde directement sur la définition retenue de la résilience. Cette méthodologie repose alors sur l'analyse de trois capacités : la capacité de résistance, la capacité d'absorption et la capacité de récupération. Ces capacités ont la particularité d'être interdépendantes. Par conséquent, cela complique la production d'informations synthétiques. Finalement, compte tenu des choix méthodologiques opérés, la méthodologie développée s'appuie sur des analyses structurelles des réseaux techniques qui reposent sur des modélisations mathématiques analysant les configurations des réseaux. Elle doit aussi tenir compte des interdépendances entre les réseaux techniques. Enfin, elle analyse la remise en service des réseaux techniques selon des critères uniquement spatiaux.

4.4 SYNTHÈSE DU CHAPITRE 4

Définir la notion de « réseaux techniques » n'est pas simple. Si ce regroupement est en partie rationnel, il n'empêche que ces réseaux restent très diversifiés. Quoi qu'il en soit, les réseaux techniques sont des infrastructures critiques par excellence. Ces réseaux apparaissent donc multisectoriels, multi-scalaires et multidisciplinaires. Ces infrastructures peuvent ainsi être étudiées d'un point de vue économique, politique, organisationnel, technique... Elles recouvrent des secteurs comme l'énergie, l'eau, les télécommunications... Pour protéger ces infrastructures, il est alors nécessaire de mettre en place des dispositifs locaux (comme la protection d'un composant précisément localisé) et internationaux.

Compte tenu de ces caractéristiques, il n'est pas surprenant que les méthodologies mises en place pour analyser la résilience des réseaux techniques soient très hétérogènes. Il est notamment possible de distinguer les analyses de risques classiques (qui contribuent d'une certaine manière à analyser la résilience des réseaux techniques sans que ces analyses soient nécessairement centrées sur ce concept) des analyses se focalisant sur les facteurs de résilience des réseaux techniques (qui sont donc, quant à elles, centrées sur le concept de résilience).

Pour les analyses de risques, il faut distinguer les approches sectorielles qui se focalisent sur l'analyse des réseaux techniques, des approches intersectorielles qui se focalisent sur la modélisation des interdépendances entre les réseaux techniques. Ces dernières semblent plus appropriées compte tenu des fortes interdépendances existantes entre ces différents réseaux techniques.

En outre, les recherches qui se focalisent sur l'analyse des facteurs de résilience sont intéressantes pour deux raisons. Premièrement, elles confortent la définition de la résilience retenue dans cette recherche. Deuxièmement, elles identifient des facteurs de résilience spécifiques aux réseaux techniques. Néanmoins, ces recherches sont souvent très analytiques et sectorielles.

C'est pourquoi, une nouvelle méthodologie est nécessaire. Cette méthodologie se fonde essentiellement sur la définition retenue de la résilience. La méthodologie proposée repose alors sur l'analyse de trois capacités :

- la capacité de résistance : l'analyse consiste à évaluer les endommagements causés par une inondation et à identifier les dysfonctionnements induits par ces endommagements ;
- la capacité d'absorption : l'analyse consiste à évaluer la redondance des réseaux analysés ;
- la capacité de récupération : l'analyse consiste à évaluer l'accessibilité des composants endommagés vis-à-vis des centres chargés de leur remise en service.

De plus, des choix méthodologiques ont aussi été opérés :

- les réseaux seront analysés à l'aide d'une approche dite « structurelle » qui repose sur une modélisation mathématique de la topologie des réseaux ;
- les interdépendances entre les réseaux techniques devront être modélisées ;
- la remise en service des réseaux techniques sera analysée selon des critères uniquement spatiaux.

CHAPITRE 5

L'analyse des propriétés structurelles des réseaux techniques

Le chapitre précédent a permis d'établir une méthodologie d'analyse de la résilience des réseaux techniques. Cette méthodologie privilégie notamment l'analyse des propriétés structurelles des réseaux techniques (*i.e.* l'analyse de la configuration, de la trame de ces réseaux) qui repose sur une modélisation mathématique de leur topologie et non sur une modélisation physique de leur flux. En effet, si pour simuler le fonctionnement des infrastructures réseaux, les modélisations mathématiques peuvent difficilement rivaliser avec les modélisations physiques (Hines & Cotilla-Sanchez, 2010), elles offrent néanmoins une alternative pertinente aux modélisations physiques en ouvrant de nouvelles perspectives de recherche.

Actuellement, l'analyse des réseaux techniques dans un contexte de risques est très largement dominée par les approches fonctionnelles qui se focalisent sur l'évaluation des conséquences rhéologiques de différentes perturbations (modèles de congestion, modélisations de pertes de charge...) à l'aide de modèles physiques. Néanmoins, deux tendances contribuent à favoriser le développement des approches structurelles.

Premièrement, « depuis quelques années, nous assistons à un retour de l'étude des réseaux de façon mathématique, fait pour lequel les physiciens théoriques y sont pour beaucoup » (Mermet, 2011). En effet, l'analyse des propriétés structurelles des réseaux de systèmes complexes a connu récemment certaines avancées théoriques qui ont suscité un intérêt croissant pour celle-ci (Barabasi & Albert, 1999 ; Newman, 2003 ; Boccaletti et al., 2006). Certains physiciens se sont alors intéressés à l'étude des réseaux techniques – sans en être foncièrement des spécialistes – afin de donner des perspectives pratiques supplémentaires à des travaux essentiellement théoriques (Holme et al., 2002 ; Newman, 2003 ; Albert et al., 2004). Ces physiciens sont alors venus bousculer des méthodologies préétablies (Albert et al., 2000). Cette tendance s'appuie sur un postulat important : l'analyse structurelle des réseaux techniques permettrait de faire émerger des éléments de compréhension nouveaux (des éléments d'explication pour être plus juste) concernant le fonctionnement, les forces et les faiblesses de ces réseaux (Gleyze, 2005). Ces recherches s'éloignent ainsi des analyses purement « prédictives » au profit d'analyses plus « explicatives ».

Deuxièmement, la difficile prise en compte des interdépendances entre les réseaux techniques nécessite de mettre en place des analyses plus souples, fondées notamment sur une compréhension des mécanismes d'endommagement. En effet, les phénomènes

d'interdépendances – qui se révèlent être une source de vulnérabilité – impliquent des comportements non linéaires rendant les analyses prédictives classiques difficiles – *i.e.* issues de modélisations physiques complexes.

Dans un premier temps, ce chapitre introduit les principes de la modélisation sous forme de graphe des réseaux techniques, les principaux indicateurs permettant de les analyser et les questionnements concernant leur vulnérabilité structurelle. Cette introduction permet alors d'interroger la pertinence de ces approches pour analyser les réseaux techniques. Dans un deuxième temps, des recherches concernant la vulnérabilité structurelle des réseaux techniques sont exposées afin de mieux appréhender l'analyse de ces réseaux dans un contexte de risques. Enfin, la dernière partie de ce chapitre est spécifiquement consacrée à la recherche d'indicateurs permettant d'évaluer la redondance des réseaux techniques. En effet, ces indicateurs de redondance permettent de caractériser en partie les capacités d'absorption des réseaux techniques (Chap. 4).

5.1 LA THEORIE DES GRAPHES ET L'ANALYSE DES PROPRIETES STRUCTURELLES DES RESEAUX TECHNIQUES

De manière générale, un graphe permet de représenter la structure, les connexions d'un ensemble complexe (d'un système) en exprimant les relations entre ses éléments. Autrement dit, les graphes constituent une méthode de pensée qui permet de modéliser une grande variété de problèmes en se ramenant à l'étude de sommets et d'arcs (Sigward, 2002). La théorie des graphes est alors un outil de mathématique combinatoire dont le but est de résoudre des problèmes impliquant des objets configurés en réseau, c'est-à-dire des graphes.

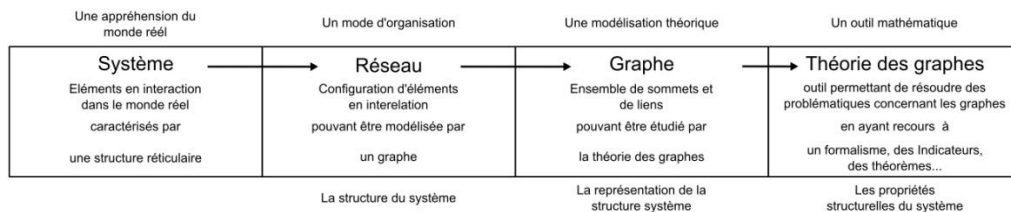


Figure 5.1 : La théorie des graphes.

Ainsi, un réseau technique, par sa construction et l'arrangement de ses composants, formant sa trame, possède un certain potentiel qui permet de mettre en relation les lieux d'un espace, plus ou moins facilement, afin de transporter des flux (des personnes, de l'eau, de l'électricité...). L'analyse de cette configuration, de cette trame, constitue l'objet d'étude de l'analyse structurelle. L'analyse structurelle est alors une approche tirant parti des données descriptives des réseaux techniques afin d'apporter une meilleure compréhension aux études fonctionnelles de ces réseaux. Plus précisément, l'analyse de la structure des réseaux techniques cherche à comprendre l'organisation de ces réseaux à

l'aide de mesures pouvant permettre *in fine* de mieux les exploiter et d'améliorer leur fonctionnement.

L'analyse structurelle repose notamment sur des indicateurs mathématiques fondés uniquement sur les composantes structurelles du réseau (nœuds, liens et chemins). La recherche d'indicateurs permettant de caractériser au mieux un réseau est considérée comme l'un des trois principaux axes de recherche concernant l'analyse structurelle des réseaux (Christensen & Albert, 2007). Traditionnellement, ces indicateurs proviennent de la théorie des graphes. Plus récemment, ceux-ci ont été complétés par des indicateurs « relationnels » issus de disciplines diverses (Mermet, 2011). L'objet n'est pas ici de présenter l'ensemble de la théorie des graphes, ni même de présenter une liste exhaustive d'indicateurs issus de cette théorie. Il s'agit plutôt d'interroger la pertinence des indicateurs utilisés afin d'analyser les réseaux techniques et par là même de s'interroger sur la pertinence des analyses structurelles.

5.1.1 La modélisation des réseaux techniques sous forme de graphe

La modélisation des réseaux techniques sous forme de graphe est généralement très intuitive. D'ailleurs, la théorie des graphes a probablement débuté avec les travaux d'Euler au XVIII^{ème} siècle et trouverait ses origines dans l'étude d'un réseau viaire (les ponts de Königsberg). Ce graphe $G = (N ; L)$ se définit mathématiquement comme un ensemble fini de liens L – correspondant au linéaire du réseau (routes, canalisations, câbles électriques...) – et un ensemble fini de sommets N – correspondant à des éléments ponctuels (intersections, postes de transformation, pompes de relevage...). L'ensemble des réseaux techniques se prête donc plutôt bien à la modélisation sous forme de graphe, les liens étant de surcroît tangibles et permanents. Cette modélisation « classique » utilisée par les ingénieurs, les géoéconomistes, etc., peut être qualifiée d'approche directe ou primaire (Crucitti et al., 2006).

Plus précisément, la plupart des réseaux techniques sont modélisés sous la forme de graphes « valués » (en français pondérés). Par exemple, la distance est souvent une propriété importante de ces réseaux (Gorman et al., 2004). Ils sont ainsi référencés comme des graphes spatiaux. Leurs liens sont donc souvent pondérés par cette métrique (cette pondération pouvant être assez aisément transformée en temps de parcours pour les réseaux viaires). Si cette caractéristique est très intuitive pour les réseaux viaires, celle-ci est aussi souvent valide pour les autres réseaux techniques (Gorman et al., 2004). Selon certains chercheurs, cette nature profondément géographique des réseaux techniques implique que leur graphe soit quasi exclusivement planaire (Crucitti et al., 2006 ; Gastner & Newman, 2006). Cependant, il existe de nombreux graphes spatiaux non plans (Thadakamalla et al., 2007).

La distance n'est pas le seul critère de pondération possible pour ces graphes. Les capacités (de flux, de personnes...) peuvent ainsi être jugées comme des facteurs plus

discriminants. Dans les faits, la pondération de ces graphes se révèle souvent problématique.

La plupart des graphes modélisant des réseaux techniques sont plus exactement des multigraphes (Nabaa, 2011). C'est-à-dire qu'il existe pour certaines paires de nœuds au moins deux arcs les reliant directement. Ainsi, cette redondance permet d'assurer le fonctionnement général d'un réseau et ce malgré des perturbations récurrentes (Duenas-Osario, 2005), même si cela rend en contrepartie leur fonctionnement plus complexe et plus coûteux.

Les graphes sont des modélisations simplifiées des réseaux. Ainsi, les éléments ponctuels modélisés par des nœuds sont généralement très hétérogènes (du poste source électrique à la simple interconnexion) et les éléments linéaires modélisés par des arcs très hiérarchisés (de l'autoroute au chemin vicinal). C'est pourquoi, ces réseaux doivent souvent être modélisés par des graphes multiniveaux (Chapelon, 1996). Cette modélisation n'est donc ni simple, ni anodine, elle fait en réalité l'objet de choix qui ne sont pas toujours explicités. Par exemple, il est notamment possible d'étudier précisément une sous-catégorie d'un réseau technique (réseaux de distribution d'eau potable, réseaux autoroutiers...) afin de minimiser les difficultés de modélisation (ces sous-graphes sont en effet plus homogènes), ou éventuellement d'avoir recours à des pondérations pour tenir compte des spécificités du réseau étudié (temps d'interconnexion, capacité du réseau...).

Compte tenu de ces imperfections, il peut être intéressant et tout à fait justifié de modéliser ces réseaux différemment, c'est-à-dire d'une manière contre-intuitive. Une première tentative de ce type peut être attribuée à Bill Hillier et Julienne Hanson (Hillier & Hanson, 1984), qui en mettant au point la syntaxe spatiale (*space syntax*), viennent remettre en question la modélisation « traditionnelle » des réseaux viaires. Ainsi, la syntaxe spatiale repose sur une modélisation opposée à l'approche directe, qualifiée alors par certains d'approche « duale » (dénomination maladroite) (Porta et al., 2006b). En effet, la *space syntax* définit les lignes droites (extensions des rues) comme des nœuds et les intersections comme des arcs.

En fait, pour réaliser ce graphe « dual », il est théoriquement nécessaire de déterminer au préalable des cartes axiales (ou angulaires, en anglais *axial maps*) reposant sur des lignes axiales (ou espace d'intervisibilité en anglais *axial lines*) (Fig. 5.2).

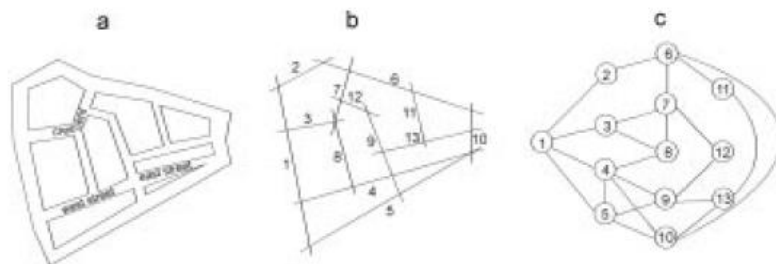


Figure 5.2 : (a) un réseau fictif, (b) la carte axiale, (c) le graphe dual (Jiang & Claramunt, 2004).

C'est seulement après cette étape préliminaire que le renversement est opéré (Fig. 5.2). Or, les définitions des lignes axiales et des cartes axiales sont très floues. Il existe donc différents algorithmes - correspondant à différentes méthodes - pour produire ces cartes axiales (9 selon (Batty & Rana, 2002)), fondés par exemple sur le nom des rues, des critères de visibilité... Or, l'analyse topologique de ces graphes est fortement dépendante des algorithmes de modélisation utilisés qui ne sont pour la plupart que des algorithmes heuristiques (Jiang & Claramunt, 2004). C'est pourquoi, les résultats de ces études soulignent autant, voire davantage, les caractéristiques de l'algorithme de modélisation que celles du réseau étudié.

Les avantages et les inconvénients de cette méthode de modélisation de la voirie urbaine ont déjà fait l'objet de nombreuses synthèses (Ratti, 2004 ; Batty, 2004). Le principal avantage de cette méthode est de sortir du paradigme très cartésien de l'approche directe, pour une approche qui, si elle se veut aussi très en phase avec les réalités du terrain (en étant parfois très empirique), tente de prendre en considération des aspects plus sensoriels et cognitifs. Cependant, elle accorde une grande importance aux voies les plus longues, entraînant alors des biais importants. En outre, cette méthode supprime les distances géographiques, alors même que ces distances nécessitent pour certains de traiter les réseaux viaires de manière particulière (Gastner & Newman, 2006). Néanmoins, la syntaxe spatiale repose sur la détection de lignes droites et accorde donc une importance relative à la distance, sachant de plus que ce critère peut être réintroduit *a posteriori*.

A noter que le terme de graphe dual est, dans ce contexte, abusif et ne correspond pas à la définition mathématique du dual d'un graphe. En effet, dans un graphe planaire topologique, une face est par définition une partie du plan limitée par des arcs, de sorte que deux points d'une même face puissent toujours être reliés par un trait continu ne rencontrant ni sommet ni arc (autrement dit les faces sont les surfaces du graphe planaire) (Fig. 5.3). Le graphe dual G^* de G est alors le graphe dont les sommets correspondent aux faces de G , et dans lequel deux sommets sont reliés par une arête si et seulement si les faces correspondantes dans G ont une arête en commun (Fig. 5.3).

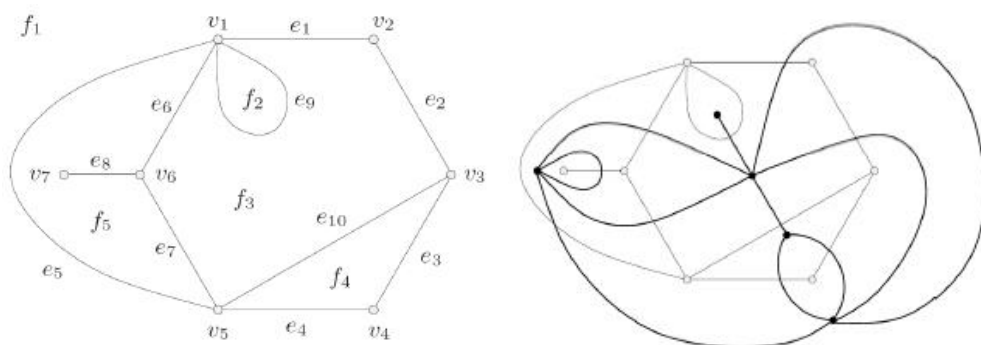


Figure 5.3 : A gauche un graphe et ses faces. A droite un graphe et son graphe dual (Cardillo, 2010).

5.1.2 Les indicateurs d'analyse des propriétés structurelles des réseaux techniques

Afin d'analyser les propriétés structurelles des réseaux techniques, il est possible d'utiliser une palette diversifiée d'indicateurs. Ces indicateurs proviennent notamment de l'analyse des réseaux viaires qui accorde une importance particulière aux distances géographiques, comme par exemple les indicateurs d'éloignement. L'éloignement moyen d'un graphe peut ainsi être mesuré par la moyenne de l'ensemble des plus courts chemins entre toutes les paires de nœuds du graphe [1] (Watts & Strogatz, 1998 ; Gleyze, 2005). La mesure de cet indicateur en un sommet donne, dans une certaine mesure, le niveau d'accessibilité de ce sommet [2]. Cependant, cet indicateur n'est applicable qu'à des graphes connexes (sinon des distances tendent vers l'infini). C'est pourquoi, il a pu être proposé d'utiliser l'inverse des distances, le terme d'efficacité est alors le plus souvent utilisé [3, 4] (Shimbel, 1953).

$$L(G) = \sum_{i,j,i \neq j}^n \frac{d(i,j)}{n(n-1)} \quad [1]$$

$$l(i) = \sum_{j,i \neq j}^n \frac{d(i,j)}{n-1} \quad [2]$$

$$L^{-1}(G) = E(G) = \sum_{i,j,i \neq j}^n \frac{1}{n(n-1)} \times \frac{1}{d(i,j)} \quad [3]$$

$$l^{-1} = e(i) = \sum_{j,i \neq j}^n \frac{1}{n(n-1)} \times \frac{1}{d(i,j)} \quad [4]$$

où $L(G)$ est l'éloignement moyen du graphe G , $l(i)$ l'éloignement moyen du sommet i , $E(G)$ l'efficacité du graphe G , $e(i)$ l'efficacité du sommet i , N le nombre de sommets du graphe G , $d(i,j)$ la plus courte distance entre i et j (cette distance pouvant être géographique, topologique...).

Ces indicateurs d'éloignement permettent, en quelque sorte, d'évaluer l'efficacité d'un réseau, puisque plus l'indicateur d'éloignement moyen d'un graphe est faible, plus ce réseau pourra être considéré comme efficace. Néanmoins, un simple indicateur d'éloignement n'est pas suffisant pour mesurer l'efficacité d'un réseau. Ainsi, afin de comparer différents réseaux, il est nécessaire de définir des zones d'étude couvrant une superficie donnée, de mettre en rapport cet indicateur avec le diamètre du graphe... Cependant, la détermination d'une zone d'étude reste arbitraire et l'utilisation d'autres indicateurs ne permet que partiellement des comparaisons. C'est pourquoi, il a été proposé de comparer le graphe du réseau étudié à un graphe jugé idéal (le graphe de référence). Ce graphe de référence a premièrement pu être défini comme un graphe complet où les distances entre paires de nœuds correspondent à des distances à vol d'oiseau. Dans ce contexte, il est généralement fait référence à un coefficient de rectitude. Devant le peu de réalisme de ce graphe (concernant les réseaux techniques), qui

considère alors l'espace géographique comme homogène (Porta et al., 2006a ; Cardillo, 2010), il a pu être proposé d'utiliser un graphe de Voronoi pour déterminer ce graphe de référence [6] (Gleyze, 2005). L'analyse structurelle démontre alors toute sa pertinence puisqu'elle permet en partie de différencier les effets spatiaux des effets réseaux (Gleyze, 2005).

$$C_i^R = \frac{1}{n-1} \times \sum_{j, j \neq i}^n \frac{d^{Eucl}(i, j)}{d(i, j)} \quad [5]$$

$$C_i^P = \frac{1}{n-1} \times \sum_{j, i \neq j}^n \frac{d^{ideal}(i, j)}{d(i, j)} \quad [6]$$

où C_i^R est le coefficient de rectitude calculé au point i , C_i^P le coefficient de performance calculé au point i , $d^{Eucl}(i, j)$ la distance euclidienne entre i et j , $d^{ideal}(i, j)$ la distance la plus courte entre i et j sur le réseau de référence.

Compte tenu de la planéité des graphes étudiés, il est possible de retrouver le même type de problématiques concernant la normalisation de certains indicateurs. Ainsi, certains indicateurs - notamment ceux introduits par les physiciens - nécessitent de comparer les graphes étudiés à des graphes complets, ce qui n'est pas pertinent pour des graphes planaires comme les réseaux techniques. Par exemple, le *clustering coefficient* (appelé aussi *transitivity*) n'est pas toujours un indicateur pertinent pour étudier un réseau technique (valeur souvent égale à zéro), il faut alors avoir recours à des variantes (Buhl et al., 2006). Ainsi, pour les réseaux techniques, il est préférable de comparer le graphe étudié à un arbre couvrant de poids minimum (algorithme de Kruskal) ou à un graphe issu d'une triangulation (Porta et al., 2006a). Plus généralement, il convient de repenser l'importance accordée conventionnellement à certains indicateurs qui présentent des spécificités quelque peu négligées du fait de leur utilisation systématique (ou par ignorance).

Les indicateurs de centralité constituent une autre grande famille d'indicateurs très utilisés pour analyser les réseaux viaires. Néanmoins, le terme de centralité étant équivoque, ces indicateurs évaluent des caractéristiques parfois très différentes. Malgré tout, ces indicateurs sont parfois corrélés. Historiquement, les premiers indices de centralité sont les centralités d'ordre (le degré), de proximité (éloignement ou efficacité) ou d'intermédierité (*betweenness*) [7]. Ces indicateurs définissent alors la centralité comme le fait d'être proche des autres – de ses voisins (centralité d'ordre) ou de l'ensemble des nœuds (centralité de proximité) – ou comme le fait d'être au milieu des autres (*betweenness*). Plus récemment, une centralité de rectitude (ou d'efficacité) (Crucitti et al., 2006) et une centralité d'information ont été définies. Cette dernière mesure la perte d'efficacité du graphe lorsqu'un nœud est supprimé, évaluant ainsi l'importance de ce nœud pour les autres nœuds du graphe [8].

$$C_i^B = \sum_{s,t,s \neq t}^n \frac{\sigma_{st}(i)}{\sigma_{st}} \quad [7]$$

$$C_i^I = \frac{E(G) - E(G')}{E(G)} \quad [8]$$

où C_i^B est la centralité intermédiaire (*betweenness*) du sommet i , C_i^I la centralité d'information du sommet i , σ_{st} le nombre de plus courts chemins allant de s à t , $\sigma_{st}(i)$ le nombre de plus courts chemins passant par i .

L'application de ces indicateurs de centralité sur un grand nombre de réseaux viaires a permis d'établir des classifications entre différentes structures de villes (Porta et al., 2006a ; Crucetti et al., 2006). Il semble alors possible de faire émerger un ordre (*a minima* une organisation spatiale) sous-jacent à ces organisations *a priori* complexes (la ville et son réseau viaire). Autrement dit, derrière le chaos apparent des structures urbaines, il est possible de faire émerger des lois. Ainsi, en effectuant une classification hiérarchique à partir de 4 indicateurs de centralité et à l'aide de distances euclidiennes calculées sur des coefficients de Gini, une vingtaine de réseaux viaires ont été classés en fonction de leurs propriétés structurelles (Crucetti et al., 2006). Pour cela, il est souvent nécessaire d'étudier les distributions cumulatives des indices de centralité (Porta et al., 2006a). Ainsi, les distributions des indicateurs de centralité font émerger des différences entre des villes à l'urbanisme « dit planifié » (comme Los Angeles) et des villes à l'urbanisme « dit auto-organisé » (comme Le Caire) (Crucetti et al., 2006). Ici, l'étude structurelle des réseaux techniques démontre une fois de plus toute sa pertinence.

De son côté, la syntaxe spatiale a développé ses propres indicateurs pour étudier les réseaux viaires. Cependant, ils sont pour la plupart identiques à ceux déjà présentés. Ainsi, l'indice d'intégration qui est un des principaux indicateurs de la syntaxe spatiale – « *si fondamental qu'il est lui-même la clef de la plupart des aspects de l'organisation spatiale humaine* » (Hillier, 1996) – équivaut à une centralité de proximité (Jiang & Claramunt, 2004 ; Crucitti et al., 2006). Néanmoins, cet indicateur n'étudie pas les plus courts chemins mais les chemins les plus directs. Certains auteurs font aussi référence à des indicateurs « angulaires ». Ainsi, il ne serait plus question d'éloignement moyen mais plutôt d'éloignement angulaire moyen. De la même manière, la centralité devient une centralité angulaire... (Turner, 2007).

Enfin, même si cette liste d'indicateurs des propriétés structurelles d'un graphe ne prétend pas à l'exhaustivité, il n'est pas possible de passer outre les indicateurs alpha [10], bêta [11] et gamma [12] très utilisés en géographie des transports. En effet, ce sont des indicateurs « classiques » qui permettent d'évaluer la structure globale d'un graphe. Autrement dit, ces indicateurs sont des indicateurs globaux (en ce sens où ils sont calculés pour un graphe et non pour un composant de ce graphe). L'indicateur gamma permet notamment d'évaluer la connectivité d'un graphe. Bien que contestés, car ils ne différencient pas des structures (des morphologies) de graphes pourtant très différentes (Ducruet, 2010), ces indicateurs ont malgré tout démontré leur pertinence pour l'analyse

de certains réseaux de transport (Wang & Rong, 2009). Ainsi, ces indicateurs sont purement topologiques et ne tiennent pas compte des distances (ça peut paraître étrange pour des réseaux de transport), ils restent alors constants lorsque le réseau s'étend ou se réduit par croissance allométrique (Bon, 1979).

$$u = e - v + p \quad [9] \quad \alpha = \frac{u}{2v-5} \quad [10] \quad \beta = \frac{e}{v} \quad [11] \quad \gamma = \frac{e}{3(v-2)} \quad [12]$$

Où (u) est le nombre cyclomatique, (v) le nombre de sommets, (e) le nombre d'arcs, (p) le nombre de composantes connexes, (α) l'indice alpha (meshedness), (β) l'indice beta, (γ) l'indice gamma.

L'intérêt croissant pour l'analyse structurelle est notamment lié à l'introduction de graphes théoriques, comme les graphes *scale-free* et *small-world*. Depuis que ces deux grandes familles théoriques de graphes sont apparues, de nombreux graphes, issus de systèmes complexes, ont été analysés afin de déterminer s'ils étaient *small-world* (petit monde) ou *scale-free* (invariant d'échelle, sans échelle caractéristique). Les réseaux techniques n'ont pas échappé à cette règle. Or, la plupart des réseaux techniques ne sont ni *scale-free*, ni *small-world*. Certains auteurs expliquent cette caractéristique par la nature profondément géographique des réseaux techniques qui, en les encrant profondément dans les territoires, empêche l'émergence de certaines structures. Ainsi, la planéité induite par cette nature géographique implique une variance de degrés extrêmement faible (Porta et al., 2006b). Néanmoins, il est tout à fait possible pour un graphe planaire d'être à la fois *scale-free* et *small-world* : les *Appolonian network* (Andrade et al., 2005). Ainsi, les contraintes ne sont pas que géographiques, elles sont aussi économiques, politiques, organisationnelles...

Ces réseaux techniques sont alors généralement caractérisés par un rapport constant entre le nombre d'arcs et le nombre de nœuds, ce qui est une propriété des réseaux aléatoires. Cependant, les réseaux techniques sont loin de partager les mêmes caractéristiques que ces réseaux aléatoires. Ainsi, concernant l'analyse de la distribution des degrés du réseau électrique nord-américain, la probabilité de trouver des nœuds de degrés élevés est certes beaucoup plus faible que pour un réseau *scale-free*, mais cette probabilité est bien supérieure à celle d'un réseau aléatoire (Albert et al., 2004). En fait, il existe généralement au sein des réseaux techniques des nœuds de forts degrés (Place de l'Etoile, Place de la République, etc., pour le réseau viaire parisien). Par conséquent, il existe une certaine hiérarchie qui n'est pas présente au sein des réseaux aléatoires. C'est pourquoi, certains indicateurs de centralité laissent précisément apparaître des comportements *scale-free*. Par exemple, les réseaux viaires auto-organisés présentent des propriétés similaires aux réseaux *scale-free* en termes de centralité (Cardillo et al., 2006 ; Porta et al., 2006b).

Les faibles indices de *clustering* de ces réseaux ne permettent généralement pas d'établir une correspondance avec les réseaux petits mondes. Il semble donc bien exister une spécificité des réseaux techniques qui partagent certaines similitudes avec les réseaux *scale-free*, *small-world*, aléatoires, etc., sans pour autant en partager toutes les caractéristiques. Il est alors nécessaire de construire des modèles théoriques spécifiques

permettant d'évaluer par exemple une centralité « électrique » (Hines et al., 2010). De plus, il faut préciser que ces résultats dépendent de la modélisation choisie. En effet, l'approche duale fait généralement apparaître des comportements *scale-free* (Jiang et Claramunt, 2004).

*Il apparaît dans cette partie que l'approche structurelle est pertinente afin d'analyser les réseaux techniques. En effet, ces analyses disposent aujourd'hui de listes d'indicateurs – pouvant être rattachés à la théorie des graphes – de plus en plus importantes permettant alors d'analyser diverses propriétés de ces réseaux. C'est pourquoi, il devient très difficile d'énumérer exhaustivement ces indicateurs. De plus, ces indicateurs sont souvent complémentaires et peuvent ainsi être combinés, élargissant dès lors davantage les possibilités d'analyse. Plus précisément, les réseaux techniques possèdent des caractéristiques communes qui les différencient d'autres familles de graphes (*scale-free*, *small-world*, aléatoire...). Par exemple, ces réseaux sont hiérarchisés, mais compte tenu de leur nature géographique et de contraintes économiques, politiques et organisationnelles, certaines propriétés ne peuvent émerger. Il convient alors d'adapter les indicateurs « conventionnels » à ces particularités. Cette approche comporte aussi de nombreuses limites : la modélisation sous forme de graphe bien qu'intuitive est problématique, notamment lorsqu'il s'agit de prendre en compte les aspects rhéologiques ; le choix de la modélisation est loin d'être neutre...*

5.2 L'ANALYSE DE LA VULNERABILITE « STRUCTURELLE » DES RESEAUX TECHNIQUES

De nombreux travaux récents ont fait émerger d'importantes relations entre la structure des réseaux techniques et les perturbations engendrées par les dysfonctionnements de leurs composants (Albert, 2004 ; Casals et al., 2007 ; Hines et al., 2010). Autrement dit, la structure d'un réseau est un élément clé caractérisant en partie la réponse de celui-ci face à une ou plusieurs défaillances. Ainsi, il est reconnu qu'un réseau *scale-free* est peu vulnérable à des perturbations se produisant aléatoirement sur son réseau, mais *a contrario* il est très vulnérable à des perturbations touchant certains nœuds spécifiques (en l'occurrence les *Hubs*). Pour la gestion des risques, ces informations sont importantes, car il devient dès lors possible de déterminer les modes de gestion appropriés à adopter pour réduire les risques en fonction de la structure du graphe – en l'occurrence, en épidémiologie, protéger prioritairement les *Hubs* pour un réseau *scale-free* (Eubank et al., 2004). Ainsi, de nombreux travaux tentent à partir d'études structurelles d'identifier les modes de gestion et les stratégies permettant de réduire les risques induits par certaines structures (Eubank et al., 2004 ; Motter, 2004 ; Pahwa et al. 2011 ; Libertadore et al., 2011).

Certains chercheurs postulent même que l'approche structurelle permettrait de mieux rendre compte des forces et des faiblesses de la trame d'un réseau (Gleyze, 2005 ; Mermet, 2011). Ainsi, la structure permettrait, en quelque sorte, d'expliquer les impacts engendrés par une ou plusieurs défaillances sur un réseau. Néanmoins, pour certains réseaux, comme le réseau électrique, il semble nécessaire d'adapter la modélisation sous forme de graphe pour tenter notamment de pallier l'absence de prise en compte des aspects rhéologiques (Hines et al., 2010).

5.2.1 L'état des savoirs

A l'instar des analyses rhéologiques, la méthode la plus utilisée pour analyser les réseaux techniques dans un contexte de risques consiste à supprimer un nœud ou un arc (*i.e.* un composant) du réseau étudié, pour *in fine* comparer les valeurs des indicateurs calculés au préalable sur le réseau « normal » puis sur le réseau « perturbé ». Ainsi, il est possible de déterminer plusieurs indicateurs de vulnérabilité structurelle d'un réseau face à la perturbation d'un composant. Par exemple, un indicateur de référence a été défini pour les réseaux de transport : la vulnérabilité élémentaire (Gleyze, 2005). Cet indicateur compare simplement l'éloignement moyen d'un graphe lorsque le réseau est perturbé (suppression d'un composant) et lorsque le réseau est normal [13]. Autrement dit, cet indicateur calcule l'allongement moyen consécutif à la suppression d'un composant sur l'ensemble du graphe. Il est alors possible d'identifier les composants les plus vulnérables pour l'« efficacité » (son potentiel relationnel) du graphe (Gleyze, 2005). Cependant, cet indicateur néglige les problématiques de connexité, car les relations rendues impossibles par la suppression d'un composant ne sont pas prises en considération (l'allongement serait en effet infini). Pour pallier ce manque, il est possible d'utiliser la centralité d'information [8].

$$V(i) = L(G) - L(G') \quad [13]$$

où $V(i)$ est la vulnérabilité élémentaire du sommet i , appelé dans cette thèse l'allongement moyen du sommet i , G' le graphe G privé de i , $L(G)$ l'éloignement moyen du graphe G .

De surcroît, la définition d'un indicateur de référence permet de tester d'éventuelles corrélations entre cet indicateur et d'autres indicateurs d'évaluation des propriétés structurelles des réseaux. L'objectif est alors d'expliquer pourquoi certains composants apparaissent plus vulnérables que d'autres. Par exemple, la centralité intermédiaire (*betweenness*) se révèle être un indicateur explicatif de la vulnérabilité élémentaire (en l'occurrence, de l'éloignement moyen) (Gleyze, 2005).

Un autre indicateur se révèle pertinent afin d'analyser la vulnérabilité structurelle d'un réseau technique. Il s'agit de l'indicateur de pertes de connectivité (Albert et al., 2004). Deux nœuds sont considérés « connectés » s'il existe au moins un chemin entre ces deux nœuds. Il y a alors pertes de connectivité (en fait de connexité) si plus aucun chemin ne subsiste pour relier deux nœuds d'un graphe suite à la suppression d'un ou de

plusieurs composants, impliquant ainsi la création de nouvelles composantes connexes (pour reprendre le formalisme de la théorie des graphes). Autrement dit, l'indicateur de pertes de connectivité quantifie le nombre de relations entre paires de nœuds rendues impossibles par la suppression d'au moins un composant (Crucetti et al., 2004 ; Matisziw et al., 2008). Chaque composant présente des niveaux de pertes de connectivité différents. Des nœuds peuvent alors être jugés plus critiques que d'autres.

Il existe donc bien différents indicateurs pour évaluer ce qui sera considéré dans cette recherche comme la « vulnérabilité élémentaire » (Fig. 5.4). Cette vulnérabilité élémentaire correspond à l'impact engendré par la suppression d'un composant sur un graphe (*i.e.* la vulnérabilité structurelle d'un réseau face au dysfonctionnement d'un composant). Afin d'éviter toute confusion, l'indicateur défini par Jean-François Gleyze sera désormais considéré comme l'allongement moyen.

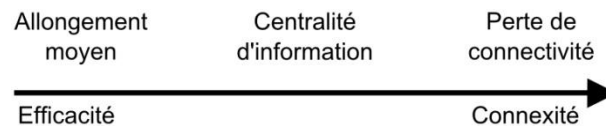


Figure 5.4 : Les trois indicateurs de référence pour évaluer la vulnérabilité élémentaire. Ils peuvent être classés en fonction de l'importance accordée à l'efficacité ou à la connexité des réseaux.

Cependant, comme il a été déjà précisé auparavant, les réseaux techniques sont généralement redondants afin d'éviter que les coupures sur ces réseaux soient trop nombreuses. En effet, cette redondance permet au réseau de continuer à fonctionner et ce malgré la perturbation d'un composant même si celui-ci est majeur. Dans les faits, les problématiques apparaissent lorsque plusieurs composants sont perturbés. Ainsi, une catastrophe est souvent la résultante de défaillances en chaîne (ou de défaillances plus ou moins contingentes) impliquant un nombre important de composants.

C'est pourquoi, il est pertinent d'analyser le comportement des réseaux techniques suite aux dysfonctionnements de plusieurs composants. Il est alors question d'analyser des scénarios de défaillances (les défaillances sont involontaires et aléatoires) ou des scénarios d'attaques (ces attaques sont volontaires et précisément ciblées). Ces scénarios correspondent à des combinaisons de nœuds ou d'arcs perturbés. Il est fait référence dans cette recherche à une « vulnérabilité combinatoire », en opposition à la vulnérabilité élémentaire précédemment présentée. La vulnérabilité combinatoire peut s'évaluer à l'aide des mêmes indicateurs que la vulnérabilité élémentaire. En effet, la vulnérabilité élémentaire n'est qu'un cas particulier de vulnérabilité combinatoire. Cependant, en fonction du nombre de composants perturbés, certains indicateurs semblent plus appropriés (Tab. 5.1).

Jusqu'à très récemment, ces analyses de vulnérabilité étaient plutôt rares car – d'un point de vue statistique – il faut bien reconnaître que ces défaillances en chaîne ont des probabilités d'occurrence plutôt faibles. Cependant, depuis quelques années, les données ont changé. En effet, le début des années 2000 a été marqué par des événements démontrant que les réseaux techniques étaient peut être plus fragiles qu'il ne le semblait

(Chap. 1). De surcroît, les vagues successives d'attentats ont éveillé la crainte d'attaques ciblées et délibérées – indifférentes à toutes probabilités statistiques – envers des infrastructures critiques. L'objectif est alors pour un groupe terroriste de causer un maximum de perturbations sur le réseau tout en attaquant le moins de cibles possibles. Dans le même temps, les réseaux techniques sont devenus de plus en plus complexes et interconnectés, rendant ainsi les analyses probabilistes très incertaines. Il est dès lors devenu pertinent de se focaliser sur l'analyse de ces scénarios « catastrophes ».

	Nombre de composants très faible par rapport à la taille du graphe	Nombre de composants faible par rapport à la taille du graphe	Nombre de composants moyenne par rapport à la taille du graphe
Allongement moyen	***	**	*
Centralité d'information	**	**	**
Pertes de connectivité	*	**	***

Tableau 5.1 : Pertinence des indicateurs en fonction du nombre de composants impliqués dans les scénarios de défaillance.

Un des objectifs principaux de ces travaux est de déterminer les scénarios de défaillances les plus critiques, c'est-à-dire d'identifier les scénarios qui vont par exemple engendrer les pertes de connectivité les plus importantes. Pour les réseaux techniques, les défaillances aléatoires (les combinaisons de composants défaillants sont déterminées aléatoirement) sont généralement peu critiques. En revanche, une deuxième famille de scénarios se révèle plus problématique. Ces scénarios impliquent les nœuds ayant les degrés (ou les centralités) les plus forts. Cependant, contrairement à des réseaux de type *scale-free*, ces scénarios apparaissent finalement peu critiques. C'est pourquoi, les réseaux techniques apparaissent souvent plus robustes que les réseaux *scale-free* qui sont excessivement dépendants de certains composants. Dans les faits, un des scénarios les plus critiques implique les composants les plus centraux, mais cette fois ci en recalculant les centralités après chaque défaillance (c'est un calcul dynamique des centralités). Par exemple, une combinaison de ce type impliquant seulement 2% des composants du réseau électrique nord-américain engendre une perte de connectivité d'environ 60% et une attaque sur seulement 8% des composants de ce réseau engendre sa rupture quasi-totale (Albert et al., 2004).

Parallèlement à la recherche des scénarios les plus agressifs (critiques), il se révèle intéressant d'analyser les conséquences de l'ensemble des scénarios pouvant se produire sur un réseau (Matisziw et al., 2008 ; Murray & Grubestic, 2011). En effet, les scénarios les plus critiques ne sont que des scénarios parmi une multitude d'autres scénarios pouvant

être considérés comme critiques. Les scénarios les plus critiques ne fournissent ainsi que des informations partielles concernant les forces et les faiblesses des réseaux (Fig. 5.5). Se protéger contre les scénarios les plus critiques n'est pas toujours la bonne solution. De plus, c'est seulement en analysant l'ensemble des scénarios qu'il devient possible d'expliquer pourquoi un scénario est plus critique qu'un autre, car seul l'ensemble de ces scénarios permet d'avoir une vision exhaustive des réponses d'un réseau face à des perturbations.

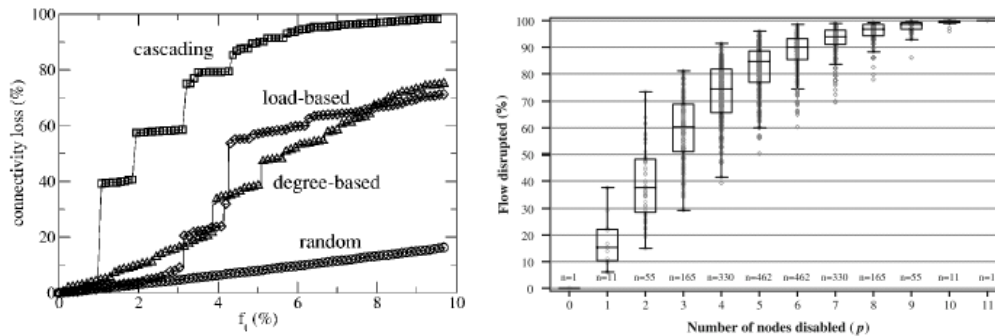


Figure 5.5 : A gauche les conséquences de certains scénarios (Albert et al., 2004). A droite les conséquences de l'ensemble des scénarios pouvant se produire (Matisziw et al., 2008).

Enfin, l'analyse de la vulnérabilité structurelle des réseaux techniques peut être abordée de deux manières distinctes. Une approche est considérée comme « statique », car elle ne cherche pas à déterminer les conséquences induites par les défaillances des composants, c'est-à-dire qu'elle ne tient pas compte de la redistribution des flux résultant de ces défaillances. Autrement dit, cette approche édulcore toutes les problématiques rhéologiques, elle est donc « exclusivement » structurelle. *A contrario*, la deuxième approche tient compte de ces effets en chaîne. Cette approche est considérée comme dynamique. Elle n'est alors plus « exclusivement » structurelle, puisqu'elle impose d'émettre des hypothèses sur la redistribution des flux (voire sur la tolérance des composants lorsque les informations sur les capacités ne sont pas disponibles). Elle aborde donc des aspects rhéologiques et peut alors être qualifiée de semi-rhéologique, les analyses rhéologiques restant la spécialité des modélisations physiques (Tab. 5.2).

	Elémentaire	Combinatoire
Statique (exclusivement structurelle)	Gleyze, 2005	Albert et al., 2004 Holme et al., 2002
Dynamique (semi-rhéologique)	Crucitti et al., 2004	Kinney et al., 2005 Wang & Rong, 2011

Tableau 5.2 : Quelques exemples représentatifs des diverses possibilités d'analyse de la vulnérabilité des réseaux techniques.

Dans un autre registre, la détection de communautés au sein d'un graphe peut aussi se révéler utile afin d'analyser la vulnérabilité des réseaux techniques. Par exemple, une technique de *clustering* hiérarchique a été utilisée (partitionnement de données) pour analyser la vulnérabilité des réseaux viaries (Nabaa, 2011). L'objectif de ces travaux est alors d'identifier les liens intercommunautaires constituant des liens incontournables au sein d'un réseau pour passer d'une communauté à une autre. En ce sens, ces liens constituent des liens critiques pour le fonctionnement général des réseaux. Certains auteurs ont aussi proposé d'utiliser les principes de la syntaxe spatiale pour analyser les réseaux viaries dans un contexte de risques (Gil & Steinbach, 2008). Une application réalisée sur la ville de Londres fait apparaître un déplacement des centralités au profit de certains espaces situés en périphérie. Le réseau passe ainsi d'une polarité autour du centre en temps normal, vers une multipolarité autour d'une multitude de centres situés en périphérie. En outre, les approches structurelles permettent d'appréhender les problématiques d'évacuation.

5.2.2 Des développements nécessaires concernant la compréhension de la vulnérabilité élémentaire : application au réseau viaire

Si la vulnérabilité élémentaire a été définie et si la programmation des indicateurs permettant de l'évaluer est relativement aisée, il n'en reste pas moins que leur temps de calcul devient très vite important (par exemple, complexité quadratique $O(n^2)$ pour l'éloignement moyen qui requiert n^2-n calculs). Il est alors intéressant de chercher à approximer ces indicateurs en utilisant des indicateurs plus performants en termes de temps de calcul. Or, la seule évaluation de la vulnérabilité élémentaire ne permet pas de l'expliquer *a priori* (c'est-à-dire de connaître les facteurs de cette vulnérabilité) et d'identifier ainsi les indicateurs pertinents pour son approximation. L'objectif est alors dans un premier temps d'identifier les facteurs explicatifs qui vont influencer sur la vulnérabilité élémentaire d'un composant, afin de pouvoir dans un deuxième temps l'approximer en ayant recours à ces facteurs. Ici, dans la continuité des travaux de Jean-François Gleyze (2005), l'indicateur utilisé pour analyser la vulnérabilité élémentaire de différents réseaux routiers est l'indicateur d'allongement moyen.

Des indicateurs de base de la théorie des graphes, comme le degré et l'éloignement moyen, ne sont pas satisfaisants pour approximer l'allongement moyen (Gleyze, 2005). En revanche, la centralité intermédiaire offre de meilleurs résultats. L'analyse couplée de la centralité intermédiaire et de l'allongement moyen des différents sommets d'un réseau confirme cette corrélation (Tab. 5.3).

Ville	R-squared	$ \rho $	ρ -value	Signification
Chanteau	0,7207	0,8489	< 2e_16	***
Marigny	0,5251	0,7246	< 2e_16	***

Tableau 5.3 : Corrélation entre la centralité intermédiaire et l'allongement moyen.

Cela s'explique simplement. En effet, si un nœud ou un arc avec une centralité intermédiaire forte venait à être perturbé, les conséquences sur l'efficacité du réseau seraient importantes, car un grand nombre de relations seraient affectées. Autrement dit, la suppression d'un composant possédant une centralité intermédiaire forte implique un grand nombre de détours. Cependant, ce parallèle est fondamentalement restreint, car le cumul des détours engendrés par la rupture d'un composant n'est pas seulement lié au nombre de ses détours, mais aussi à la qualité de ses détours (correspondant à la distance des allongements provoqués par ces détours).

D'autres indicateurs se révèlent utiles pour analyser l'allongement moyen. Par exemple, l'indicateur de contournement proximal, qui découle de la définition du rayon proximal d'un point, se révèle pertinent (Gleyze, 2005). En effet, plus une perturbation est proche d'un des sommets origine ou destination d'un trajet, plus la perturbation induite risque d'être importante si le réseau n'est pas assez bien maillé. Le rayon proximal mesure donc la position relative d'un sommet par rapport aux chemins qui l'empruntent, plus ce rayon est faible, plus ce point assure une desserte locale, plus les détours induits par sa rupture pourront être importants. Le contournement proximal mesure alors l'éloignement moyen consécutif à la suppression d'un sommet en se limitant au rayon proximal de celui-ci. Ainsi, contrairement à l'allongement moyen qui se calcule pour tous les sommets d'un graphe, le contournement proximal se limite à des points plus ou moins voisins, qui sont déterminés par le rayon proximal de chaque sommet. La prise en compte de cet indicateur permet d'améliorer de manière significative les corrélations obtenues avec la seule centralité intermédiaire (Gleyze, 2005).

C'est pourquoi, dans une même continuité, la notion d'allongement moyen local a été définie [13] (Lhomme et al., 2011a). Cet indicateur se calcule comme l'allongement moyen mais pour un sous graphe dont le rayon « topologique » est le même pour tous les points (en l'occurrence ici les voisins des voisins d'un sommet). Autrement dit, il s'agit ici de calculer la moyenne des détours, non pas sur l'ensemble d'un graphe, mais seulement entre les plus proches voisins du sommet perturbé, car potentiellement les détours les plus importants seront engendrés par ces relations. Il s'agit ici de simplifier l'indicateur de contournement proximal qui est d'ordre $O(n^2)$ puisqu'il implique au préalable le calcul du rayon proximal.

$$V_{\Gamma^n}(i) = L_{\Gamma^n}(G) - L_{\Gamma^n}(G') \quad [14]$$

où $V_{\Gamma^n}(i)$ est l'allongement moyen local de voisinage n du sommet i , Γ^n limite l'analyse au sous-graphe situé dans un voisinage n (si n est supérieur au diamètre du graphe alors $V_{\Gamma^n}(i) = V(i)$), G' le graphe G privé de i , $L_{\Gamma^n}(G)$ l'éloignement moyen local (de voisinage n) du graphe G .

Coupler ce nouvel indicateur à un indicateur de centralité intermédiaire répond alors à une logique simple. En effet, il s'agit d'utiliser deux indicateurs aux caractéristiques complémentaires permettant pour l'un d'analyser le positionnement global du sommet au sein d'un graphe, pour l'autre d'analyser l'importance locale du sommet vis-à-vis de

ses voisins plus ou moins directs. Les tests de corrélation donnent alors des résultats intéressants (Tab. 5.4).

Ville	R-squared	$ \rho $	ρ -value	Signification
Chanteau ($a \times \text{vul} + b \times \text{cen}$)	0,8149	0,9027	$< 2e_{-16}$	***
Chanteau ($\text{vul} \times \text{cen}$)	0,9680	0,9839	$< 2e_{-16}$	***
Marigny ($a \times \text{vul} + b \times \text{cen}$)	0,8731	0,9343	$< 2e_{-16}$	***
Marigny ($\text{vul} \times \text{cen}$)	0,8610	0,9279	$< 2e_{-16}$	***

Tableau 5.4 : Résultats des régressions obtenus à partir de différents couplage de l'indicateur d'allongement moyen local et de centralité intermédiaire.

L'estimation de la vulnérabilité élémentaire – en l'occurrence ici de l'éloignement moyen – à l'aide d'indicateurs issus de l'analyse de graphe reste néanmoins problématique. En effet, s'il est possible d'obtenir des corrélations intéressantes entre l'éloignement moyen et certains indicateurs sur quasiment l'ensemble des réseaux testés, afin d'expliquer en partie celle-ci (Gleyze, 2005 ; Lhomme et al., 2011a), la singularité des réseaux est telle qu'il n'est possible d'obtenir que des résultats spécifiques à chaque réseau. Ainsi, les coefficients des formules des régressions sont très différents d'un réseau à un autre. Il est alors impossible de réutiliser les coefficients obtenus sur un réseau, afin de déterminer les vulnérabilités élémentaires d'un autre réseau. Pourtant, il serait pertinent pour un grand graphe, dont le calcul des vulnérabilités élémentaires se révèle très long, d'évaluer ces vulnérabilités sur un sous graphe (ou sur un autre graphe de plus petite taille) afin de déterminer des coefficients qui permettraient ensuite d'approximer les résultats pour l'ensemble du graphe. La compréhension naissante de la vulnérabilité élémentaire montre alors ses limites.

Il est alors nécessaire d'adapter les objectifs de la recherche engagée. Par exemple, il est pertinent d'avoir recours à un réseau « test » (permettant de calculer les coefficients de régression nécessaires à l'estimation des vulnérabilités élémentaires approximées) afin de hiérarchiser les vulnérabilités élémentaires des réseaux à étudier. Il convient dès lors d'analyser les corrélations entre les valeurs réelles et les valeurs approximées, puis de comparer les classifications obtenues dans les deux cas. Ainsi, une bonne estimation des classifications permettrait de s'affranchir du calcul des vulnérabilités élémentaires « réelles » au profit des vulnérabilités élémentaires « approximées », car elles aboutiraient à des hiérarchisations comparables, démontrant une certaine compréhension de la vulnérabilité élémentaire. L'objectif n'est alors plus ici d'obtenir une estimation proche des vulnérabilités élémentaires (impossible d'atteindre à l'heure actuelle) permettant de retrouver ces valeurs, mais d'identifier les éléments vulnérables à l'aide d'une bonne

corrélation entre les résultats estimés et les vulnérabilités élémentaires « réelles » (Lhomme et al., 2011a) (Fig. 5.6).

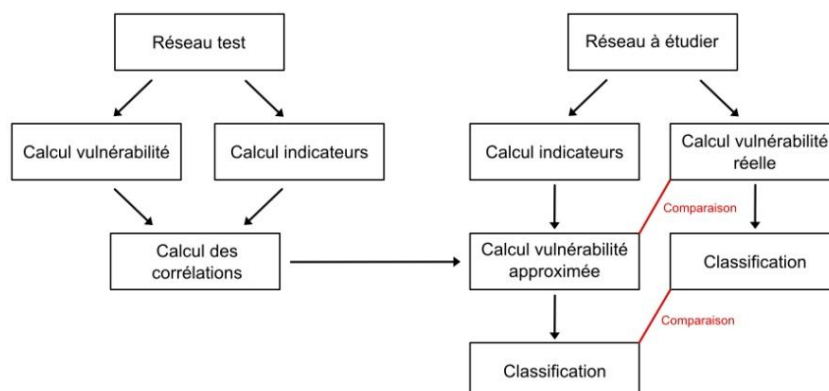


Figure 5.6 : Méthode employée pour analyser la vulnérabilité élémentaire.

Pour ces calculs, les indicateurs retenus sont : la centralité intermédiaire, l'éloignement moyen local et deux indicateurs de redondance (voir 5.3). La ville test sera celle de Bou et nous estimerons, à partir des résultats obtenus pour cette ville, les vulnérabilités élémentaires des villes de Chanteau et de Marigny-Les-Usages. Toutes ces villes sont situées dans la communauté d'agglomération d'Orléans. Elles présentent des profils similaires (Tab. 5.5) afin de faciliter une éventuelle estimation des vulnérabilités élémentaires. Ainsi, elles sont toutes les trois situées à la limite de l'agglomération orléanaise, d'une superficie inférieure à 10 km² - la ville de Chanteau ayant la particularité d'être plus étendue, mais la partie étudiée est plus restreinte que sa superficie totale - et se caractérisent par une population inférieure à 1500 habitants.

Ville	Population	Superficie	Arcs	Sommets
Chanteau	1 244	28,85 km ²	237	186
Marigny	1 134	9,66 km ²	169	132
Bou	911	6,29 km ²	233	164

Tableau 5.5 : Caractéristiques des villes étudiées.

Les résultats obtenus apparaissent sensiblement différents en fonction des villes. Si les valeurs estimées sont assez éloignées des vulnérabilités élémentaires réelles (ce qui était prévisible), ces calculs font apparaître des corrélations importantes notamment pour la commune de Chanteau (Tab. 5.6). Ces corrélations laissent alors entrevoir une possible classification des éléments vulnérables à l'aide des indicateurs choisis. Néanmoins, les résultats concernant ces classifications sont mitigés. En effet, si la classification approximée de Chanteau est très proche de la classification réelle, il en est autrement pour Marigny, dont la classification estimée fait apparaître davantage de sommets considérés comme étant très vulnérables (Fig. 5.7). Cela est dû à la sous-estimation du

sommet possédant la plus forte vulnérabilité élémentaire (Fig. 5.8). Il semble donc nécessaire d'améliorer encore les régressions à l'aide d'indicateurs plus pertinents.

Ville	R-squared	$ \rho $	ρ -value	Signification
Chanteau	0,9356	0,9673	< 2e_16	***
Marigny	0,7831	0,8849	< 2e_16	***

Tableau 5.6 : Résultats des corrélations obtenues entre la vulnérabilité intermédiaire et quatre indicateurs (centralité intermédiaire, vulnérabilité locale et deux indicateurs de redondance).

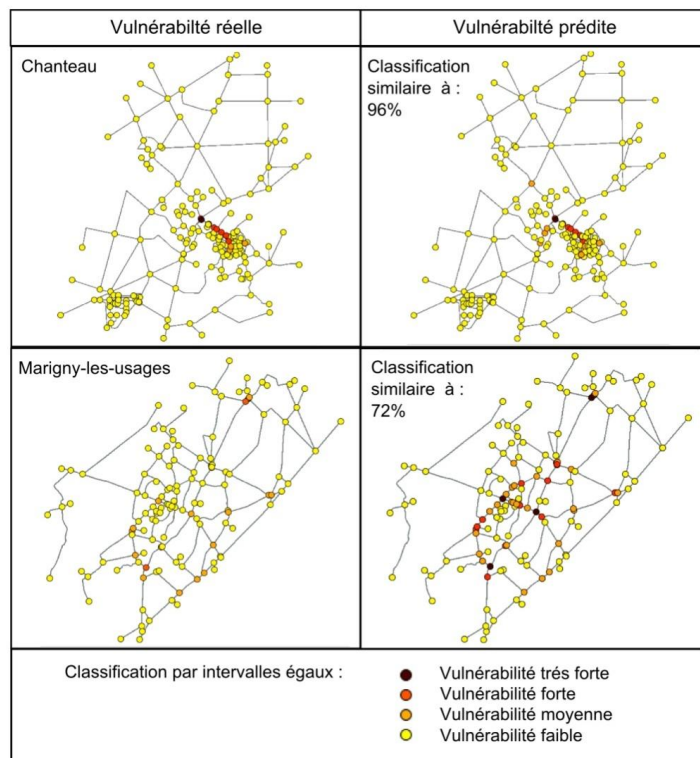


Figure 5.7 : Comparaison des classifications obtenues pour la vulnérabilité élémentaire réelle et prédite.

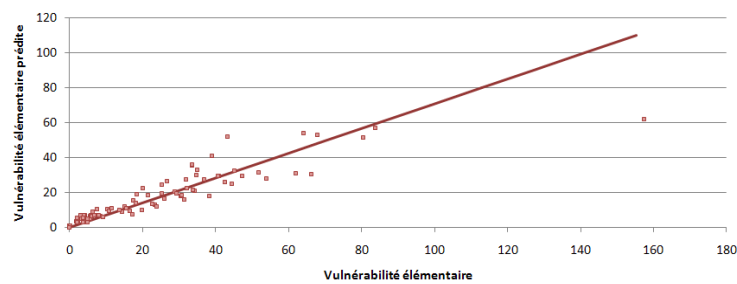


Figure 5.8 : Prédiction de la vulnérabilité élémentaire pour Marigny-Les-Usages (présence d'un point fortement sous-estimé)

Il est donc à l'heure actuelle l'instant difficile d'estimer de façon tout à fait satisfaisante la vulnérabilité élémentaire – correspondant ici à un calcul d'éloignement moyen – à partir des indicateurs utilisés dans cette recherche. En revanche, une éventuelle classification semble possible à condition d'améliorer encore les connaissances relatives à l'évaluation de la vulnérabilité élémentaire des réseaux.

Quoi qu'il en soit, il ressort de ces études des éléments de compréhension intéressants. Ainsi, la vulnérabilité structurelle d'un réseau face au dysfonctionnement d'un composant semble être la résultante entre d'une part une position centrale du composant au sein du graphe et d'autre part une importance dans le fonctionnement local du réseau. Pour diminuer la vulnérabilité élémentaire, il est alors envisageable de diminuer la centralité des composants les plus centraux au profit de leurs voisins (diminuant ainsi dans le même temps leur importance locale). De plus, les résultats obtenus illustrent la diversité des réseaux analysés, les indicateurs structurels permettant alors de mettre en exergue plus aisément ces singularités (en l'occurrence une vulnérabilité élémentaire anormalement élevée pour un élément d'un réseau viaire dans le cas de la ville de Marigny).

5.2.3 Des éléments de compréhension concernant la vulnérabilité combinatoire

Après avoir présenté les recherches et les développements réalisés en matière de vulnérabilité élémentaire des réseaux techniques, il est désormais intéressant d'aborder les questionnements concernant leur vulnérabilité combinatoire. Dans une grande majorité des recherches engagées dans ce domaine, la réaction des réseaux face à des scénarios de défaillances (ou des scénarios d'attaques) est simplement évaluée afin de déterminer la vulnérabilité de ces réseaux envers certains types de scénarios. Ainsi, un réseau – selon ses caractéristiques structurelles – se révélera plus ou moins sensible à tel ou un type de scénarios donnés. Les conclusions restent donc très générales.

C'est pourquoi, les facteurs explicatifs de cette vulnérabilité sont en définitive plutôt rares. Par exemple, pour les réseaux techniques, les scénarios impliquant les composants les plus centraux « dynamiquement » (voir précédemment) apparaissent critiques, mais aucune hypothèse n'est formulée sur les caractéristiques *a priori* des composants impliqués dans ces scénarios. Afin de bénéficier d'éléments de compréhension plus précis, il faut alors être en mesure d'identifier d'éventuelles corrélations entre des indicateurs structurels et un indicateur de référence permettant d'évaluer la vulnérabilité « combinatoire » (*i.e.* la vulnérabilité structurelle d'un réseau face à la défaillance d'au moins un composant).

Pour cela, idéalement, tous les scénarios de défaillances possibles doivent être étudiés. Une des difficultés résulte alors directement du nombre important de scénarios (de défaillances) possibles. C'est pourquoi, dans un premier temps, il s'agit d'analyser des graphes de tailles relativement faibles (une vingtaine de nœuds maximum). En effet, cela permettra d'obtenir de premiers résultats pour émettre par la suite des hypothèses.

Ainsi, le premier test détaillé concerne le graphe simplifié du réseau américain des routeurs internet (comprenant 11 nœuds). Puis d'autres réseaux (théoriques ou réels) de petites tailles seront utilisés afin de valider les hypothèses soumises. Plus précisément, l'indicateur de référence retenu ici pour évaluer la vulnérabilité combinatoire est l'indicateur de pertes de connectivité qui reste pertinent même lorsque le nombre de composants défaillants est élevé.

En reprenant les enseignements issus de l'analyse de la vulnérabilité élémentaire, il peut sembler logique de tester les corrélations existantes entre la centralité intermédiaire des composants impliqués dans un scénario et les pertes de connectivité engendrées par ce scénario. En effet, il est assez intuitif de postuler que des défaillances touchant une combinaison de nœuds centraux auront des conséquences importantes pour ces réseaux en termes de pertes de connectivité. Cependant, cette corrélation est loin d'être évidente (Fig. 5.9) (Tab 5.7). Ce résultat est en conformité avec les études démontrant que les scénarios de défaillances impliquant des composants centraux ne sont pas si critiques pour des réseaux techniques. C'est effectivement le calcul dynamique de ces centralités qui permet d'identifier des scénarios critiques.

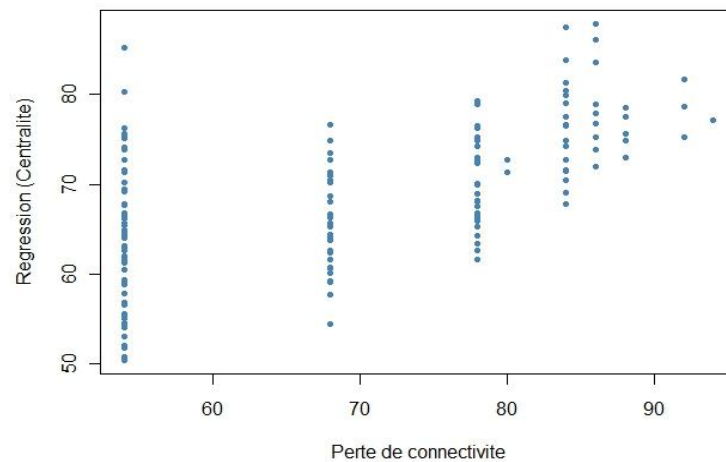


Figure 5.9 : Graphique représentant la corrélation entre la centralité intermédiaire et l'indicateur de pertes de connectivité (pour 3 nœuds impliqués dans le scénario).

	Estimation	Str. Error	ρ -value	Signification
Centralité	1.0350	0.1023	< 2e-16	***
Multiple R-squared				0.3857

Tableau 5.7 : Corrélation entre la centralité intermédiaire et l'indicateur de pertes de connectivité (pour 3 nœuds impliqués).

L'indicateur de centralité intermédiaire (comme tout autre indicateur de centralité) apparaît donc très insuffisant pour expliquer *a priori* l'impact de la suppression d'une combinaison de nœuds sur un graphe donné. Ainsi, quel que soit le réseau étudié, il est

presque improbable que les défaillances des n -composants les plus centraux produisent un scénario critique (en termes de pertes de connectivité) (Fig. 5.10). En effet, comme la suppression du nœud le plus central ne redistribue pas nécessairement les relations en direction du deuxième nœud le plus central, les centralités se trouvent alors modifiées et l'ordonnement préalable erroné. Tout l'enjeu est alors de comprendre quelles sont les dynamiques impliquées par cette redistribution des centralités. Pour tenter d'expliquer ce phénomène de redistribution, il apparaît nécessaire de bien distinguer les combinaisons de nœuds centraux engendrant de fortes pertes de connectivité, au contraire de celles qui ne produisent pas de fortes pertes.

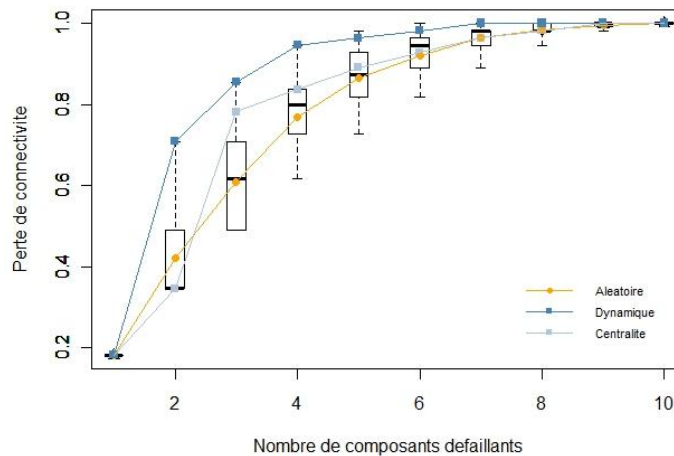


Figure 5.10 : Analyse de l'ensemble des scénarios possibles pour le réseau américain des routeurs et des impacts de différents types de scénarios.

Une caractéristique apparaît alors importante. Dans le cas étudié, les scénarios les plus critiques semblent impliquer des nœuds qui ne tiennent pas le même rôle (en termes relationnel) au sein du réseau. Ainsi, pour le réseau américain des routeurs internet, le scénario le plus critique, impliquant deux composants, comprend un nœud positionné au sud, qui a pour principal objectif de faciliter les relations situées au sud de ce réseau (Atlanta), et un nœud positionné au nord, qui joue un rôle important dans les relations nord-américaines (Kansas City).

C'est pourquoi, afin d'être en mesure de bien différencier les scénarios en fonction de leur criticité, il est nécessaire d'identifier les positions relatives qu'occupent les composants impliqués dans ces scénarios au sein du graphe. Attention, ce positionnement relatif n'est pas purement géographique mais relationnel (réticulaire). Atlanta et Kansas City sont par exemple plutôt proches géographiquement (à l'échelle américaine), mais ces nœuds ne tiennent pas le même rôle dans ce réseau. Un indicateur a alors été créé à cet effet : l'indicateur de différenciation de chemins préférentiels (indicateur de DCP) [15].

$$DCP(i,j) = \sum_{s,t,s \neq t}^n \frac{\sigma_{st}(i,j)}{\sigma_{st}} \quad [15]$$

où $DCP(i,j)$ est l'indicateur de différenciation de chemins préférentiels du couple (i,j) , σ_{st} le nombre de plus courts chemins allant de s à t , $\sigma_{st}(i,j)$ le nombre de plus courts chemins allant de s à t en passant par i et par j .

Le couplage de l'indicateur de DCP avec la centralité intermédiaire améliore sensiblement les résultats (Tab 5.8) (Fig. 5.11). En effet, des corrélations intéressantes entre ces indicateurs et l'indicateur de pertes de connectivité se font jour.

	Estimation	Str. Error	ρ -value	Signification
Centralité	1.53809	0.09476	< 2e-16	***
DCP	-0.54205	0.05387	< 2e-16	***
Multiple R-squared				0.622

Tableau 5.8 : Corrélation entre la centralité intermédiaire couplée à l'indicateur de DCP et l'indicateur de pertes de connectivité (pour 3 nœuds impliqués).

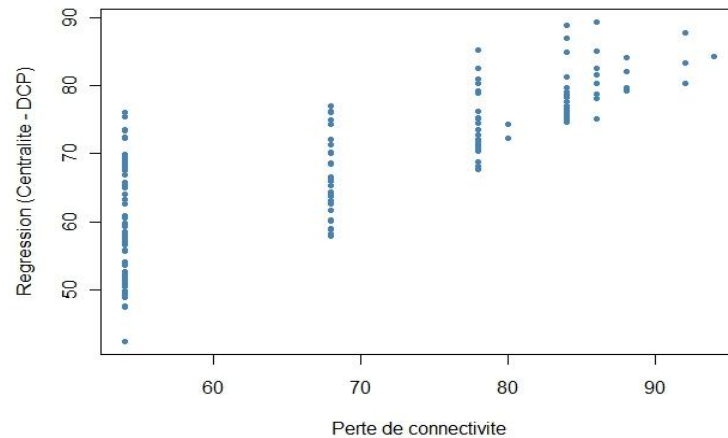


Figure 5.11 : Graphique représentant la corrélation entre la centralité intermédiaire couplée à l'indicateur de DCP et l'indicateur de pertes de connectivité (pour 3 nœuds impliqués).

Cependant, il semble encore difficile de se satisfaire de tels résultats, car il manque objectivement des éléments de compréhension qui permettraient de mieux appréhender *a priori* cette vulnérabilité combinatoire. Ainsi, certaines combinaisons donnent des résultats très inférieurs à ce qui est attendu, comme par exemple les combinaisons impliquant des sommets voisins. L'identification des scénarios critiques semble ainsi se résumer à la recherche de sommets ayant des centralités importantes et des positions clairement différenciées au sein du réseau (*i.e* des combinaisons ayant un indicateur de DCP faible et n'impliquant pas de sommets voisins). Un indicateur de voisinage a donc

été défini, puis couplé aux deux autres indicateurs. Les résultats des corrélations deviennent plus satisfaisants (Tab 5.9) (Fig. 5.12) (Fig. 5.13).

	Estimation	Str. Error	ρ -value	Signification
Centralité	1.13244	0.04496	< 2e-16	***
DCP	- 0.16636	0.02472	7.63e-11	***
Voisinage	-5.24077	0.45772	< 2e-16	***
Multiple R-squared				0.6287

Tableau 5.9 : Corrélation entre la centralité intermédiaire, couplée à l'indicateur de DCP et à l'indicateur de voisinage, et l'indicateur de pertes de connectivité (pour 3 nœuds impliqués).

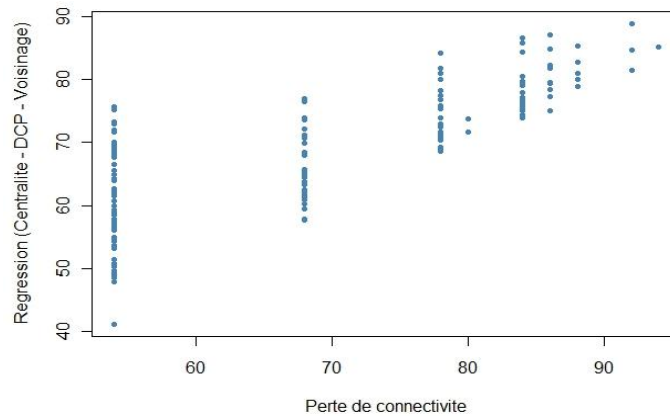


Figure 5.12 : Graphique représentant la corrélation entre la centralité intermédiaire, couplée à l'indicateur de DCP et à l'indicateur de voisinage, et l'indicateur de pertes de connectivité (pour 3 nœuds impliqués).

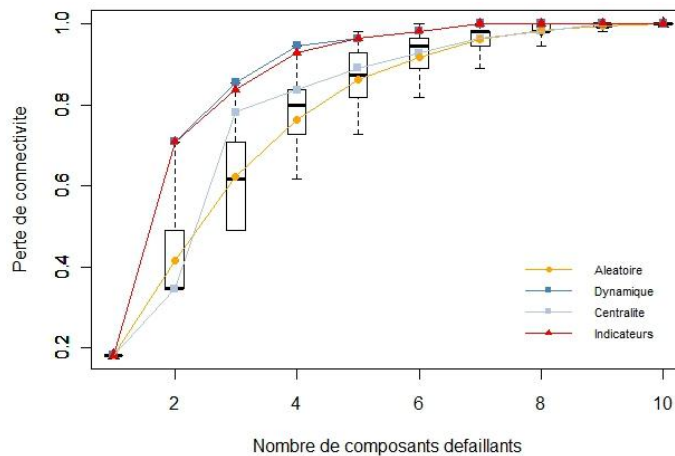


Figure 5.13 : Les scénarios critiques obtenus à partir des indicateurs utilisés sont très proches de ceux obtenus par le calcul dynamique des centralités pour le réseau américain des routeurs.

Bien que les résultats obtenus soient encore imprécis, la détermination de nouveaux indicateurs permet d'émettre des hypothèses sur les caractéristiques *a priori* des composants impliqués dans les scénarios les plus critiques. Ces indicateurs permettent notamment de retrouver les combinaisons (les scénarios) les plus critiques en termes de pertes de connectivité (Fig. 5.13). Pour valider ces premières hypothèses, il est désormais nécessaire de vérifier les résultats sur un plus grand échantillon de réseaux.

Les différents tests effectués semblent indiquer que la centralité intermédiaire des composants est *in fine* un facteur intervenant dans la production des scénarios critiques en termes de pertes de connectivité (Tab. 5.10). Cependant, les corrélations entre la centralité intermédiaire et l'indicateur de pertes de connectivité ne pourraient être aussi fortes si cet indicateur n'était pas couplé avec les deux indicateurs développés dans cette recherche (voir les corrélations pour le réseau carré et le réseau test). En effet, l'indicateur de DCP montre bien que les scénarios critiques impliquent dans la majorité des cas des sommets qui ne tiennent pas le même rôle dans le réseau, d'où la nécessité pour obtenir ces scénarios de recalculer dynamiquement les centralités. De surcroît, l'indicateur de voisinage démontre qu'en fonction du nombre de sommets impliqués dans les scénarios, il peut exister des logiques différentes concernant la production des scénarios les plus critiques (les coefficients des régressions sont parfois positifs et d'autres fois négatifs). Ainsi, contrairement à ce qui a pu être présumé précédemment, des scénarios impliquant des sommets voisins peuvent se révéler critiques en termes de pertes de connectivité.

	Centralité intermédiaire		DCP				Voisinage					
Router USA	***		***	**	.	/	*	.	***			
	2-9		2-5		6	7	8-9		2	3	4-9	
Test	.	***	/	***		**	/	**	***	/	***	
	2	3-20		2	3-19		20	2-3	4	5	6	7-20
Auto Ohio	**	***	/	***		*	*	***				
	2	3-21		2-3	4-20		21	2	3-21			
Carre (3x7)	.	***	/	***		/	/	*	/	***		
	2	3-19		2	3-18		19	2	3	4	4-19	
Auto Fra.Sud	***		***			**	*	***				
	2-19		2-18			19	2	3-19				

Tableau 5.10 : Corrélation entre les trois indicateurs retenus et l'indicateur de pertes de connectivité (en bleu le coefficient de régression est négatif et en rouge il est positif).

Il existe donc différentes stratégies permettant de protéger les infrastructures réseaux contre les scénarios les plus critiques. Plus précisément, deux stratégies émergent dans ces recherches. La première consiste à concentrer les défenses en certaines zones afin de protéger le voisinage de certains nœuds centraux pouvant être facilement déconnectés du réseau. La deuxième stratégie nécessite au contraire de diversifier au maximum les défenses en évitant de cibler le voisinage des nœuds centraux. Cette deuxième stratégie se révèle toujours pertinente dès que le nombre de sommets impliqués dans les scénarios a atteint un certain seuil, tandis que la première stratégie peut se révéler pertinente pour un nombre de sommets plutôt faibles. Dans de prochaines recherches, il sera intéressant

d'étudier les caractéristiques des réseaux (à l'aide des indicateurs alpha, bêta, mu, des distributions des degrés et des centralités...) correspondant à telle logique de protection, pour être ensuite en mesure d'identifier quelle logique de protection adopter *a priori* pour tel type de réseau.

De cette compréhension naissante concernant la vulnérabilité combinatoire des réseaux techniques, il est alors souvent possible de retrouver les scénarios les plus critiques. Ainsi, à partir des indicateurs utilisés, il est possible d'obtenir des scénarios tout aussi critiques que ceux issus d'un calcul dynamique des centralités (Fig. 5.13). De surcroît, contrairement au calcul dynamique des centralités qui ne peut déterminer qu'un scénario jugé critique, les indicateurs retenus permettent d'évaluer l'ensemble des scénarios. Il est alors possible d'identifier une majorité des scénarios se révélant critiques. En l'occurrence, les indicateurs permettent de retrouver près de la moitié des scénarios les plus critiques dans la plupart des cas (Tab. 5.11).

	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Router USA	100%	50%	62,5%	56,5%	-	-	-	-	-
Test	9,1%	13%	27,1%	35,2%	37,6%	47,3%	48,1%	50,6%	52,1%
Auto Ohio	25%	30,6%	46,3%	55,1%	62,5%	-	-	-	-
Auto_Fra_sud	80%	42,4%	55,5%	53,9%	47,9%	43,2%	44%	43,3%	40,9%

Tableau 5.11 : Pourcentage commun entre les scénarios les plus critiques (en l'occurrence les 5% des scénarios les plus critiques) issus du calcul des indicateurs et du calcul de pertes de connectivité en fonction du nombre de composants impliqués dans les scénarios (en rouge les pourcentages <40% en vert les pourcentages >60%).

Malgré des résultats encourageants – relevant ainsi d'une certaine connaissance des mécanismes de perturbation des réseaux – les résultats obtenus restent contradictoires pour des scénarios impliquant peu de composants. En effet, ces résultats apparaissent soit exagérément bons, soit au contraire de très mauvaises qualités (Tab. 5.11). En fait, le type de scénarios qui a servi ici de référence (le calcul dynamique des centralités) n'est vraisemblablement pas toujours optimum pour des graphes comportant un nombre relativement important de sommets (Fig. 5.5). Ainsi, ce type de scénarios devient critique à partir d'un certain seuil de sommets impliqués dans les scénarios. Or, ce seuil – bien que pouvant être faible – peut si le graphe est grand impliquer un nombre relativement important de nœuds.

Par exemple, pour le réseau internet américain, le seuil (pourtant faible de 1%) à partir duquel les scénarios issus du calcul dynamique des centralités peuvent être considérés comme critiques implique tout de même une trentaine de nœuds (Crucitti et al., 2004). Avant ce seuil, ces scénarios sont relativement inoffensifs. Ils sont ainsi équivalents à des scénarios choisis aléatoirement. La probabilité que trente nœuds

dysfonctionnent sans qu'il y ait eu d'effets dominos est alors très faible, relativisant dès lors l'impact de ces scénarios critiques en termes de pertes de connectivité.

Pour le réseau autoroutier français simplifié, qui comporte 57 nœuds, il faut perturber au minimum 5 nœuds pour que ce type de scénarios se révèle critique (*i.e.* 8% des nœuds) (Fig. 5.14). C'est pourquoi, les résultats des régressions sont relativement mauvais pour un nombre faible de composants impliqués dans les scénarios ($P < 50\%$), mais deviennent d'une meilleure qualité dès que ce nombre augmente ($P > 75\%$) (Tab. 5.12). Ainsi, bien que les scénarios critiques soient généralement retrouvés à l'aide des indicateurs développés, un effet d'échelle – consécutif au choix initial d'analyser des graphes de petites tailles afin de pouvoir recenser exhaustivement les scénarios – masque une réalité plus complexe.

	$P < 25\%$	$25\% \leq P < 50\%$	$50\% \leq P < 75\%$	$P > 75\%$
Router USA	-	-	2 ; 9	3-8
Test	2-3	4-5	6-9 ; 18-20	10-17
Auto Ohio	-	2-3 ; 20-21	4-6 ; 15-19	7-14
Carré (3x7)	2-3	4-5	6-8 ; 18-19	9-17
Auto_Fra_sud	-	18-19	2-4 ; 12-17	5-11

Tableau 5.12 : Résultats des régressions entre les trois indicateurs retenus et l'indicateur de pertes de connectivité en fonction du nombre de composants impliqués dans les scénarios.

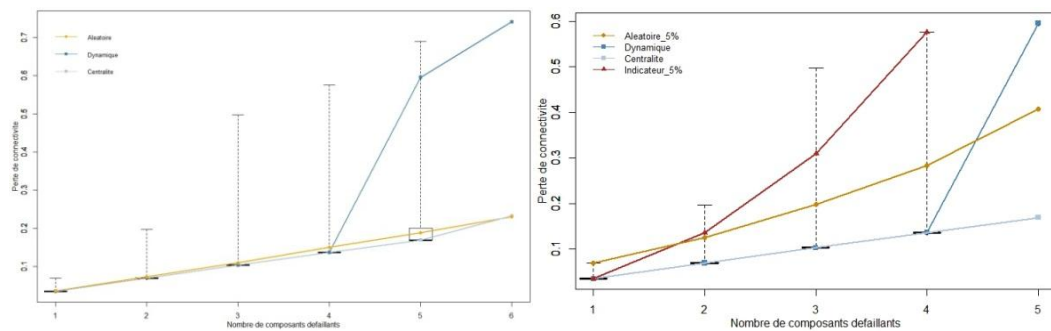


Figure 5.14 : Différents types de scénarios de défaillances appliqués au réseau autoroutier français. Le calcul dynamique des centralités montre ses limites.

Pour un nombre restreint de composants impliqués dans les scénarios de défaillance, les tests statistiques réalisés sur le réseau autoroutier français – réseau deux fois plus grand que ceux étudiés précédemment – confirment que les corrélations sont faibles (voire nulles) entre la centralité intermédiaire et l'indicateur de pertes de connectivité. Dans un premier temps, la centralité des composants n'intervient donc pas dans la production des scénarios critiques. Un indicateur comme le DCP se révèle alors davantage corrélé. Plus généralement, en fonction du nombre de composants impliqués dans les scénarios, les logiques de perturbation semblent une nouvelle fois différentes.

Ainsi, les composants impliqués dans les scénarios les plus critiques en termes de pertes de connectivité varient en fonction du nombre de composants impliqués dans ces scénarios. Il est donc difficile de déterminer quelles sont les caractéristiques des composants impliqués *a priori* dans la production de ces scénarios les plus critiques.

Ce dernier constat n'est pas tellement étonnant. En effet, en ce qui concerne des graphes d'une taille relativement faible, il a été montré qu'il existe au minimum deux logiques expliquant la production des scénarios critiques. Il n'est donc pas anormal qu'il puisse exister d'autres logiques pour des graphes possédant un nombre plus important de composants. Si l'objectif est de se protéger contre les scénarios critiques impliquant un nombre limité de nœuds comparativement à la taille du graphe, il serait alors assez trompeur de se focaliser uniquement sur les nœuds centraux. Plus précisément, en termes de pertes de connectivité, il semble nécessaire de se détacher de ce paradigme de gestion tendant à protéger prioritairement les composants centraux. D'ailleurs, ces composants centraux font généralement l'objet d'une attention particulière pour des raisons diverses tout à fait légitimes.

Concrètement, pour illustrer la nécessité de repenser ce paradigme de protection, les résultats des graphes du réseau autoroutier français et ceux de la ville d'Indianapolis ont fait l'objet d'une synthèse, afin d'identifier les composants les plus problématiques (*i.e.* les nœuds régulièrement impliqués dans la production des scénarios les plus critiques en termes de pertes de connectivité). Il s'agit, en quelque sorte, d'une évaluation synthétique de la vulnérabilité combinatoire au niveau des composants, en l'occurrence des sommets, et non plus seulement au niveau des scénarios. Ainsi, pour chaque nœud, le nombre d'occurrence parmi les scénarios les plus critiques – et ce dans un premier temps pour un nombre défini de composants défaillants – est comptabilisé (Fig. 5.15).

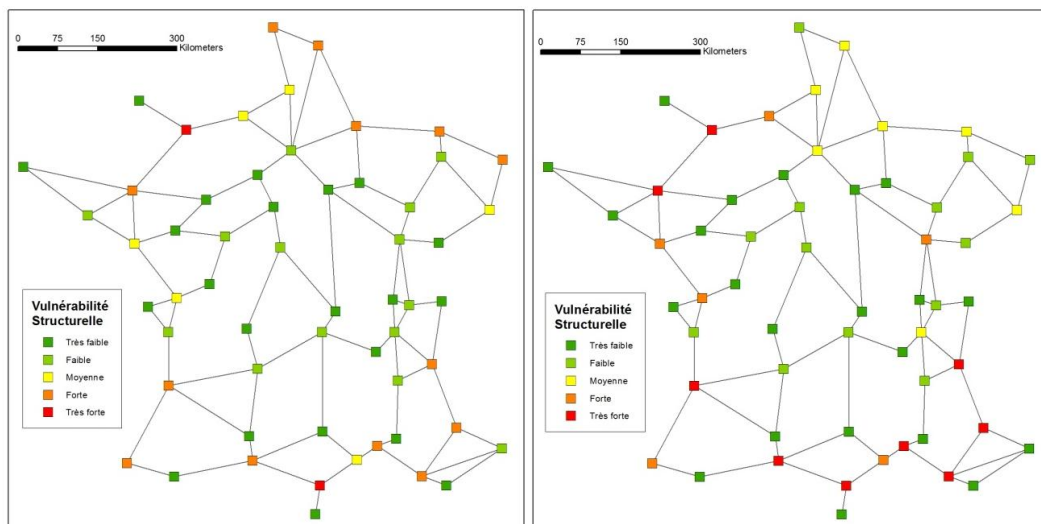


Figure 5.15 : Cartes de vulnérabilité combinatoire pour un nombre donné de composants impliqués. A gauche le réseau autoroutier français pour des scénarios impliquant trois nœuds. A droite le réseau autoroutier français pour des scénarios impliquant quatre nœuds.

Puis, pour avoir une vision synthétique de ces différentes évaluations, il est alors nécessaire d'agréger les résultats afin d'identifier les nœuds régulièrement impliqués dans les scénarios critiques et ce quel que soit le nombre de composants impliqués (Fig. 5.16). Or, dans les faits, les scénarios impliquant peu de composants ont des probabilités d'occurrence (*i.e.* des probabilités de se réaliser) plus fortes que ceux impliquant de nombreux composants. Par conséquent, des critères de pondération ont été définis afin de tenir compte de cette réalité. Plus précisément, il a été considéré qu'un scénario impliquant un seul composant a deux fois plus de chance de se produire qu'un scénario impliquant deux composants, trois fois plus de chance de se produire qu'un scénario impliquant trois composants...

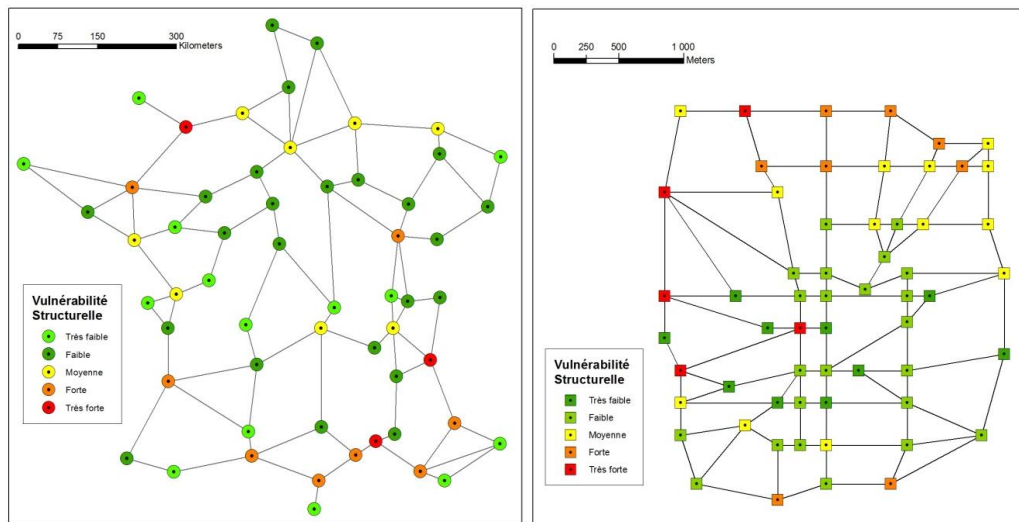


Figure 5.16 : Les résultats agrégés des vulnérabilités combinatoires au niveau des sommets. A gauche le réseau autoroutier français simplifié. A droite le réseau routier d'Indianapolis.

A l'aide de ces exemples, on constate que les nœuds les plus critiques sont dans la plupart des cas situés en bordure de graphe. C'est pourquoi, à partir de ces analyses, trois principes fondamentaux ont été identifiés afin de protéger au mieux les composants d'un réseau en fonction de leur vulnérabilité combinatoire. Ces principes diffèrent dès lors du simple paradigme de la centralité. Ils correspondent à une approche plus subtile.

Premièrement, il convient de différencier les stratégies en fonction du nombre de sommets impliqués dans les scénarios à gérer (en tenant éventuellement compte de leur probabilité d'occurrence), puisque les logiques de protection peuvent être radicalement différentes selon ce nombre. Il faut donc mettre en place des modes de gestion différenciés selon la nature des scénarios envisagés. Ainsi, pour le réseau autoroutier français, il commence à devenir justifié de protéger des villes comme Paris ou Lyon à partir de 4 composants défaillants, ce qui n'est nullement le cas lorsque 3 composants sont défaillants.

Deuxièmement, il convient, si le nombre de nœuds impliqués dans les scénarios est faible, de ne pas se focaliser uniquement sur les nœuds centraux. En l'occurrence, il

convient plutôt de se focaliser sur les nœuds périphériques, c'est-à-dire sur les nœuds qui délimitent la frontière du graphe (pour les autoroutes : Dijon, Toulouse, Reims, Rennes, Bordeaux...). Ces nœuds peuvent d'ailleurs aussi être considérés comme centraux, mais cela ne constitue pas leur caractéristique première (Dijon, Toulouse, Montpellier, Bordeaux...), cette conjonction met alors plutôt en exergue la vulnérabilité du graphe étudié. De plus, les points d'articulation du réseau – c'est-à-dire les sommets, qui s'ils sont retirés, engendrent la création d'une nouvelle composante connexe – doivent faire l'objet d'une attention particulière (Caen et Narbonne).

Troisièmement, il convient d'analyser les faces du graphe – c'est-à-dire d'analyser le graphe dual au sens mathématique du terme – afin de déterminer pour les nœuds n'étant pas en périphérie du graphe, leur position relative par rapport à ces bordures (Fig. 5.17). Ainsi, il devient possible de comptabiliser le nombre de composants minimums nécessaires à impliquer dans un scénario pour qu'un composant puisse être éventuellement impliqué dans un scénario critique.

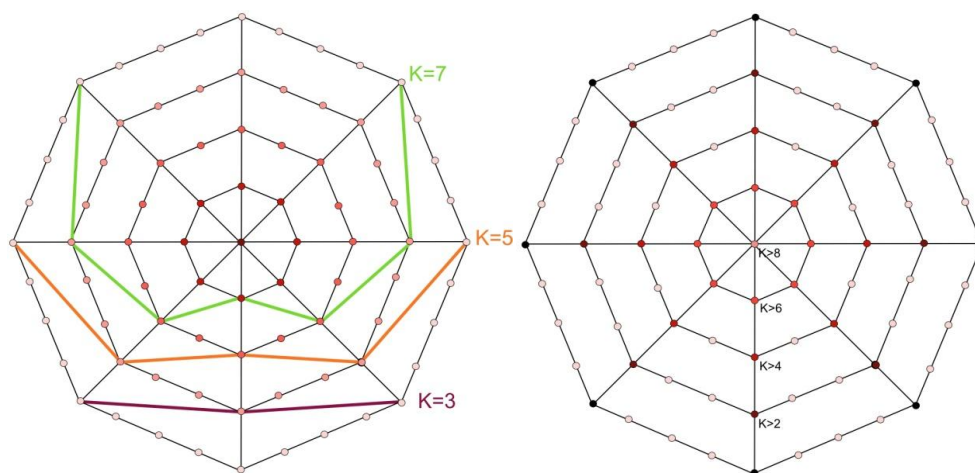


Figure 5.17 : A gauche la centralité des sommets et des exemples de scénarios critiques. Dans ce cas, plus la centralité d'un sommet est élevée (en rouge foncé) plus le nombre de composants devant être impliqués dans un scénario pour que ce sommet soit impliqué dans un scénario critique doit aussi être élevé. A droite le nombre à partir duquel un sommet peut être impliqué dans un scénario critique.

Pour conclure, en termes de vulnérabilité structurelle (que ce soit pour la vulnérabilité élémentaire ou la vulnérabilité combinatoire) des réseaux techniques, il ne faut pas trop exagérer l'importance des composants centraux. Les composants à l'allongement moyen local important, les sommets situés en bordure de graphes, les points d'articulation se révèlent en réalité parfois plus critiques, notamment lorsqu'il s'agit de se focaliser sur des phénomènes extrêmes impliquant un nombre relativement peu élevé de sommets. Dans les faits, la vulnérabilité structurelle avérée de certains points centraux au sein d'un graphe révèle davantage la fragilité de ce graphe, plutôt qu'une nécessaire corrélation entre la centralité des composants et leur vulnérabilité structurelle (Fig. 5.17). Cette fragilité du graphe peut alors s'expliquer par des contraintes physiques, politiques, économiques et sociales. Enfin, il convient de ne pas négliger

l'importance du choix de l'indicateur de référence (qui permet d'évaluer la vulnérabilité structurelle), les conclusions des analyses pouvant être amenées à changer en fonction de celui-ci.

L'analyse de la vulnérabilité structurelle des réseaux techniques se révèle donc complexe mais très instructive. En effet, il existe plusieurs manières d'appréhender cette analyse. Ces différentes appréhensions mènent alors logiquement à des résultats pouvant être sensiblement différents. Ainsi, il n'existe pas un indicateur de référence unanimement reconnu afin d'évaluer la vulnérabilité structurelle d'un réseau, or le choix de cet indicateur n'est pas neutre. Quoiqu'il en soit, les analyses menées dans cette recherche interrogent les stratégies de protection qui se focalisent uniquement sur les composants les plus centraux. En effet, si intuitivement ces composants peuvent apparaître prioritaires, l'expérience montre que cette importance est très relative. Dans un premier temps, la centralité intermédiaire est une caractéristique explicative importante lorsqu'il s'agit d'analyser la vulnérabilité élémentaire (synonyme ici de pertes d'efficacité) et la vulnérabilité combinatoire (synonyme ici de pertes de connectivité). Cependant, dans un deuxième temps, cet indicateur offre une compréhension fondamentalement restreinte de ces vulnérabilités. Par conséquent, pour obtenir de bonnes corrélations, il faut généralement combiner cet indicateur avec d'autres indicateurs. Finalement, ces analyses ont permis de mettre en avant certains indicateurs et certains questionnements qui se révéleront importants pour la suite de cette recherche.

5.3 ÉVALUER LA REDONDANCE AU SEIN D'UN RESEAU TECHNIQUE

Il a été souligné dans la méthodologie d'analyse de la résilience des réseaux techniques que la redondance est une des caractéristiques principales d'un réseau résilient. Ainsi, les capacités d'absorption, qu'il s'agit ici d'évaluer, repose sur l'évaluation de cette redondance. Il est alors nécessaire de rechercher des indicateurs permettant d'identifier les parties plus ou moins redondantes au sein d'un réseau. Cependant, la revue des indicateurs réalisés et les recherches entreprises concernant la vulnérabilité structurelle des réseaux techniques n'ont pas mis en exergue de tels indicateurs. D'ailleurs, il n'existe pas, à proprement dit, d'indicateurs de redondance reconnus. L'objectif est alors de reprendre certains indicateurs déjà présentés. Néanmoins, comme ces indicateurs n'apparaissent pas complètement satisfaisants, il s'est trouvé nécessaire d'en définir de nouveaux.

5.3.1 Les indicateurs existants

La solution la plus intuitive pour appréhender les questions de redondance au sein d'un graphe est d'adopter une logique de chemin (*i.e.* une logique relationnelle). Ainsi, il ne peut y avoir redondance que si et seulement si une relation entre un composant A et un composant B n'est pas unique. Dans une même continuité, plus le nombre de relations reliant A et B est important, plus la redondance est importante. En cela, la redondance est une propriété structurelle d'un graphe pouvant être caractérisée à l'aide d'une logique relationnelle. C'est pourquoi, la redondance peut être évaluée au niveau élémentaire (*i.e.* au niveau d'un sommet ou d'un arc) ou au niveau global en agrégeant les résultats. En outre, cette propriété structurelle des réseaux techniques se différencie plus ou moins sensiblement de la densité, de la transitivité ou de la connectivité.

Autrement dit, la redondance se caractérise par l'existence d'alternatives à des chemins préférentiels (*i.e.* des chemins maximisant une certaine fonction d'utilité comme par exemple les plus courts chemins). Cependant, plus les chemins analysés sont longs, plus il est probable qu'il existe de nombreuses alternatives très similaires (les nœuds et les sommets empruntés par ces alternatives sont alors presque identiques). Or, la redondance implique intuitivement une certaine indépendance entre les alternatives. C'est pourquoi, la redondance est souvent associée à l'existence de « chemins indépendants », c'est-à-dire à l'existence de chemins se différenciant complètement par les nœuds et les sommets empruntés (Dueñas-Osorio, 2005) [16]. Quels sont alors les indicateurs issus de la théorie des graphes permettant d'évaluer la redondance au sein d'un graphe ?

$$a = p(x_i, \dots, x_k) = \{n_1\} \text{ et } b = p(x_i, \dots, x_k) = \{n_2\} \text{ sont indépendants } \Rightarrow \{n_1\} \cap \{n_2\} = \{x_i, x_k\} \text{ avec } i \neq k \quad [16]$$

Où a et b sont des chemins composés par un ensemble de sommets $p(x_i, \dots, x_k)$ correspondant respectivement aux ensembles $\{n_1\}$ et $\{n_2\}$.

Comme le nombre de chemins indépendants entre deux points correspond au maximum au degré d'un des deux sommets de ce couple (en l'occurrence au degré minimum de ce couple) [17], l'idée que le degré d'un sommet puisse permettre d'évaluer la redondance du graphe en ce sommet peut paraître satisfaisante dans une première approche.

$$I(v, j) \leq \text{Min} [d(v) ; d(j)] \quad [17]$$

Où $I(i, j)$ est le nombre de relations indépendantes entre v et j , $d(v)$ est le degré de v .

Cependant, cette mise en relation entre le degré des sommets et la redondance d'un graphe est très restrictive, car trop simplificatrice. Pour illustrer cette insuffisance, il est possible d'analyser les graphes connexes les moins redondants possibles : les arbres. En effet, un arbre possède la particularité suivante : chacun de ses sommets n'est connectable à un autre sommet que par un unique chemin. Ainsi, il n'existe aucune alternative à la

suppression d'un arc. Or, il existe des arbres dont les configurations sont amplement différentes. Ces différences peuvent alors être caractérisées par des variations importantes du degré moyen (Fig. 5.18).

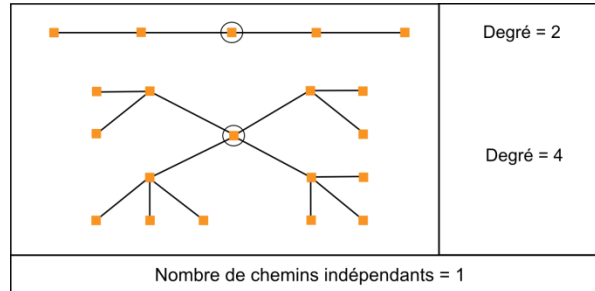


Figure 5.18 : Le degré d'un sommet ne peut à lui seul caractériser la redondance d'un réseau.

Un autre indicateur, apparu plus récemment, cherche précisément à calculer la redondance d'un réseau : le *redundancy ratio* (Dueñas-Osorio, 2005). C'est le seul indicateur spécifique en la matière. La redondance correspond alors au nombre de relations indépendantes permettant d'aller d'un point aux voisins des voisins de ce point (Fig. 5.19). Ce nombre est ensuite normalisé par le nombre total de relations indépendantes si le graphe était complet (graphe où tous les points du graphe sont reliés entre eux) [18].

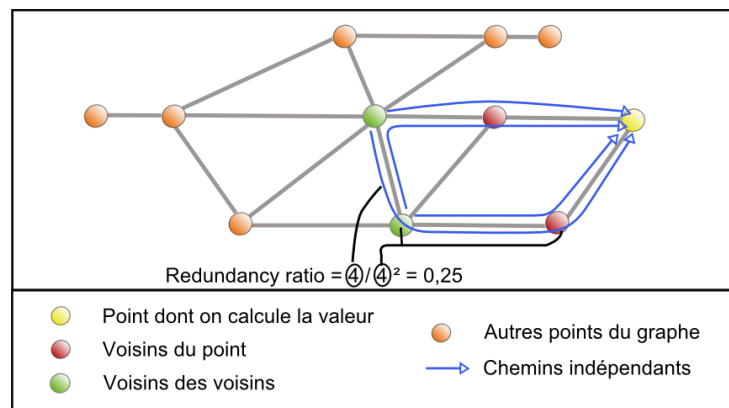


Figure 5.19 : Le redundancy ratio.

$$Rr(v) = \frac{1}{(|S| - 1)^2} \sum_{j \in \Gamma^2(v); j \neq v} I(v, j) \tag{18}$$

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

La mise en pratique de cet indicateur donne des résultats intéressants pour traiter la redondance d'un graphe dans son ensemble. Ainsi, en effectuant la moyenne des résultats obtenus en chacun des sommets d'un graphe, cet indicateur permet de

différencier des graphes linéaires, carrés ou complets (Duenas-Osario, 2005). Cependant, quelques incohérences demeurent (Fig. 5.20).

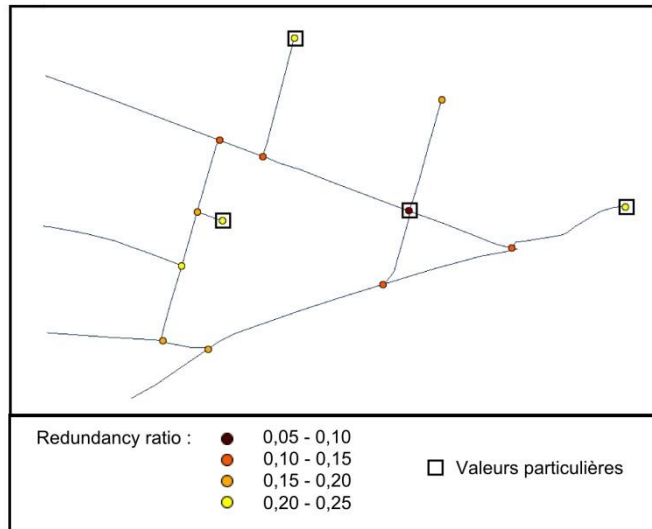


Figure 5.20 : Les résultats du redundancy ratio sont parfois incohérents.

Les points entourés (Fig. 5.20) attirent l'attention. En effet, des sommets pendants apparaissent très redondants et des points d'articulation apparaissent au contraire très peu redondants. Dans les faits, ils sont l'expression des cas soulignés ci-dessous (Fig. 5.21).

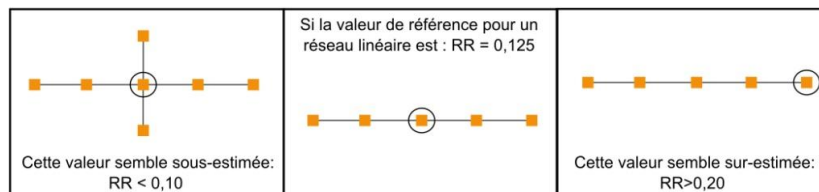


Figure 5.21 : Trois cas où le redundancy ratio souligne davantage le nombre de composantes connexes créées en cas de suppression du sommet entouré (4 à gauche, 2 au centre, 1 à droite) plutôt que la redondance du réseau (plus la valeur baisse plus le nombre de composantes connexes augmente mais la redondance reste inchangée).

Ainsi, dans les trois cas présentés, il est anormal d'obtenir des valeurs aussi différentes alors même que les trois sommets appartiennent à des arbres. Dans le cas de base (au centre de la figure 5.22), une valeur de référence est obtenue pour un réseau linéaire. Or, pour le sommet pendant (à droite sur la figure 5.22) 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 5.22), 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), ce qui ne concerne plus les questions de redondance.

Le *clustering coefficient* – pouvant être traduit par coefficient de regroupement ou coefficient d'agglomération – ou *transitivity* est utilisé pour étudier les structures locales robustes (Watts & Strogatz, 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. Pour cela, l'indice de *clustering* d'un sommet mesure le degré de transitivity autour de ce sommet, correspondant au nombre de relations entre les voisins de ce sommet [19] (Fig. 5.22).

$$\gamma(v) = \frac{E[\Gamma(v)]}{\frac{1}{2} d(v)[d(v) - 1]} \quad [19]$$

Où $\gamma(v)$ est le *clustering coefficient*, $E[\Gamma(v)]$ est le nombre d'arcs entre les voisins de v , $d(v)$ est le degré de v .

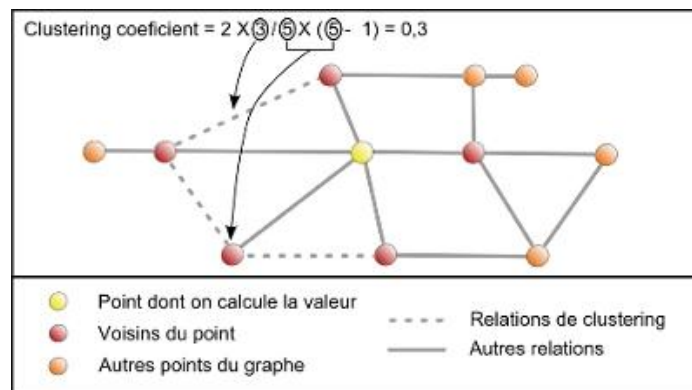


Figure 5.22 : Calcul du clustering coefficient

Or, cet indicateur ne permet pas de différencier les structures non robustes. Par exemple, pour cet indicateur un réseau au maillage carré – maillage courant pour les infrastructures réseaux – est considéré comme une structure non robuste, car il n'existe aucune arête entre les voisins d'un sommet (Fig. 5.23).

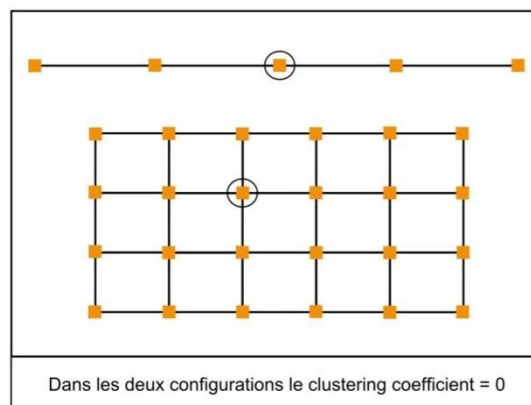


Figure 5.23 : Le *clustering coefficient* ne permet pas de distinguer des structures usuelles (courantes) concernant les réseaux techniques.

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. Comme souligné précédemment, la normalisation du *clustering coefficient* n'est pas adaptée aux réseaux techniques. Dans notre cas, ce coefficient ne peut pas être utilisé, même s'il est possible d'assouplir la normalisation (Buhl et al., 2006).

5.3.2 De nouveaux indicateurs pour évaluer la redondance au sein d'un graphe

Le postulat retenu ici est le suivant : analyser la redondance au sein 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 la redondance sera jugée forte. Une solution pour calculer la redondance au sein d'un graphe peut alors consister à calculer la moyenne du nombre de chemins indépendants entre un sommet et les autres sommets du graphe. Comme cet indicateur essaye de caractériser la redondance à proximité d'un sommet donné, afin de différencier des parties plus ou moins redondantes au sein d'un graphe, cette moyenne peut être circonscrite à ses sommets voisins [20]. Plus précisément, il est proposé dans cette recherche, comme pour le *redundancy ratio*, de travailler à l'échelle des voisins des voisins du sommet concerné. Cet indicateur sera nommé par la suite : le nombre de chemins indépendants moyen local (*Cml*) [20].

$$Cml(v) = \frac{1}{V[\Gamma^2(v)]} \sum_{j \in \Gamma^2(v); j \neq v} I(v, j) \quad [20]$$

Où *Cml(v)* est le nombre de chemins indépendants moyen local, $V[\Gamma^2(v)]$ est le nombre de voisins des voisins de *v*, $I(v, j)$ est le nombre de relations indépendantes entre *v* et *j*.

La redondance au sein d'un graphe doit aussi tenir compte des alternatives existantes en cas de suppression de ce sommet. En effet, un réseau redondant doit être en mesure de réorienter les flux suite à la défaillance d'un de ses composants. 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, il est possible d'effectuer la moyenne du nombre de chemins indépendants entre les voisins du sommet analysé, en cas de suppression de ce sommet [21].

$$Aml(v) = \frac{1}{(V[\Gamma^2(v)])(V[\Gamma^2(v)] - 1)} \sum_{i, j \in \Gamma^2(v); i, j \neq v} I(i, j) \quad [21]$$

Où *Aml(v)* est l'indicateur d'alternatives moyen à un sommet, $V[\Gamma^2(v)]$ est le nombre de voisins des voisins de *v*, $I(i, j)$ est le nombre de relations indépendantes entre *i* et *j*.

Le choix consistant à analyser la redondance au sein d'un graphe en s'appuyant sur les voisins des voisins de chaque sommet est en partie arbitraire (Fig. 5.24). En effet, il tout à fait possible de reprendre les indicateurs développés ci-dessus afin de travailler à une autre échelle topologique. Ce choix a été dicté par la volonté de s'assurer de toujours travailler à une échelle pouvant être considérée comme locale (et ce quel que soit le graphe analysé), cette échelle étant de surcroît différente du voisinage direct d'un sommet (échelle sur laquelle certains indicateurs se focalisent déjà : le degré, le *clustering coefficient*...). Afin de compenser cet écueil, il est possible d'évaluer ces indicateurs pour différents niveaux de voisinage, puis d'agréger les résultats (en accordant par exemple plus d'importance aux sommets voisins « les plus proches »).

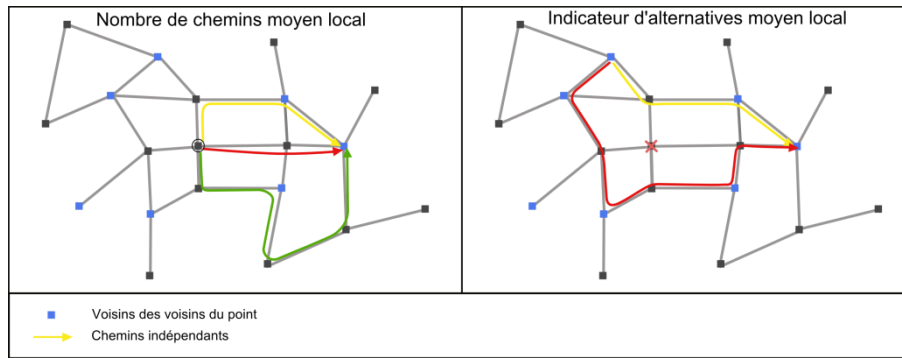


Figure 5.24 : Les deux nouveaux indicateurs développés pour analyser la redondance au sein d'un graphe. A droite le nombre de chemins indépendants moyen local et à gauche l'indicateur d'alternatives moyen local à un sommet.

Dans un graphe connexe, pour tout couple de sommets, il existe toujours un chemin optimal (en l'occurrence ici un plus court chemin), les autres chemins constituant alors des alternatives plus ou moins efficaces à ce chemin optimal. Or, l'efficacité des alternatives n'est pas prise en compte par le nombre de chemins indépendants moyen local et l'indicateur d'alternatives moyen local. Ce sont des indicateurs purement topologiques qui ne tiennent pas compte de la qualité des chemins alternatifs. La qualité d'un chemin alternatif est définie ici comme la différence entre la longueur du plus court chemin et celle du chemin alternatif. Ainsi, plus cette différence est importante, plus la qualité de l'alternative est moindre. Il est donc proposé de pondérer les deux indicateurs développés afin de tenir compte de la qualité des alternatives [22] [23].

$$Cmlp(v) = \frac{1}{V[\Gamma^2(v)]} \sum_{j \in \Gamma^2(v); j \neq v} \frac{\sigma(I(v, j))}{\text{Min}(\sigma(I(v, j)))} \quad [22]$$

$$Amlp(v) = \frac{1}{(V[\Gamma^2(v)])(V[\Gamma^2(v)] - 1)} \sum_{i, j \in \Gamma^2(v); i, j \neq v} \frac{\sigma(I(i, j))}{\text{Min}(\sigma(I(i, j)))} \quad [23]$$

Où $Cmlp$ est le nombre de chemins indépendants moyen local pondéré, $Amlp$ est l'indicateur d'alternatives moyen local pondéré, $\sigma(I(v, j))$ est la distance d'un chemin indépendant entre v et j .

Néanmoins, selon les réseaux techniques la relation aux distances n'est pas la même (Gastner & Newman, 2005). En effet, pour certains réseaux techniques les distances topologiques sont parfois plus importantes que les distances euclidiennes. Afin de généraliser les indicateurs développés, il semble alors intéressant d'avoir recours à une distance (longueur) effective D^* tel que pour un arc i,j :

$$D_{i,j}^* = \gamma D_{i,j} + (1 - \gamma) \quad \text{avec } \gamma \in [0;1] \quad [24]$$

Où $D_{i,j}^*$ est la distance effective d'un arc i,j , $D_{i,j}$ est une distance euclidienne et γ un coefficient accordant une plus ou moins grande importance aux distances euclidiennes.

Pour obtenir un indicateur synthétique de redondance, les deux indicateurs développés peuvent être agrégés. Pour cela, une fonction d'agrégation [26] a été retenue ainsi qu'un critère de normalisation [25]. Cette fonction d'agrégation consiste à retenir l'indicateur normalisé le plus faible. En effet, l'objectif de cet indicateur synthétique est notamment d'identifier les parties les moins redondantes au sein d'un réseau pouvant être mis en évidence par au moins l'un des deux indicateurs. Le choix d'une fonction d'agrégation plus classique, comme une moyenne arithmétique ou une moyenne géométrique, implique généralement qu'un indicateur peut compenser l'autre, ce qui n'est précisément pas le cas ici.

$$\underline{I}Norm = (Indicateur - Min [indicateur]) / (Max [indicateur] - Min [indicateur]) \quad [25]$$

$$IRL(v) = Min [normalisation(Cmlp(v)) ; normalisation(Amlp(v))] \quad [26]$$

Dans le cas particulier des réseaux techniques, l'approche ci-dessus peut être spécifiée en ayant recours à des classifications préalablement définies pour chacun des indicateurs en lieu et place des normalisations préconisées précédemment [27].

$$IRL(v) = Min [classification(Cmlp(v)) ; classification(Amlp(v))] \quad [27]$$

En effet, pour chaque indicateur, il est possible de déterminer *a priori* les valeurs permettant d'évaluer la redondance au sein d'un réseau (5.3.3). Cette dernière approche permet de comparer plus aisément les résultats obtenus pour différents réseaux techniques, puisque les résultats finaux ne dépendent pas des valeurs maximales et minimales de chaque réseau.

5.3.3 Test et validation de ces nouveaux indicateurs

Les indicateurs présentés ci-dessus ont tout d'abord été testés sur des réseaux théoriques. Ces tests permettent de vérifier si les résultats obtenus concordent bien avec

l'objet de la mesure. Ici, deux tests effectués sur deux réseaux théoriques sont présentés : un réseau au maillage linéaire et un réseau au maillage carré. Les valeurs des deux indicateurs permettent alors clairement d'identifier les différences de redondance entre les deux réseaux (voir les valeurs moyennes et médianes) (Fig. 5.25 et Fig. 5.26). Ainsi, le nombre de chemins indépendants moyen local met bien en évidence les spécificités d'un réseau arborescent (valeur=1 et écart-type=0) (Fig. 5.25). Tandis que l'indicateur d'alternatives moyen local à un sommet permet d'identifier les différentes configurations locales au sein des deux réseaux. 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. 5.26).

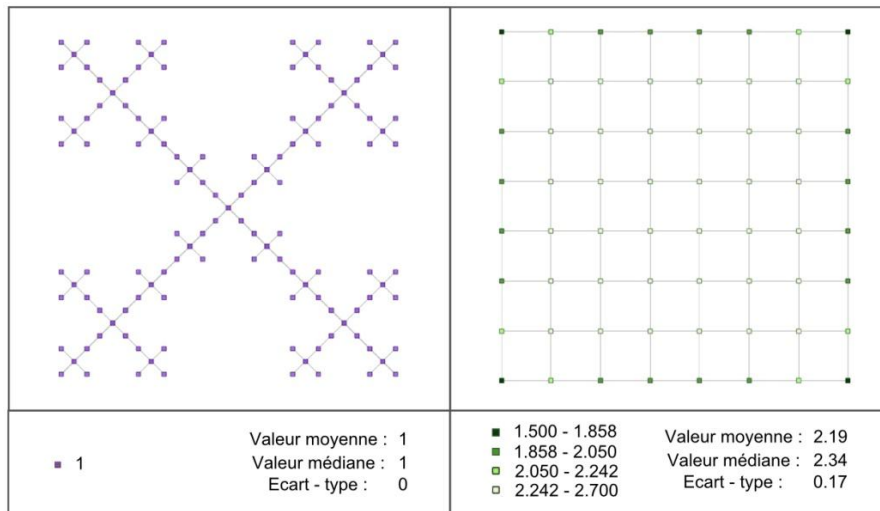


Figure 5.25 : Test du nombre de chemins indépendants moyen local.

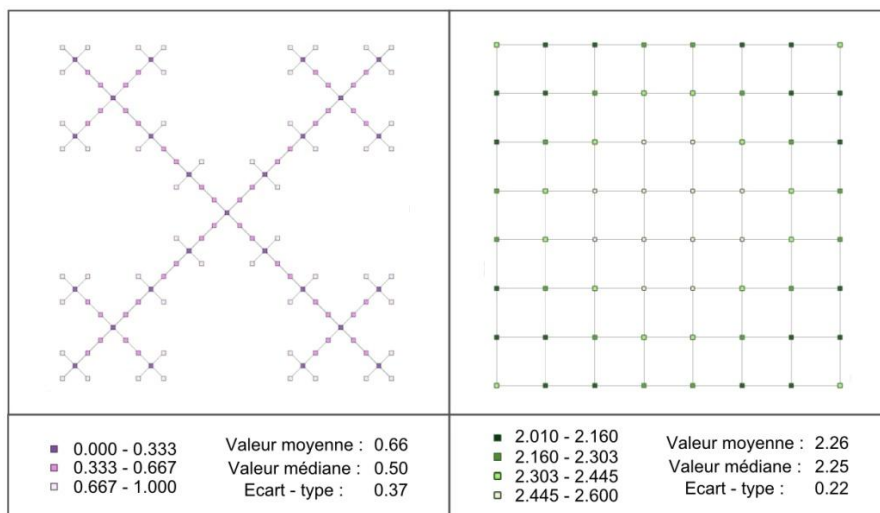


Figure 5.26 : Test de l'indicateur d'alternatives moyen local.

Les classifications utilisées ici pour l'agrégation des deux indicateurs s'appuient sur une connaissance des valeurs extrêmes obtenues pour des réseaux pouvant être définis

comme redondants ou au contraire comme peu redondants. Ainsi, pour un réseau routier, la classification minimale peut correspondre aux valeurs obtenues pour un réseau de type arborescent, jugé alors comme très peu redondant ($C_{mlp} < 1.25$ ou $I_{amp} < 0.75$), et la classification maximale peut correspondre aux valeurs obtenues pour un réseau au maillage carré, jugé comme plutôt redondant ($C_{mlp} > 1.75$ et $I_{amp} > 1.50$) (Fig. 5.27). A partir de ces deux classes extrêmes, deux autres classes ont été déterminées en suivant une logique de classification par intervalle égal (exemple pour C_{mlp} - classe 1 : $C_{mlp} \leq 1.25$; classe 2 : $1.25 < C_{mlp} \leq 1.50$; classe 3 : $1.50 < C_{mlp} \leq 1.75$; classe 4 : $C_{mlp} > 1.75$).

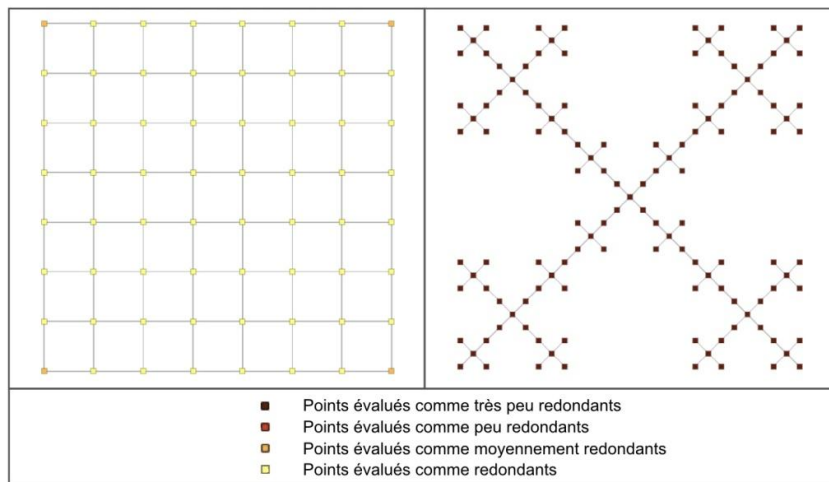


Figure 5.27 : Agrégation des indicateurs de redondance (A droite un réseau redondant à maille carré et à gauche un réseau très peu redondant de type arborescent).

L'application de ces indicateurs sur le réseau routier de la communauté d'agglomération d'Orléans démontre alors leur pertinence (Fig. 5.28).

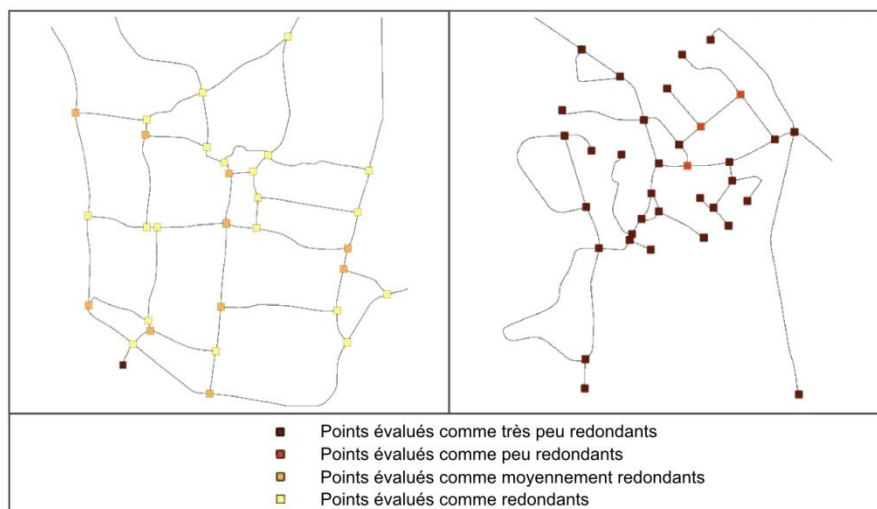


Figure 5.28 : Mise en pratique des indicateurs de redondance au réseau routier de la communauté d'agglomération de la ville d'Orléans (A droite la ville de Bou à gauche celle de Chanteau).

En effet, le réseau routier de la communauté d'agglomération d'Orléans possède plus de 10 000 sommets, il est ainsi strictement impossible de détecter visuellement la particularité de la configuration du centre-ville de Chanteau (réseau exceptionnellement peu redondant en comparaison aux autres villes de la communauté d'agglomération d'Orléans), cette ville étant, au même titre que la ville de Bou, d'une taille marginale par rapport à l'ensemble du réseau de l'agglomération (Fig. 5.28). Or, c'est précisément ce que les indicateurs ont pu révéler. Enfin, cette application démontre que l'indicateur synthétique développé permet d'aller au-delà de la simple reconnaissance des sommets pendants (exemple de la ville de Bou), pour identifier *in fine* des structures non redondantes plus complexes (exemple de la ville de Chanteau).

Les indicateurs « traditionnels » de la théorie des graphes ne sont pas apparus satisfaisants pour évaluer la redondance au sein d'un graphe. En effet, dans cette optique, ils présentent tous certaines incohérences. Il a donc semblé nécessaire de préciser de manière plus formelle la notion de redondance. Ainsi, dans cette recherche, la redondance fait expressément référence à l'existence de « chemins indépendants » entre des paires de sommets. A partir de ce postulat, deux indicateurs ont été développés afin d'évaluer la redondance au sein d'un graphe. Ces deux indicateurs peuvent alors être agrégés pour obtenir un indicateur synthétique. L'utilisation de ces indicateurs sur des réseaux théoriques a permis de vérifier leur cohérence et l'application de ceux-ci sur le réseau viaire de l'agglomération d'Orléans a permis de démontrer leur pertinence.

5.4 SYNTHÈSE DU CHAPITRE 5

L'analyse des propriétés structurelles des réseaux techniques constitue un enjeu majeur pour la recherche engagée. En effet, l'approche structurelle, en permettant des analyses plus « explicatives » que « prédictives », conduit à une compréhension des mécanismes d'endommagement de ces réseaux techniques.

Cette partie insiste alors particulièrement sur l'importance accordée jusqu'à présent aux indicateurs de centralité, et plus précisément à l'indicateur de centralité intermédiaire, en matière d'analyse de la vulnérabilité structurelle des réseaux techniques. Cependant, les développements menés dans cette recherche tendent à relativiser leur importance. Ainsi, pour analyser la vulnérabilité structurelle en termes de pertes d'efficacité ou de pertes de connectivité, d'autres indicateurs se révèlent pertinents à évaluer (indicateur de redondance, indicateur de différenciation de chemins préférentiels (DCP), indicateur de voisinage, allongement moyen local...). Par la suite, cette recherche ne pourra limiter l'analyse structurelle des réseaux techniques à une analyse de la centralité intermédiaire. Il sera ainsi nécessaire de toujours proposer des alternatives à un calcul de centralité afin de faire émerger des indicateurs

complémentaires pouvant relativiser les résultats obtenus avec ces indicateurs de centralité. Cette attitude sera adoptée pour tous les indicateurs structurels implémentés afin de ne pas abolir l'aspect réflexif de l'approche structurelle.

D'ailleurs, les indicateurs développés pour évaluer la redondance des réseaux techniques, qui seront utilisés par la suite pour analyser les capacités d'absorption de ces réseaux, se différencient des indicateurs de centralité.

CHAPITRE 6

Identification et modélisation des interdépendances entre les réseaux techniques

Comme les sociétés modernes sont de plus en plus dépendantes d'infrastructures toujours plus complexes et évoluées d'un point de vue technique, ces sociétés semblent de moins en moins résilientes. En effet, ces sociétés pourront difficilement faire face à des événements perturbateurs si leurs infrastructures sont amenées à être perturbées, car elles pourraient par « effet domino » entraîner une multitude de dysfonctionnements (Michel-Kerjan, 2000).

Plus précisément, les interdépendances entre ces infrastructures rendent la recherche des causes et des effets résultant de ces perturbations complexe et difficile, ce qui pose des problèmes en matière de prévention des risques. Afin de modéliser ces interdépendances, il est nécessaire d'analyser ces infrastructures de manière systémique plutôt qu'analytique (Eusgeld et al., 2011). A partir de ces modélisations, il devient possible de produire des scénarios de dysfonctionnements tenant compte des interdépendances entre ces différentes infrastructures. Ces scénarios permettent alors d'envisager la mise en place de politiques de gestion adéquates.

La modélisation des interdépendances induites par ces systèmes d'infrastructures représente donc un enjeu important, auquel les réseaux techniques n'échappent pas. L'objectif de ce chapitre est par conséquent de proposer une méthodologie permettant de modéliser les interdépendances entre les différents réseaux techniques.

Pour cela, il est nécessaire dans un premier temps d'étudier l'état de l'art en matière de modélisation des interdépendances entre infrastructures critiques. En effet, les recherches concernant les interdépendances entre les réseaux techniques rentrent dans ce cadre. Puis dans un second temps, la méthodologie développée pour modéliser les interdépendances entre les réseaux techniques sera présentée.

Enfin, les scénarios pouvant être produits par ces modélisations ont une pertinence opérationnelle, si et seulement si, ces scénarios permettent d'identifier les éléments pouvant être endommagés – ou pouvant dysfonctionner – lorsque ceux-ci font face à un aléa. C'est pourquoi, ces travaux spécifiques concernant la modélisation des interdépendances entre les différents réseaux techniques ont été couplés avec ceux concernant leurs propriétés structurelles. L'objectif est de disposer *in fine* d'une

méthodologie complète d'analyse des réseaux techniques dans un contexte de risques, tout en étant le plus exhaustif possible dans la prise en compte des interdépendances entre ces réseaux. Ces développements contribuent alors à analyser les capacités de résistance des réseaux techniques.

6.1 LA MODELISATION DES INTERDEPENDANCES ENTRE LES INFRASTRUCTURES CRITIQUES

La modélisation des interdépendances entre infrastructures critiques est un domaine de recherche plutôt récent (Pedersen et al., 2006 ; Eusgeld et al., 2008 ; Johansson, 2010). Il n'existe donc pas de méthodes unanimement reconnues pour modéliser ces interdépendances. Il existe plutôt un ensemble de méthodes mis en avant par certains chercheurs afin de prendre en considération ces interdépendances. Il convient donc d'analyser précisément ces méthodes, afin d'une part de bien comprendre leur finalité et d'autre part d'identifier leurs avantages et leurs inconvénients.

Ces méthodes sont assez différentes et apparaissent parfois complémentaires. Elles recouvrent alors des champs disciplinaires hétéroclites puisque, les infrastructures critiques peuvent être étudiées à différents niveaux (Chap. 4) : technique, économique, organisationnel... Il est notamment possible de distinguer deux grandes familles d'approches.

Premièrement, les approches dites empiriques ont pour objectif d'étudier *a posteriori* des événements (*i.e.* des perturbations, des défaillances, des dysfonctionnements...) ayant mis en exergue des problématiques d'interdépendances entre différentes infrastructures. Ces analyses d'événements passés ont alors pour principal objectif de dégager des éléments de compréhension concernant les mécanismes de perturbation de ces infrastructures et leurs interdépendances (McDaniels et al., 2007 ; Zimmerman & Restrepo, 2006 ; Rahman et al., 2009).

Deuxièmement, les approches dites prédictives tentent de simuler *a priori* les comportements des infrastructures critiques face à des aléas en tenant compte des conséquences induites par les interdépendances entre ces infrastructures (Johansson, 2010). Ces simulations modélisent alors des scénarios de défaillances plus ou moins complexes entre les infrastructures critiques. Il ne faut néanmoins pas opposer ces deux familles, puisque les approches prédictives s'appuient sur les approches empiriques (Johansson, 2010), leur réunion formant alors des approches intégratives.

Il est donc question dans cette partie de présenter ces différentes approches. De plus, il est apparu que les méthodes issues de la Sûreté de Fonctionnement peuvent être utilisées pour identifier et modéliser les interdépendances entre les infrastructures critiques (Lhomme et al., 2011b). Il convient alors de présenter ces méthodes et d'en justifier l'éventuelle utilisation.

6.1.1 Les approches empiriques

Il existe peu de travaux qui appréhendent de manière empirique les dysfonctionnements liés aux interdépendances entre infrastructures critiques (McDaniels et al., 2007). Ainsi, les fréquences de tels événements sont relativement mal connues. En effet, les barrières à de telles analyses sont nombreuses. Premièrement, ces interdépendances sont le fruit de mécanismes d'endommagements complexes, il est donc difficile de les identifier. Deuxièmement, cette complexité rend la collecte des données difficile, puisqu'elle requiert de recueillir de nombreux faits relatifs à l'événement. Troisièmement, les bases de données exhaustives, si elles existent, appartiennent généralement à des acteurs privés et sont inaccessibles aux équipes de recherche (Rahman et al., 2009).

Différentes approches ont été adoptées (McDaniels et al., 2007 ; Zimmerman & Restrepo, 2006 ; Rahman et al., 2009). Ainsi, certaines approches se focalisent sur un nombre restreint d'événements (McDaniels et al., 2007 ; Zimmerman & Restrepo, 2006), tandis que d'autres approches préfèrent en étudier un grand nombre (Zimmerman & Restrepo, 2006 ; Rahman et al., 2009). Dans le premier cas, il s'agit d'analyser les interdépendances qui ont émergé lors d'événements marquants, comme par exemple le « *blackout* » de 2003 en Amérique du Nord. En effet, ces événements marquants font l'objet d'une attention particulière de la part des médias et des gestionnaires publics, donnant lieu à un recueil des faits presque exhaustif. Dans le second cas, il s'agit, à partir d'un recueil d'événements très diversifiés, de faire émerger ces interdépendances. Ces approches se focalisent alors généralement sur une infrastructure particulière.

Les méthodes employées sont plus ou moins similaires. Premièrement, elles reposent évidemment sur une compilation des différentes données recueillies. Ces compilations peuvent être plus ou moins ordonnées et faire par exemple l'objet d'une base de données (Rahman et al., 2009). En effet, les faits recueillis sont parfois de natures très diverses, le développement d'une base de données permet alors d'homogénéiser cette compilation d'éléments hétéroclites. Deuxièmement, ces approches reposent sur la définition d'éléments caractéristiques des interdépendances. Ces caractéristiques peuvent concerner la nature des interdépendances, leur complexité, leur probabilité, leur durée, leurs conséquences... Pour cela, il est possible de s'appuyer sur des classifications existantes – comme par exemple en ce qui concerne la nature des interdépendances (Rinaldi et al., 2001) –, la définition de métriques (Zimmerman & Restrepo, 2006)... Enfin, dans un troisième temps, ces approches requièrent de synthétiser les résultats pour en permettre l'analyse et l'exploitation. Ces approches s'appuient alors sur des modes de représentation graphique ou des analyses statistiques.

Les informations obtenues peuvent être exploitées de différentes manières. Ainsi, à partir de ces informations, il peut se révéler possible de hiérarchiser les infrastructures critiques en fonction de leur criticité. Ces hiérarchisations sont alors utiles pour améliorer les politiques de gestion des risques. Il peut aussi être possible de comparer deux

événements pour mettre en exergue certaines spécificités. Néanmoins, la principale finalité de ces approches est de faire émerger des éléments de compréhension nouveaux concernant les interdépendances entre les infrastructures critiques. Or, ces nouveaux éléments de compréhension se révèlent nécessaires pour simuler le comportement de ces infrastructures. En effet, les approches prédictives, qui se proposent de simuler *a priori* le comportement des infrastructures critiques, reposent notamment sur des éléments de compréhension acquis par l'analyse d'expériences passées.

6.1.2 Les approches prédictives

Bien que les approches empiriques permettent d'identifier *a posteriori* (*ex post*) des éléments de compréhension utiles pour la gestion des risques, il est bien souvent nécessaire de disposer d'approches permettant de raisonner *a priori* (*ex ante*). En effet, les évolutions des infrastructures (issues des modifications apportées aux infrastructures) et des éléments d'ordre contextuel (ainsi l'absence d'expériences sur un territoire donné nécessite d'analyser des expériences ayant lieu sur d'autres territoires, sans pour autant savoir si celles-ci s'adaptent bien au contexte de ce territoire) limitent fortement les approches empiriques, d'où la nécessité de développer des approches prédictives fondées sur des simulations.

➤ *Les analyses entrée(s)-sortie(s)*

L'analyse entrée-sortie (ou intrant-extrant) est connue internationalement sous le nom d'analyse « *input-output* ». C'est une application pratique du modèle d'équilibre général – qui cherche à expliquer comment se fixe le niveau de production et de consommation des biens ainsi que les prix dans une économie – développée par Wassily Leontief (1951). Ce modèle « *input-output* » a la particularité de tenir explicitement compte de l'interdépendance générale de tous les secteurs économiques. L'analyse entrée-sortie est donc une modélisation économique, ayant pour objectif de prévoir l'influence des changements dans un secteur d'activité particulier – ou éventuellement des changements de consommation – sur le reste de l'économie. Cette méthode d'analyse est un outil utilisé dans de nombreux pays et constitue aujourd'hui un véritable outil d'aide à la décision économique (Miller et al., 1989).

Compte tenu de l'importance des impacts pouvant être induits par les infrastructures critiques sur les économies nationales, il est compréhensible que ces analyses puissent se révéler pertinentes pour étudier les interdépendances entre les infrastructures critiques. Ainsi, des travaux ont abouti à la création de l'*Inoperability Input-Output Model* (IIM) (Haines et al., 2005). Le principe de base consiste à utiliser des données commerciales issues de différents secteurs économiques, pouvant être jugés critiques, afin d'identifier d'éventuelles corrélations entre ces différents secteurs (comme par exemple identifier des secteurs dont les bénéfices et les pertes augmentent conjointement de manière quasi-systématique). Ces corrélations sont alors interprétées comme des interdépendances et elles peuvent être quantifiées (Santos, 2006).

Ces interdépendances économiques résultent de dépendances qui dépassent les seules interdépendances techniques. Cette méthode repose ainsi sur le postulat suivant : l'analyse économique des infrastructures critiques constitue un meilleur angle d'analyse de leurs interdépendances que la seule analyse technique. Elle se fonde alors sur des systèmes d'équations matricielles permettant premièrement d'identifier les dysfonctionnements des infrastructures, puis deuxièmement d'analyser comment ces dysfonctionnements se propagent entre les infrastructures critiques. Pour cela, il est notamment possible d'étudier les baisses importantes de demande (Santos & Haines, 2004). Par exemple, après les attentats du 11 Septembre 2001, une baisse de 33,2% du trafic aérien américain a été enregistrée entraînant alors une baisse de 19,2 % des taux d'occupation des hôtels (Haines et al., 2005).

Cette méthode a de nombreux avantages, elle permet notamment de prendre en considération et d'identifier de nombreuses interrelations (une étude concerne par exemple plus de 500 secteurs), de classer les secteurs en fonction de leurs impacts sur les autres secteurs, de travailler à différentes échelles... Cependant, cette méthode est purement économique. C'est pourquoi, si elle suggère l'existence d'interdépendances techniques, elle ne permet pas de clairement les identifier.

➤ *Les systèmes à base d'agents*

Un système multi-agent (SMA) est un système composé d'un ensemble d'agents, situés dans un environnement donné et interagissant selon certaines relations (*i.e.* des règles prédéfinies). Un agent est une entité caractérisée par le fait qu'elle est, au moins partiellement, autonome. Ces agents reçoivent alors des informations et en fonction de leur apprentissage ceux-ci sont en mesure de prendre des décisions autonomes (Lajoie, 2007). Dans le cadre des infrastructures critiques, ces agents peuvent aussi bien être des composants matériels (transformateurs, canalisations, pompes de relevage...) que des acteurs nécessaires au bon fonctionnement de l'infrastructure (opérateurs, acteurs économiques...). Chaque agent réagit aux actions des autres agents selon des règles qui lui sont propres.

Disciplinairement, ces systèmes proviennent essentiellement de l'informatique (Lajoie, 2007). Ils sont notamment issus des travaux concernant l'intelligence artificielle, mais ces systèmes ne peuvent pas être retréints à ce domaine. Ainsi, les sciences cognitives ont grandement participé à leur développement (Ferber, 2006). Actuellement, les sciences sociales sont amenées à utiliser et à développer ces systèmes, qui sont sans doute les mieux à même de reproduire des mécanismes de fonctionnement aussi complexes que ceux de groupes sociaux. Les domaines d'application de ces systèmes vont donc des sciences dites « sociales » (économie, sciences politiques, géographie...) aux sciences dites « dures » (biologie, ingénierie, écologie...) (Dauphiné, 2003 ; Sanders, 2006).

Ces systèmes se révèlent particulièrement puissants pour effectuer des simulations. Ainsi, la simulation orientée agent est aujourd'hui utilisée dans un nombre croissant de

secteurs, où elle remplace progressivement les différentes techniques de micro simulation et de simulation orientée objet. Compte tenu des difficultés rencontrées pour modéliser par des approches physiques les interdépendances entre les infrastructures critiques, ces systèmes apparaissent être assez logiquement une alternative crédible.

A titre d'exemple, un modèle à base d'agents a été développé afin de simuler les effets des interdépendances entre d'une part les réseaux de télécommunication et d'autre part des infrastructures critiques comme les banques, le secteur financier et le réseau électrique (Brown et al., 2004). Ce système est fondé sur un système multi-agent antérieur (nommé ASPEN) qui avait pour objectif de simuler les décisions économiques de différents secteurs américains. La communication est alors limitée dans ce modèle à un simple message entre deux agents, par conséquent comme l'infrastructure n'est pas modélisée *stricto sensu*, les impacts spécifiques sur des composants matériels ne peuvent pas être évalués.

Il s'agit donc d'une approche générale qui reste uniquement centrée sur des aspects économiques. En fait, de nombreux systèmes à base d'agents, traitant des interdépendances entre infrastructures critiques, sont de nature économique. Ainsi, les agents sont des agents économiques et l'objectif est alors de simuler les conséquences économiques des décisions de certains acteurs sur d'autres infrastructures (FINSIM, MIN, N-ABLE) (Pedersen et al. 2006, Ehlen & Scholand, 2005).

Cependant, les systèmes agents peuvent aussi se focaliser sur des aspects plus techniques, comme par exemple dans le domaine des transports (TRANSIM). Ces systèmes à base d'agents sont alors souvent couplés avec d'autres méthodes pour simuler les interdépendances entre réseaux techniques. TRANSIM est par exemple utilisé dans un cadre plus large (Urban Infrastructure Suite) qui modélise aussi le réseau d'eau potable, le réseau de télécommunication et les déplacements urbains (Toroczkai & Eubank, 2005).

Plus récemment, des travaux ont eu recours à des systèmes à base d'agents et à une modélisation « multi-couche » des réseaux techniques afin d'étudier la continuité, puis la remise en service d'un service hospitalier, l'objectif final étant d'évaluer sa résilience (Kanno et al., 2011). Les agents sont alors très diversifiés : des patients, des hôpitaux, des postes d'aide, des équipes de restauration, des centres de décisions... Les résultats de ces simulations permettent alors d'évaluer jour après jour les capacités de fonctionnement des services hospitaliers étudiés.

Ces modèles agents apparaissent donc relativement pertinents pour modéliser les interdépendances entre les réseaux techniques. Ces modèles permettent notamment de simuler les réactions des infrastructures face à différents scénarios. De plus, ils peuvent tenir compte des différents niveaux des infrastructures (les agents peuvent ainsi être économiques, techniques...). Cependant, ces modèles nécessitent de connaître *a priori* le fonctionnement des différentes infrastructures ainsi que leurs interdépendances. Ainsi, ces systèmes ne permettent pas d'identifier des interdépendances, mais permettent seulement de simuler et d'évaluer les effets probables de ces interdépendances.

➤ *La théorie des systèmes dynamiques*

La théorie des systèmes dynamiques, qui découle des travaux de Ludwig von Bertalanffy, permet de modéliser les interdépendances entre les réseaux techniques. En effet, la théorie des systèmes dynamiques a pour objectif de modéliser des systèmes complexes aux comportements non-linéaires pouvant difficilement être modélisés par des équations mathématiques. Cette théorie repose alors sur des boucles de rétroaction, des stocks (des sous-systèmes, des composants...) et des flux (des relations entre ces sous-systèmes).

Une modélisation fondée sur la théorie des systèmes dynamiques a ainsi été réalisée (CIPDSS) afin de comparer les impacts de différents événements perturbateurs sur des infrastructures critiques (Santella et al., 2009). Cette modélisation se présente comme un véritable système d'aide à la décision pour les gouvernements (nationaux, régionaux, locaux). Chaque infrastructure étudiée possède alors une modélisation systémique, qui requiert en entrée des données issues d'autres systèmes et produit en sortie des résultats pouvant être utilisés par ces autres systèmes (Santella et al., 2009).

A l'instar des systèmes à base d'agents, la théorie générale des systèmes est très efficace pour simuler les comportements d'infrastructures interdépendantes. Cependant, les interrelations entre ces infrastructures doivent être identifiées *a priori* et de surcroît elles doivent être quantifiables.

➤ *Les approches « réseaux »*

Les interdépendances existant entre différentes infrastructures créent des relations plus ou moins tangibles entre celles-ci. Si ces infrastructures définissent alors un système, elles définissent dans une même continuité un réseau d'infrastructures. C'est pourquoi, il est possible de modéliser ces interdépendances entre infrastructures en ayant recours à des méthodes issues de l'analyse de réseaux. De plus, sachant que les réseaux techniques sont des infrastructures critiques, l'utilisation de ces méthodes n'est pas surprenante concernant la modélisation des interdépendances entre infrastructures critiques. Deux méthodes sont aujourd'hui majoritairement utilisées, la théorie des graphes et les réseaux de Pétri.

La théorie de graphes va permettre, à l'aide notamment d'indicateurs structurels, d'analyser les réseaux techniques et leurs interdépendances (Duenas Osario, 2005 ; Ouyang et al., 2011). En effet, la théorie des graphes permet d'analyser le fonctionnement de différents réseaux techniques. Pour cela, les interdépendances techniques doivent être identifiées afin de les modéliser sous forme de graphe. Cette approche requiert donc de connaître *a priori* les interdépendances entre les infrastructures analysées. En outre, la théorie des graphes ne permet pas de développer des approches dynamiques (ou temporelles). Ainsi les méthodes mises en place à partir de la théorie des graphes ne permettent pas de tenir compte des efforts des gestionnaires pour rétablir les différents réseaux (Eusgeld et al., 2008). C'est pourquoi, dans le but d'aborder des aspects plus

organisationnels ou économiques, il est nécessaire de coupler ces analyses de réseaux avec d'autres méthodes, comme par exemple des modèles orientés objets (Eusgeld et al., 2009). Ces approches favorisent dans ce contexte la modélisation de facteurs non-techniques (comme la modélisation des opérateurs de réseaux) et par conséquent des modélisations plus dynamiques (Schlapfer et al., 2008).

Un réseau de Pétri est un outil plus puissant que la théorie des graphes pour appréhender les aspects dynamiques liés au fonctionnement des réseaux techniques (Gursesli & Desrochers, 2003). Plus précisément, un réseau de Pétri est un graphe orienté dont les sommets peuvent être soit des places (représentés par des cercles), soit des transitions (représentées par des rectangles). Les sommets d'un réseau de Pétri sont reliés par des arcs. L'aspect dynamique, dans un réseau de Pétri, se traduit par la présence de jetons représentés par des points, qui se déplacent en respectant des règles de transition (Gursesli & Desrochers, 2003). Les possibilités offertes par un outil permettant de traiter de manière dynamique des réseaux se révèlent particulièrement intéressantes. Ainsi, si cette méthode développée par Adam Pétri en 1939 a pu mettre du temps avant de s'imposer, celle-ci connaît aujourd'hui un succès grandissant dans de nombreux domaines (comme par exemple celui des transports), la modélisation des interdépendances entre infrastructures critiques n'échappe pas à cette tendance (Kordic, 2008).

Par exemple, dans le projet CRUCIAL (Critical Utility Infrastructure resilience), qui se focalise sur l'analyse de deux infrastructures fortement interdépendantes (un réseau électrique et un réseau d'information permettant l'exploitation du réseau électrique), des travaux utilisent les réseaux de Pétri (Lapri et al., 2007). Les réseaux de Pétri représentent alors le niveau d'étude le plus détaillé du projet CRUCIAL. Cette modélisation poussée du fonctionnement des infrastructures et de leurs interdépendances repose alors sur une grande connaissance des systèmes étudiés, de leurs modes de défaillance et des barrières mises en place pour y faire face (Lapri et al., 2007). Pour cela, les réseaux de Pétri s'appuient sur des méthodes issues de la Sûreté de Fonctionnement qui permettent notamment d'identifier et de modéliser des scénarios de défaillances « en cascade » (à l'aide par exemple d'arbres de défaillances) (Lapri et al., 2007). Dans ce cadre, il est possible de caractériser les réseaux de Pétri comme faisant partie intégrante de la Sûreté de Fonctionnement. Les résultats obtenus dans ces recherches démontrent la pertinence d'utiliser des méthodes issues de la Sûreté de Fonctionnement afin d'identifier et de modéliser les interdépendances entre différentes infrastructures critiques, les réseaux de Pétri permettant *in fine* la simulation dynamique de ces scénarios.

6.1.3 Les approches issues de la Sûreté de Fonctionnement

L'analyse des méthodes utilisant les réseaux de Pétri a fait apparaître que les méthodes issues de la Sûreté de Fonctionnement offraient un cadre intéressant pour identifier et modéliser les interdépendances entre les infrastructures critiques. A l'origine, les méthodes issues de la Sûreté de Fonctionnement ont été développées pour étudier les

systèmes industriels dont le fonctionnement était complexe et pour lesquels il est très difficile, voire impossible, de produire un modèle de fonctionnement par des approches physiques classiques (utilisant des équations mathématiques) (Villemeur, 1988 ; Zwingelstein, 1996). Or, les interdépendances entre les infrastructures critiques créent un système complexe d'infrastructures difficilement modélisable par des approches physiques classiques. Ainsi, une approche de modélisation des interdépendances entre infrastructures critiques semble pouvoir être élaborée en ayant recours à des méthodes issues de la Sûreté de Fonctionnement (Lhomme et al., 2011b).

La Sûreté de fonctionnement consiste à connaître, évaluer, prévoir, mesurer et maîtriser les défaillances de systèmes technologiques, tout comme les défaillances humaines, afin de limiter les conséquences de ces défaillances sur la santé, la sécurité des personnes, la productivité et l'environnement (Noyes & Peres, 2007). La Sûreté de Fonctionnement peut être considérée, en quelque sorte, comme une riche palette de méthodes et de concepts au service de la maîtrise des risques. Ainsi, « *la sûreté de fonctionnement n'est pas un but en soi, mais un moyen ou un ensemble de moyens : des démarches, des méthodes, des outils et un vocabulaire. Le but qui impose le recours à la sûreté de fonctionnement est plus reconnaissable sous le terme de maîtrise des risques* » (Mortureux, 2001). Autrement dit, la Sûreté de Fonctionnement se définit principalement par sa finalité : maîtriser les risques, elle se place alors volontairement dans une démarche de réduction de ces risques.

La Sûreté de Fonctionnement se donne les moyens d'identifier l'ensemble des effets qu'implique un système en dehors du cadre dans lequel il s'inscrit logiquement et des besoins auxquels il répond directement (Mortureux, 2001). Ainsi, la sûreté de fonctionnement tend à « tout prévoir » et à prendre en considération toute information accessible. Les méthodes issues de la Sûreté de Fonctionnement se veulent par conséquent exhaustives, ce qui les différencie des approches étudiées précédemment. Si la Sûreté de Fonctionnement ne peut réduire les risques à zéro, elle assure que chaque décision a pu être prise en toute connaissance de cause (elle en offre les meilleures garanties) (Mortureux, 2001).

Bien qu'il n'existe aucune certitude en matière de Sûreté de Fonctionnement, celle-ci tend précisément à minimiser les incertitudes. L'objectif final est finalement de pouvoir placer dans le système considéré une « confiance justifiée » (Dal Pont, 2010) et ce malgré les incertitudes qui l'entoure (probabilité de défaillances, effets non planifiés...). La sécurité exige alors de bien concevoir, bien construire, bien exploiter, bien maintenir l'outil industriel. Cette volonté de connaissances exhaustives – permettant d'allouer une confiance rationnelle dans la sûreté du système étudié – est à la base de la Sûreté de Fonctionnement. Cependant, la confiance dépend de ce à quoi on accorde de l'importance (innocuité, productivité, qualité...) et des valeurs relatives de ces caractéristiques. En cela, la Sûreté de Fonctionnement, bien que se plaçant dans une démarche rationnelle, ne peut se soustraire à des aspects plus subjectifs et cognitifs (Dal Pont, 2010).

Il existe un nombre important de méthodes issues de la Sûreté de Fonctionnement (*Annexe 1*). Parmi ces méthodes, deux grandes familles sont distinguées (*Serre, 2005*). Les méthodes inductives qui décrivent les relations entre les composants en partant des causes pour en déduire les conséquences, et les méthodes déductives qui partent des conséquences pour remonter aux causes. Il est aussi possible de distinguer les approches dynamiques et les approches statiques. Les approches statiques permettent d'analyser le système d'un point de vue structurel sans tenir compte des évolutions au cours du temps, tandis que les approches dynamiques prennent en compte les aspects temporels. Cependant, la principale distinction opérée différencie les approches quantitatives des approches qualitatives (*Annexe 1*).

Plus précisément, dans le cadre de cette recherche, l'AMDE (l'Analyse des Modes de Défaillance et de leurs Effets) s'est révélée être une méthode intéressante à exploiter (*Lhomme et al., 2011b*). En effet, cette méthode dont les résultats sont présentés sous la forme d'un tableau spécialement conçu pour le système étudié, permet d'adapter l'analyse à notre problématique. De plus, cette méthode, en considérant chacun des composants du système et en analysant leurs modes de défaillance, permet de mieux comprendre comment ces systèmes fonctionnent avant, pendant et après la crue. Cette méthode, qui permet d'analyser de manière holistique les réseaux techniques, semble parfaitement indiquée afin d'identifier de manière exhaustive les interdépendances entre ces réseaux. Pour cela, il est nécessaire de considérer les différents réseaux techniques comme faisant partie intégrante d'un seul et même système.

L'AMDE est, en quelque sorte, la méthode « par excellence » de la Sûreté de Fonctionnement. A tel point que la Sûreté de Fonctionnement est parfois réduite à cette seule méthode (*Mortureux, 2005*). Plus qu'une méthode, l'AMDE est une véritable démarche qui permet d'analyser un système dans son ensemble. De plus, cette démarche est très utilisée et se révèle très utile dans toute approche d'analyse de risques. C'est pourquoi, d'autres méthodes s'appuient directement sur des AMDE, contribuant alors à renforcer davantage le succès de cette méthode. Dans une même continuité, l'AMDE s'est progressivement développée en dehors du milieu industriel. Par exemple, depuis la fin des années 90, l'AMDE a été adaptée dans différents domaines du génie civil : notamment les routes (*Valadas, 2003*), les bâtiments (*Lair, 2000*), les barrages (*Peyras, 2009*), les digues (*Serre, 2008*)... En revanche, la validation de l'AMDE qui peut difficilement être empirique est souvent difficile.

Il existe de nombreuses combinaisons possibles entre les différentes méthodes issues de la Sûreté de Fonctionnement. Ainsi, pour synthétiser les informations issues des AMDE, des arbres de causes et des arbres de défaillances peuvent être produits, permettant alors l'élaboration de scénarios de défaillances. Il est ainsi envisageable de combiner des méthodes issues de la Sûreté de Fonctionnement afin d'identifier et de modéliser les interdépendances entre les réseaux techniques.

Il n'existe pas une méthode unique pour modéliser, simuler et explorer les interdépendances entre les infrastructures critiques. Chaque méthode possède alors ses avantages et ses inconvénients. Quoiqu'il en soit, la plupart des méthodes analysées nécessitent de connaître *a priori* les interdépendances entre les infrastructures critiques. Ces interdépendances sont donc supposées connues, alors même que leur identification constitue un objet de recherche encore déficient. Dans les faits, l'identification (qui relève des approches empiriques) et la simulation (qui relève des approches prédictives) des interdépendances sont distinguées. Or, actuellement les recherches concernant la modélisation des interdépendances se focalisent principalement sur les aspects prédictifs tandis que les approches intégratives (qui associent l'identification et la simulation des interdépendances) sont en définitive plutôt rares. Ainsi, les travaux analysés ne prétendent généralement pas à l'exhaustivité. Seule l'analyse entrée-sortie semble être une méthode intégrative, mais elle ne permet pas de différencier les différents types d'interdépendances (technique, organisationnel, économique...). Pour pallier ces écueils, il est proposé dans cette recherche d'utiliser des méthodes issues de la Sûreté de Fonctionnement.

6.2 LE RECOURS AUX METHODES ISSUES DE LA SURETE DE FONCTIONNEMENT

Dans cette partie, il est proposé d'utiliser des méthodes issues de la Sûreté de Fonctionnement afin d'identifier et de modéliser les interdépendances entre différents réseaux techniques. En effet, ces méthodes ont fait leur preuve dans les milieux industriels afin d'effectuer des analyses de risques et plus généralement de modéliser des systèmes complexes. De plus, il est apparu précédemment que ces méthodes semblaient pertinentes en matière d'analyse des interdépendances entre infrastructures critiques (6.1). C'est pourquoi, une méthodologie combinant des méthodes complémentaires a été définie. Cette méthodologie a été appliquée à l'analyse des réseaux techniques dans le cas particulier des inondations. Enfin, un soin particulier a été apporté à la validation de cette méthodologie.

6.2.1 Choix méthodologiques et hypothèses concernant l'étude des interdépendances entre réseaux techniques

Classiquement, les méthodes d'analyse de risques les plus utilisées pour étudier des infrastructures sont les méthodes physiques, statistiques et par « dire d'expert » (Peyras, 2009). Premièrement, les méthodes physiques reposent sur une modélisation des lois de comportements des matériaux et des structures. Ces méthodes ont notamment un fort

pouvoir prédictif, permettant la simulation de l'état d'une infrastructure au cours du temps face à certaines pressions internes ou externes (Peyras, 2009). Cependant, elles requièrent une connaissance très fine des lois régissant le fonctionnement de l'infrastructure étudiée, ce qui manque en matière d'interdépendances entre les réseaux techniques. En effet, les réseaux techniques sont généralement étudiés isolément. Deuxièmement, les méthodes statistiques s'appliquent bien, quant à elles, à des infrastructures où de nombreuses données sont disponibles et où les modèles physiques se révèlent assez inefficaces (Peyras, 2009). Or, en ce qui concerne les interdépendances entre les réseaux techniques, les données statistiques manquent. Ces méthodes sont par conséquent difficilement applicables. Troisièmement, les méthodes par « dire d'expert », si elles permettent de bien analyser une infrastructure, il est en revanche difficile d'identifier des experts en matière d'interdépendances entre infrastructures – c'est-à-dire des experts qui transcenderaient alors des logiques de gestion segmentées.

Parallèlement à ces méthodes d'analyse de risques, il existe aussi les méthodes issues de la Sûreté de Fonctionnement (Peyras, 2009). 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 (Serre, 2005). Cette modélisation fonctionnelle consiste à déterminer les interactions entre les composants d'un système et son environnement, de façon à établir de manière formelle les liens entre les défaillances des fonctions, leurs causes et leurs effets (Serre et al., 2007). L'utilisation de telles méthodes pour produire des scénarios de défaillances et modéliser des processus d'interdépendances entre des réseaux techniques semble alors pertinente (Lhomme et al., 2011b).

Cependant, ces méthodes s'appliquent généralement à des systèmes complexes, et non à des systèmes de systèmes complexes. L'hypothèse principale faite ici est la suivante : il est possible de modéliser des scénarios de défaillances pour des systèmes de systèmes complexes (en l'occurrence des réseaux techniques) en utilisant une combinaison de méthodes issues de la Sûreté de Fonctionnement. Pour cela, il est nécessaire d'analyser les réseaux techniques à différentes échelles :

- celle du système de systèmes complexes (permettant de tenir compte des interdépendances entre les réseaux techniques) ;
- celle des systèmes d'infrastructures (permettant de modéliser le fonctionnement des réseaux techniques) ;
- celle des composants (permettant d'établir les modes de défaillance).

Ainsi, une méthodologie a été proposée, reposant sur l'utilisation de différentes méthodes issues de la Sûreté de Fonctionnement, afin de produire des scénarios de défaillances entre les réseaux techniques. Dans un premier temps, le principe est de

considérer les différentes infrastructures comme faisant partie d'un seul et même système. Une analyse fonctionnelle générale externe est alors produite. Ce n'est que dans un deuxième temps qu'une analyse fonctionnelle interne est réalisée pour chaque réseau technique et que les méthodes issues de la Sûreté de Fonctionnement sont appliquées. Ainsi, ce deuxième niveau d'analyse prend en considération le premier niveau plus générique – ce qui implique la prise en compte des interrelations entre les différents systèmes complexes – et introduit un troisième niveau celui des composants (Lhomme et al., 2011b) (Fig. 6.1).

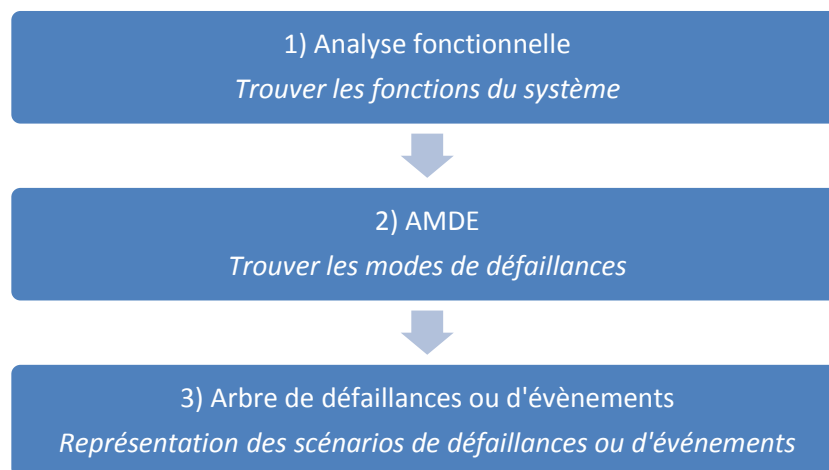


Figure 6.1 : La méthodologie de modélisation des interdépendances entre les réseaux techniques (Lhomme et al., 2011b).

L'Analyse des Modes de Défaillance et de leurs Effets (AMDE) a été choisie pour analyser les modes de défaillance, car elle permet une analyse exhaustive de ceux-ci. En théorie, l'AMDE ne peut mettre en évidence les conséquences (ou les causes) de pannes combinées, ni même les enchainements de défaillances (ou d'évènements). Pour cela, il est nécessaire d'utiliser des arbres de défaillances ou d'évènements en complément de l'AMDE (Annexe 1).

6.2.2. Application de la méthodologie aux inondations

Afin de permettre l'application de la méthodologie définie ci-dessus, les réseaux techniques ont été divisés en quatre catégories. Ainsi, les réseaux d'énergies, les réseaux de transports, les réseaux d'eaux, les réseaux de télécommunications ont été distingués. Plus précisément, les réseaux étudiés sont le réseau électrique (pour les réseaux d'énergies), les réseaux viaire et ferroviaire (pour les réseaux de transports), les réseaux d'assainissement et d'eau potable (pour les réseaux d'eaux), le réseau de téléphonie fixe (pour les réseaux de télécommunications). Comme dans cette recherche, les travaux engagés concernent la ville, l'analyse menée ici se concentre particulièrement sur les réseaux de distribution.

L'AMDE repose tout d'abord sur une analyse fonctionnelle du système. Cette analyse fonctionnelle est composée de deux étapes principales : la première étant une analyse fonctionnelle externe du système et la deuxième une analyse fonctionnelle interne. Dans un premier temps, une analyse fonctionnelle externe a été réalisée pour l'ensemble des réseaux techniques urbains. L'objectif est alors 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...). En effet, à cette échelle macroscopique, ces systèmes présentent de nombreuses similitudes qui permettent de les traiter conjointement. Cette analyse fonctionnelle externe s'appuie alors sur une modélisation du système urbain dans laquelle les réseaux tiennent une place centrale (Fig. 6.2). Une des difficultés principales est ici de définir précisément les limites du système étudié. En effet, le terme de ville est extrêmement vague et recouvre des réalités très différentes (Chapitre 2). Par simplification, cette limite place les réseaux de transport à l'extérieur du système tandis que les réseaux de distribution font partie intégrante du système. Quoi qu'il en soit, compte tenu de la difficulté pour appréhender un objet aussi complexe que la ville, cette modélisation de la ville est imparfaite et sa limite ne peut être qu'imprécise.

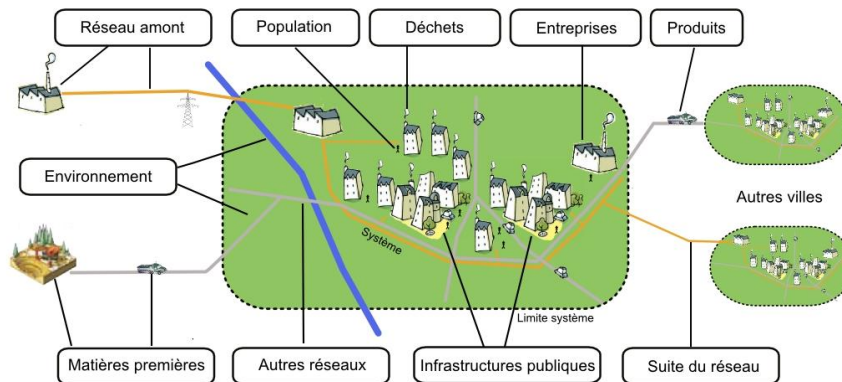


Figure 6.2 : Analyse fonctionnelle externe des réseaux.

Des analyses fonctionnelles internes ont ensuite été réalisées pour les quatre grandes familles de réseaux retenues. En effet, comme l'analyse fonctionnelle interne repose sur une analyse structurale du système étudié qui a pour objectif de décomposer le système en une multitude de composants élémentaires, une approche par « sous-système » réseau (*i.e.* réseau par réseau) est apparue pertinente. Ainsi, il est plus facile, plus logique et plus juste de travailler réseau par réseau pour les décomposer finement et tenir compte de leurs spécificités.

Des listes de composants avec des nomenclatures ont alors été produites pour chaque réseau (Tab. 6.1). Suite aux analyses structurales des différents réseaux, il est possible de définir pour chaque composant leurs fonctions. Ces fonctions expriment les interactions entre les composants du système, mais aussi les interactions avec leur environnement. Pour cela, ces interactions sont modélisées à l'aide de schémas : les Blocs Diagrammes Fonctionnels (BDF) (Fig. 6.3) (Annexe 2).

Nomenclature	Composant
1.1	Poste source
1.2	Transformateur
1.3	Pylône
1.4	Ligne enterrée moyenne tension
1.5	Ligne enterrée basse tension
1.6	Ligne aérienne moyenne tension
1.7	Ligne aérienne basse tension

Tableau 6.1 : Exemple d'une nomenclature pour une partie du réseau électrique.

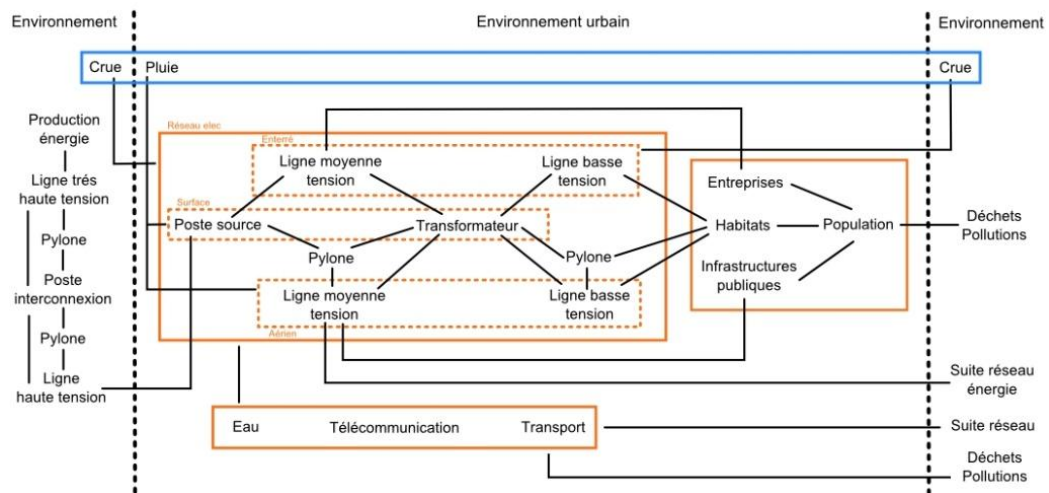


Figure 6.3 : Bloc Diagramme Fonctionnel (BDF) « contacts » du réseau électrique (Lhomme et al., 2011b).

Trois types de BDF ont alors été construits, représentant trois types de relations possibles :

- les relations de contacts (*i.e.* les contacts matériels entre les éléments et l'environnement) ;
- les relations de flux hydrauliques (*i.e.* la circulation de l'eau au sein des réseaux) ;
- les relations de vulnérabilités (*i.e.* les dépendances des composants les uns par rapport aux autres).

C'est à ce niveau de l'analyse que l'on perçoit la nécessité d'une approche réseau par réseau. En effet, la complexité de chaque réseau justifie cette approche, puisque la réalisation d'un seul BDF pour l'ensemble des réseaux le rendrait sans doute inexploitable. Le choix a alors été fait pour ces BDF de simplifier la modélisation des relations avec les autres réseaux (considérés alors comme un environnement réseau).

A partir de ces BDF, les fonctions des composants du système ont pu être précisées. Elles sont finalement au nombre de cinq. Ces fonctions sont donc communes aux 6 réseaux analysés, même si leur déclinaison au niveau des composants permet de faire apparaître des fonctions plus spécifiques.

- **Les fonctions liées aux contacts :** Les différents composants des réseaux techniques sont mis en contact dans le but d'assurer la production, le transport et la distribution du flux qui leur est spécifique. Le réseau fonctionne, si et seulement si, il est en mesure d'assurer ces différentes missions. Dans ce cadre, la principale fonction d'un réseau est :
 - Assurer la continuité du service
- **Les fonctions liées aux flux hydrauliques :** Dans le cadre des inondations, il est important que les réseaux soient en mesure de faire face à des événements hydrauliques. Ils devront résister aux flux hydromécaniques, résister aux phénomènes d'érosion, résister aux infiltrations, voire éventuellement transmettre les flux hydrauliques, les évacuer ou encore les collecter. Deux fonctions sont ici mises en avant :
 - Résister aux flux hydrauliques
 - Assurer les flux hydrauliques
- **Les fonctions liées aux vulnérabilités :** Ces réseaux sont particulièrement vulnérables aux inondations, à des dysfonctionnements internes et à des événements externes. Ainsi, ils doivent résister aux embâcles, résister aux pressions du réseau, résister aux pressions de l'environnement, permettre le bon fonctionnement des autres composants urbains. Deux nouvelles fonctions principales sont alors définies :
 - Résister aux pressions mécaniques
 - Permettre le bon fonctionnement des autres composants du système urbain

A chaque composant, il peut alors être associé une fonction et des sous fonctions plus précises faisant apparaître les spécificités du réseau en question (Tab. 6.2).

C'est à ce stade que l'analyse fonctionnelle est définitivement terminée et que dans le même temps l'AMDE débute *stricto sensu*. Pour cela, le choix a été fait de se baser sur les connaissances issues de l'analyse fonctionnelle et sur des retours d'expérience. Il n'a pas été fait ici recours à des experts, l'objectif étant dans un premier temps de tester les potentialités de la méthodologie. Dans le futur, il n'est pas exclu de travailler avec différents experts pour améliorer cette AMDE.

N.	Composant	Fonction
1.4	Ligne MT enterrée	<p>Assurer la continuité du service</p> <p>Assurer le transport d'électricité</p> <p>Résister aux flux hydrauliques</p> <p>Limiter les flux d'infiltration provenant de la galerie</p> <p>Résister aux sollicitations mécaniques</p> <p>Résister aux pressions mécaniques des autres réseaux de la galerie</p> <p>Résister aux pressions mécaniques du réseau de transport</p>

Tableau 6.2 : Exemple d'un tableau d'analyse fonctionnelle.

Outre la connaissance précise des séquences de défaillances des différents réseaux, l'AMDE va permettre de structurer les informations relatives aux perturbations de chaque sous-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 l'impossibilité pour un élément de remplir une fonction requise.

Cette AMDE a abouti à l'élaboration d'un tableau synthétisant l'ensemble de ces informations (Annexe 2). C'est à partir de ce tableau qu'il est envisageable de produire des scénarios de défaillances (Annexe 2). Pour cela, il est question d'analyser précisément les modes de défaillance des différents composants du système.

Comme le démontre l'exemple détaillé (Fig. 6.4), il est effectivement possible, à partir de l'AMDE réalisée, de produire des scénarios de défaillances qui tiennent compte des interdépendances entre les différents réseaux techniques. Cependant, l'AMDE est une méthode exhaustive qui recense plusieurs modes de défaillance pour chaque composant (plus précisément pour chaque fonction remplie par chaque composant) et comme dans le même temps le système est composé d'une trentaine de composants répartis sur quatre réseaux différents (ce qui correspond à plus d'une centaine de fonctions), un nombre important de scénarios peuvent être produits (environ 1540 scénarios) (Annexe 2). Ainsi,

il est impossible d’être exhaustif concernant la production de ces scénarios sans avoir recours à des outils informatiques.

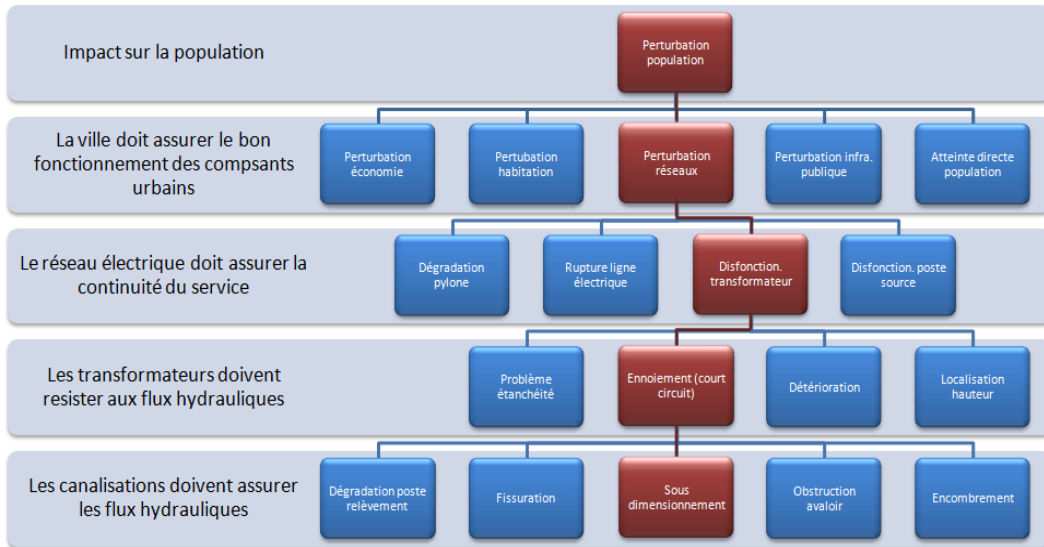


Figure 6.4 : Exemple d’un scénario pouvant être produit par la méthodologie (Lhomme et al., 2011b).

6.2.3. Conception d’un outil informatique afin d’exploiter la méthodologie développée

Compte tenu du nombre important de scénarios pouvant être produits à l’aide de la méthodologie développée, il s’est donc trouvé nécessaire d’automatiser la production de ces scénarios. En effet, le choix méthodologique qui a conduit à utiliser l’AMDE est justifié 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 scénarios jugés les plus critiques. Cependant, ce choix aurait remis en question l’utilisation d’une méthode aussi exhaustive, puisque 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, une base de données contenant l’AMDE a été développée (Fig. 6.5). Cependant, avant l’intégration de cette AMDE dans une base de données, il a été nécessaire de dresser une typologie « normalisée » des modes de défaillance (*i.e.* des causes et des effets de l’AMDE). En effet, le lien entre la défaillance d’une fonction et celle d’une autre fonction est conditionné par la mise en relation entre d’une part les effets de la défaillance d’une fonction et d’autre part les causes de la défaillance d’une autre. Or, pour que la production de ces liens soit automatisée, une typologie précise a dû être définie, afin qu’un algorithme puisse automatiquement détecter les relations existantes. Une fois cette typologie établie, 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 (constituant un graphe des liens de causalité) (Fig. 6.6). Les relations de causes à effets « directes » correspondent à des liens directs de défaillance entre les différentes fonctions (la défaillance de la fonction A impliquant alors directement la défaillance de la fonction B et cela sans nécessiter la défaillance d’une fonction C).

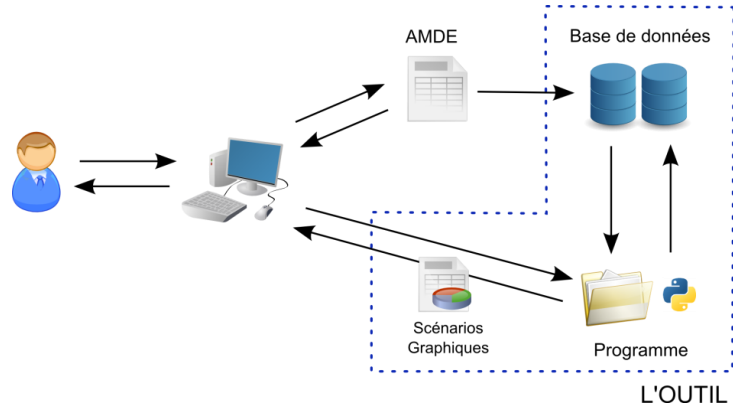


Figure 6.5 : Architecture de l’outil permettant d’automatiser la production des scénarios issus de la méthodologie développée pour modéliser les interdépendances entre les réseaux techniques (Lhomme et al., 2011b).

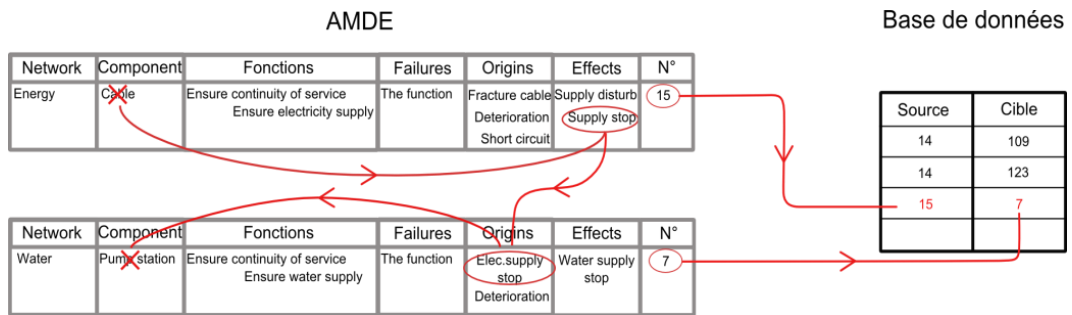


Figure 6.6 : Algorithme permettant l'automatisation des scénarios par l'établissement d'un graphe des liens de causalité (Lhomme et al., 2011b).

Après la réalisation du graphe des liens de causalité, il a été nécessaire d'établir une méthodologie permettant d'exploiter les scénarios pouvant être produits. Ici, il est nécessaire de préciser l'objectif de cette automatisation. L'objectif est de disposer d'un outil permettant d'établir les interdépendances possibles entre les composants des différents réseaux. L'objectif n'est donc pas de produire tous les scénarios de défaillances entre deux composants, mais d'identifier s'il existe au moins un scénario de défaillances entre deux composants.

Un algorithme a alors été mis au point afin de tester successivement 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) pour déterminer s'il existe au moins une relation de cause à effet pour chaque paire de composants. En l'occurrence, le scénario recherché correspond au scénario de défaillances

le plus direct, autrement dit celui qui implique le moins de fonctions. Cela revient, en termes algorithmique, à rechercher les plus courts chemins sur le graphe des liens de causalité. Ainsi, toutes les fonctions pouvant être perturbées par au moins un scénario, consécutivement à la défaillance d'une fonction, ont été identifiées (Fig. 6.7). Les résultats peuvent alors être agrégés pour établir les scénarios de défaillances existant entre les différents composants.

Numero	Composant	Fonction	Numero pert	Composant Perturbe	Fonction Perturbe
1	Ligne MT entere	Assurer le transport d'électricité	7	Ligne BT entere	Fournir l'énergie 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 d'eau 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	Renardavalnir	Assurer le bon fonctionnement du réseau

Figure 6.7 : Exemple d'effets pouvant être provoqués par la perturbation d'une fonction d'un composant. Une interface a été développée pour visionner les résultats et effectuer les requêtes (Lhomme et al., 2011b).

L'objectif est alors atteint. Cependant, comme chaque scénario ne peut pas être vérifié (il y en a un trop grand nombre, environ 1540), et sachant qu'il est difficile d'assurer qu'aucun scénario n'ait été omis, la validation de la méthodologie développée et de son application aux réseaux techniques est difficile à établir (Lhomme et al., 2011b). La confrontation des résultats obtenus avec ce qui se produira sur des terrains d'expérience constituera la meilleure validation. En attendant, il est possible de s'appuyer sur des études – fondées sur des Retours d'EXpérience (Chap. 1) – qui se focalisent sur l'analyse des vulnérabilités des réseaux techniques. Pour cela, une analyse statistique a été réalisée sur les scénarios produits à l'aide de l'outil. Cette analyse consiste à comptabiliser l'ensemble des scénarios produits et à étudier leur distribution. Les résultats de cette analyse statistique font alors émerger trois conclusions principales.

Premièrement, le réseau électrique se révèle être très agressif envers les autres réseaux techniques (Fig. 6.8). Deuxièmement, une distinction est clairement établie entre des éléments agressifs (*i.e.* à l'origine de nombreux scénarios) et d'autres composants plus sensibles (*i.e.* à la conclusion de nombreux scénarios) (Fig. 6.8). Troisièmement, il ressort que certains composants jouent un rôle fondamental dans les défaillances en chaîne, car ils vont diffuser les défaillances issues d'un réseau vers un autre réseau (Annexe 2). Ces composants « passerelles » (intermédiaires) ne sont pas nécessairement des composants agressifs, ni des composants particulièrement sensibles. En revanche, ce sont des composants presque incontournables dès que les scénarios de défaillances deviennent complexes (*i.e.* pour des scénarios impliquant un certain nombre de composants). Par exemple, une pompe de relevage peut diffuser diverses défaillances d'origine électrique au réseau d'eau potable. Ces conclusions obtenues à partir d'une méthodologie purement théorique recoupent alors des conclusions empiriques issues de Retours d'EXpérience (EP. Loire, 2006), ce qui semble donc valider la méthodologie développée et les résultats obtenus.

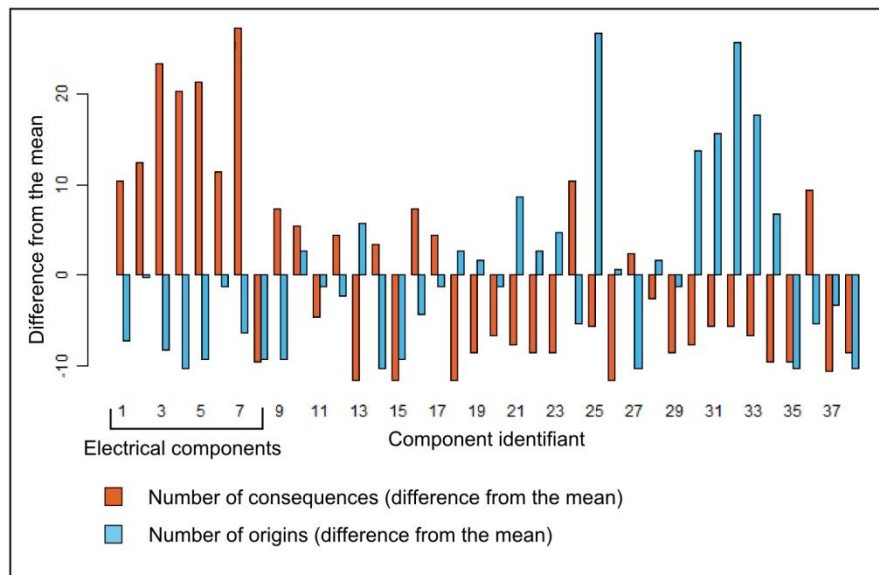


Figure 6.8 : Illustration des statistiques obtenues. Ces statistiques montrent notamment l'agressivité du réseau électrique envers les autres composants (Lhomme et al., 2011b).

La méthodologie définie et appliquée dans cette recherche aux réseaux techniques urbains semble permettre d'identifier et de modéliser les interdépendances entre les infrastructures critiques. Cette méthodologie repose sur une phase d'analyses fonctionnelles, la réalisation d'AMDE et des modélisations sous forme d'arbres d'événements ou de défaillances. Elle permet ainsi de produire des scénarios de défaillances pour des systèmes complexes fortement interdépendants comme les réseaux techniques. Si la validation de cette méthodologie reste problématique (une analyse statistique générale a dû être menée), elle constitue une alternative à des

méthodes physiques, statistiques, ou expert. Un outil informatique a été spécifiquement développé afin 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. Ainsi, les résultats d'une telle recherche sont davantage influencés par la qualité des AMDE réalisées plutôt que par la pertinence de la méthodologie développée. D'où la nécessité dans des recherches futures de travailler au côté d'experts.

6.3 L'ANALYSE DES RESEAUX TECHNIQUES DANS UN CONTEXTE DE RISQUES EN TENANT COMPTE DE LEURS INTERDEPENDANCES

La méthodologie définie précédemment permet d'identifier et de modéliser les interdépendances entre les réseaux techniques. Cette méthodologie peut alors être intégrée dans un outil SIG, afin de spatialiser les informations produites par l'automatisation d'une démarche permettant d'analyser les capacités de résistance des réseaux techniques face aux inondations, tout en tenant compte de leurs interdépendances. En effet, en confrontant un zonage de l'aléa et des informations relatives à l'état de différents éléments des réseaux techniques, les éléments directement impactés par un aléa peuvent être localisés. Puis, en tenant compte des interdépendances entre les différents réseaux techniques, les dysfonctionnements provoqués par ces impacts peuvent être identifiés à l'aide notamment d'indicateurs structurels (Chap. 5).

6.3.1 Définition d'une démarche générale d'analyse des capacités de résistance des réseaux techniques face aux inondations

Pour analyser les capacités de résistance des réseaux techniques face aux inondations, il est nécessaire de définir un ou plusieurs scénarios initiaux. Plus précisément, ces scénarios correspondent à des inondations faisant dysfonctionner une partie des réseaux analysés. Ces dysfonctionnements initiaux, produits par le contact direct de certains éléments avec l'eau, peuvent alors engendrer d'autres dysfonctionnements si les réseaux sont étudiés de façon dynamique. Quoi qu'il en soit, ces dysfonctionnements peuvent être envisagés de deux façons : de façon binaire (le composant fonctionne ou ne fonctionne pas) ou de façon continue (le composant fonctionne plus ou moins totalement). En outre, à partir de ces scénarios, il existe différentes approches correspondant à différents types d'analyse de risques :

- l'étude d'un scénario spécifique (impliquant un ou plusieurs composants) afin de déterminer précisément les conséquences de celui-ci ;

- l'identification des scénarios extrêmes (impliquant un nombre donné de composants) afin de déterminer le pire des scénarios possibles (et par conséquent les composants les plus problématiques) ;
- envisager tous les scénarios possibles afin d'avoir une vision complète des forces et des faiblesses du réseau (Matisziw et al., 2008).

Pour élaborer les scénarios initiaux, il est pertinent de s'appuyer sur des analyses de risques qui vont permettre de déterminer les impacts matériels d'un aléa sur les infrastructures étudiées. En effet, comme les réseaux techniques sont des systèmes d'ingénierie, les composants matériels peuvent être analysés afin de déterminer leur état. En croisant les données relatives à l'état des composants d'un réseau et un facteur d'exposition à l'aléa, il devient possible de déduire les endommagements engendrés par cet aléa. Ce sont alors ces endommagements (constituant les endommagements initiaux) qui induiront des dysfonctionnements sur le réseau. Une distinction est donc établie entre d'une part l'endommagement d'un composant (impact matériel) et d'autre part le dysfonctionnement causé par cet endommagement (impact fonctionnel). A partir de ce scénario spécifique, impliquant un ou plusieurs composants, l'objectif est d'en évaluer l'impact sur le fonctionnement du système. C'est précisément l'approche retenue ici.

Les endommagements matériels perturbent donc les flux circulant dans les réseaux. Pour analyser ces perturbations, il existe deux approches : l'approche structurelle (ou topologique) et l'approche fonctionnelle (ou rhéologique). L'approche structurelle évalue les conséquences engendrées par les différents scénarios en quantifiant la plus ou moins grande modification de la configuration du réseau (nombre de relations modifiées, nombre de relations rendues impossibles...). L'approche fonctionnelle se concentre, quant à elle, sur l'évaluation des impacts engendrés par les scénarios sur les flux (différence par rapport à la capacité maximale, calcul physique des flux...).

Afin d'assurer une cohérence entre les méthodes choisies pour implémenter la méthodologie d'analyse de la résilience des réseaux techniques, il a été décidé de privilégier l'approche structurelle (Chap. 4). Cette approche requiert alors d'envisager les dysfonctionnements de façon binaire.

Plus précisément, trois indicateurs structurels ont été retenus. En proposant trois indicateurs, l'objectif est de favoriser une démarche réflexive concernant les mécanismes de fonctionnement des différents réseaux techniques analysés. Le premier indicateur explore simplement la possibilité que les composants soient alimentés par au moins une source (« indicateur au moins une source »). Si ce n'est pas le cas, les composants sont supposés dysfonctionner, car ils ne peuvent plus être alimentés. Le deuxième indicateur repose sur l'indicateur de centralité défini au chapitre précédent (« indicateur de centralité »). Cet indicateur analyse alors la différence, en termes de centralité, entre le réseau à l'état normal et à l'état perturbé. Un composant dysfonctionne si la différence de centralité, entre l'état normal et l'état perturbé, est trop importante, car cela signifie que le composant en question est trop utilisé, il risque donc d'être en surcharge et par

conséquent de dysfonctionner. Le coefficient de tolérance est fixé par défaut à 1.5 (c'est-à-dire qu'un composant ne peut faire face à une surcharge excédant 50%), mais l'utilisateur peut changer ce niveau de tolérance en fonction de sa connaissance du réseau. Enfin, le dernier indicateur est fondé sur une analyse des allongements consécutifs à certains endommagements (« indicateur d'allongement »). Le principe est le même que pour l'indicateur précédent. Ainsi, un composant peut être amené à dysfonctionner si sa distance à la source la plus proche est anormalement élevée. En effet, cette différence indiquerait que ce n'est pas logiquement à cette source de l'approvisionner. Les gestionnaires peuvent alors être amenés à ne pas alimenter ce composant, même si cela est possible, afin d'éviter une rupture du réseau dans son ensemble.

A partir des différents choix méthodologiques opérés, il est possible d'établir une procédure générale permettant d'analyser les réseaux techniques dans un contexte de risques (Fig. 6.9).

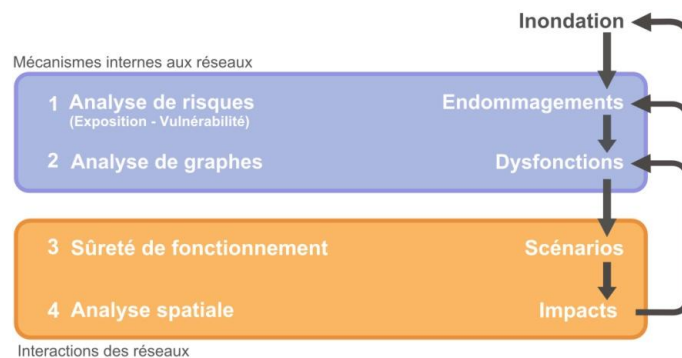


Figure 6.9 : Démarche générale concernant l'analyse des capacités de résistance des réseaux techniques.

Ainsi, le croisement entre les informations géographiques relatives à l'aléa de référence et à l'état des réseaux analysés permet de déterminer les endommagements initiaux probables pour chaque réseau (analyse de risques). Chaque réseau est alors considéré indépendamment. En ayant recours à des indicateurs structurels, il est dès lors possible d'évaluer les dysfonctionnements induits par ces endommagements initiaux (analyse de graphes). Puis, il est nécessaire d'identifier les interdépendances entre les différents réseaux techniques. Pour cela, il faut identifier d'éventuelles dépendances entre les composants des différents réseaux (méthodes issues de la Sûreté de Fonctionnement). Ces dépendances doivent ensuite être analysées pour déterminer si elles existent effectivement sur le territoire étudié (analyse spatiale).

En fonction de la nature des dépendances, les impacts engendrés seront d'origine fonctionnelle ou matérielle, engendrant respectivement de nouveaux dysfonctionnements ou de nouveaux endommagements. L'identification des interdépendances conduit à reprendre la démarche développée, soit au niveau matériel (analyse de risques), soit au niveau fonctionnel (analyse de graphes) (Fig. 6.9). Des boucles (rétroactives) doivent donc être exécutées jusqu'à ce qu'il devienne impossible d'identifier de nouveaux dysfonctionnements.

Afin d'être opérationnelle, cette démarche générale nécessite d'être automatisée. Or, à partir de cette démarche générale, il est possible de mettre en place un algorithme permettant d'analyser les réseaux techniques dans un contexte de risques (Fig. 6.10). Plus précisément, concernant l'implémentation de cette démarche au sein d'un SIG, un diagramme de cas d'utilisation a été réalisé (Fig. 6.11).

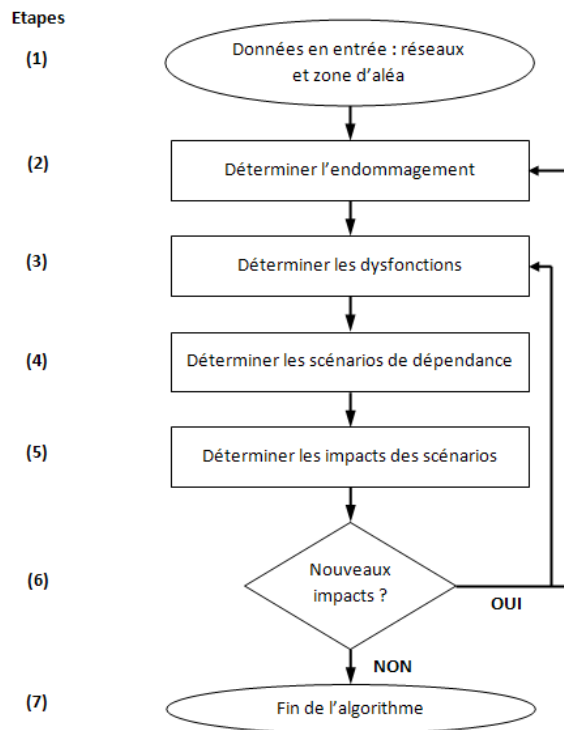


Figure 6.10 : Algorithme correspondant à la procédure générale d'analyse des capacités de résistance des réseaux techniques.

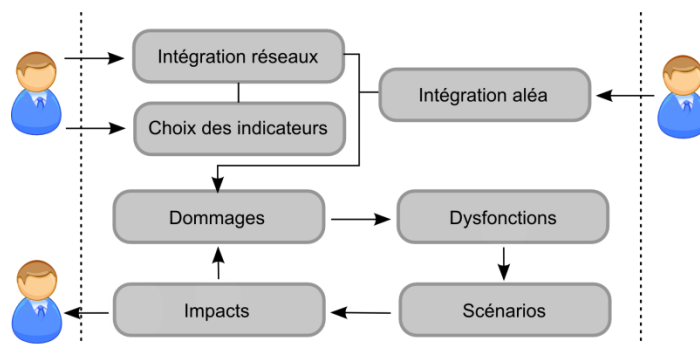


Figure 6.11 : Diagramme de cas d'utilisation de la procédure permettant d'analyser les capacités de résistance des réseaux techniques face aux inondations.

L'utilisateur doit premièrement intégrer les données liées aux réseaux techniques (Fig. 6.11). Tous les arcs et les nœuds doivent posséder un identifiant, un nom correspondant à la nomenclature de l'AMDE et un indicateur caractérisant son état (en l'occurrence une valeur allant de 1 à 3). De plus, pour chaque arc, un nœud de départ et

un nœud d'arrivée doivent être spécifiés. Deuxièmement, l'utilisateur doit préciser les indicateurs choisis pour simuler le fonctionnement de chaque réseau. Il est possible de définir des indicateurs différents pour chaque réseau. Parallèlement à ces deux étapes, l'utilisateur doit aussi intégrer les données liées à l'aléa.

Cette implémentation permet alors de déterminer les composants qui dysfonctionnent, et en particulier d'identifier ceux qui sont endommagés nécessitant ainsi des interventions *in situ* pour les remettre en service. Cette identification permettra d'analyser par la suite les capacités de récupération qui caractérisent en partie la résilience de ce système. Cette démarche permet donc d'analyser les capacités de résistance des réseaux techniques.

6.3.2 Application de la démarche à un cas fictif

Les données concernant les réseaux techniques sont difficilement disponibles et peu publiables, notamment à l'échelle d'une ville. C'est pourquoi, le cas d'étude présenté ici pour mettre en pratique la démarche développée est fictif (Fig. 6.12).

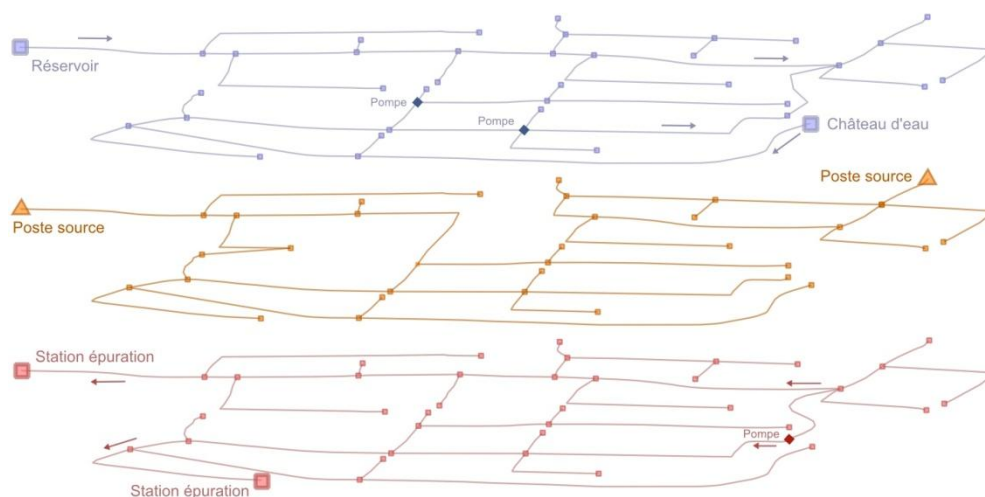


Figure 6.12 : Les différents réseaux techniques analysés et la position de certains enjeux. En bleu le réseau d'eau potable, en jaune le réseau électrique, en rouge le réseau d'assainissement.

Ce cas d'étude implique trois réseaux techniques dont les caractéristiques sont décrites succinctement ci-dessous (Tab. 6.3). Ces réseaux sont en grande partie arborescents bien que présentant en quelques points un certain maillage. En effet, il s'agit de réseaux de distribution qui sont généralement peu maillés. Chaque composant des différents réseaux techniques est caractérisé par une valeur définissant son état. En outre, un algorithme a été développé afin de représenter les réseaux techniques sur une même carte sans qu'ils se superposent (Fig. 6.12).

Type de réseau	Nombre de points	Nombre d'arcs	Éléments particuliers
Electrique	35	35	2 postes sources ; 2 transformateurs
Assainissement	39	38	2 stations de traitement ; 4 pompes de relevage
Eau potable	39	38	1 château d'eau ; 2 réservoirs ; 3 pompes de relevages

Tableau 6.3 : Les principales caractéristiques des réseaux étudiés.

Les différents composants des différents réseaux sont globalement en bon état. C'est pourquoi, ces réseaux techniques se révèlent peu endommagés par l'aléa de référence choisi (Fig. 6.13). Par exemple, le réseau électrique ne subit aucun dommage. De plus, la plupart des composants endommagés ne sont pas centraux pour les réseaux d'eau potable et d'assainissement. Ces endommagements n'ont donc pas une incidence majeure sur le fonctionnement de ces réseaux.

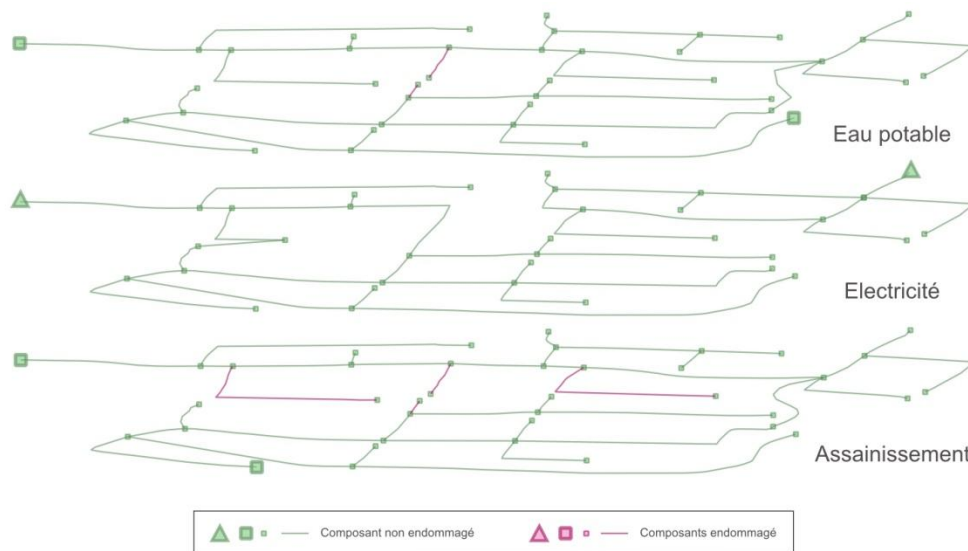


Figure 6.13 : Carte représentant les endommagements directs sur les différents réseaux.

En revanche, l'endommagement d'une canalisation du réseau d'assainissement causera vraisemblablement l'endommagement d'une autre canalisation située hors d'eau. C'est alors l'endommagement de cette canalisation située hors d'eau qui va probablement provoquer un dysfonctionnement sur une partie de ce réseau (Fig. 6.14). Pour le réseau d'assainissement, c'est l'indicateur « au moins une source » qui a été choisi pour simuler le fonctionnement du réseau. C'est pourquoi, la partie Nord-Est du réseau continue à fonctionner, puisque le flux peut être réorienté en direction de la station de traitement située au Sud-Ouest, en lieu et place de celle située au Nord-Ouest.

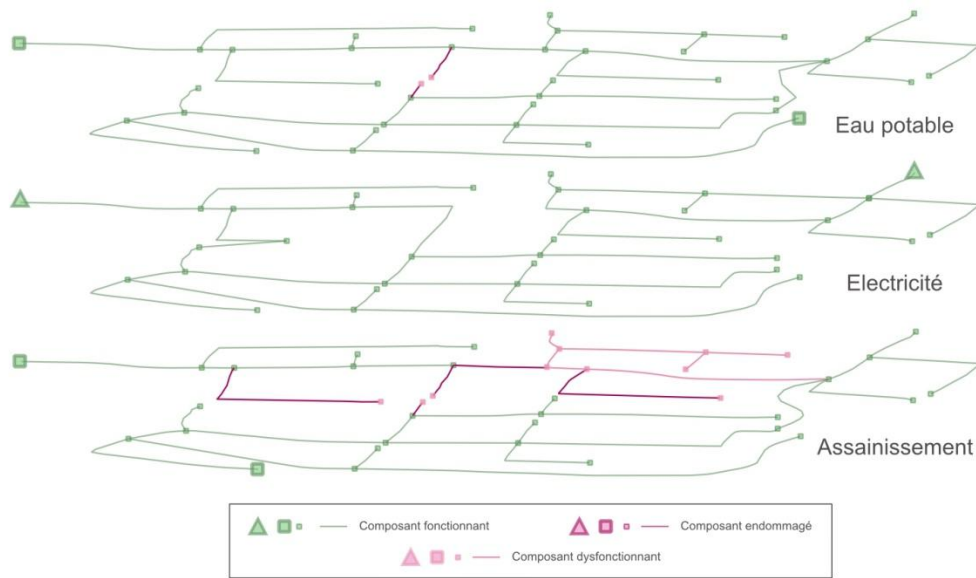


Figure 6.14 : Les endommagements et les premiers dysfonctionnements identifiés lorsque les réseaux sont étudiés isolément.

Néanmoins, à ce stade de l’analyse, les impacts induits par l’aléa de référence sur les réseaux techniques restent encore marginaux. En fait, la grande majorité des impacts finaux sont produits dans cet exemple par les interdépendances entre les différents réseaux techniques. En effet, dans cette configuration et compte tenu de l’état des différents composants, l’endommagement d’une canalisation du réseau d’assainissement peut provoquer l’endommagement d’une partie du réseau électrique, pourtant située hors d’eau (Fig. 6.15).

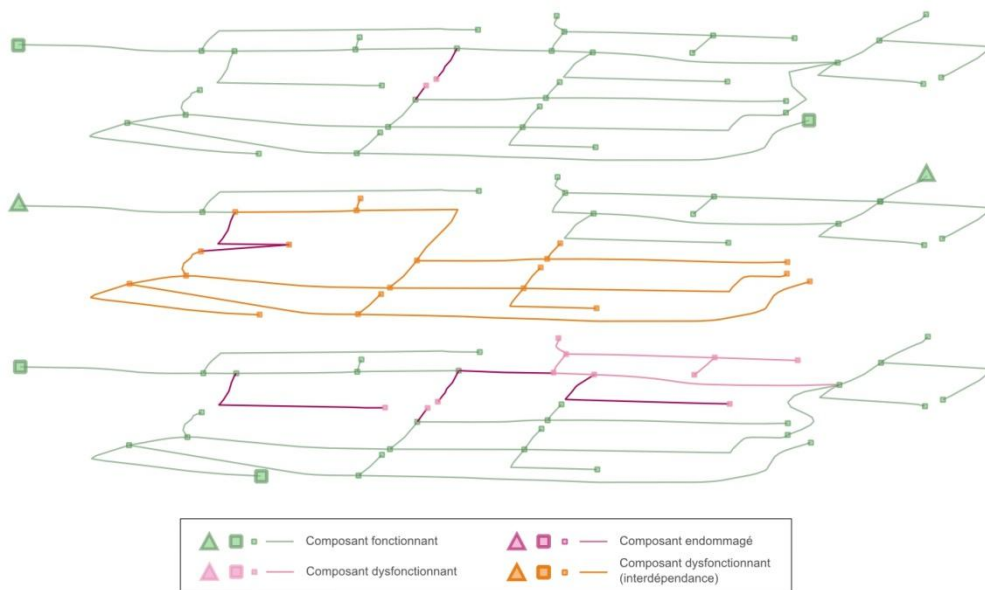


Figure 6.15 : Le dysfonctionnement du réseau électrique consécutif à l’endommagement d’une partie de son réseau par le réseau d’assainissement.

Cet endommagement induit une réorientation des flux au sein de ce réseau, provoquant alors une surcharge importante d'une partie du réseau (Fig. 6.15). Ainsi, l'indicateur choisi pour le réseau électrique (l'indicateur de centralité avec un seuil de surcharge fixé à 50%) met en exergue un dysfonctionnement important d'une partie du réseau électrique. Des pompes de relevage ne sont alors plus alimentées provoquant ainsi le dysfonctionnement d'une partie du réseau d'assainissement et du réseau d'eau potable (Fig. 6.16).

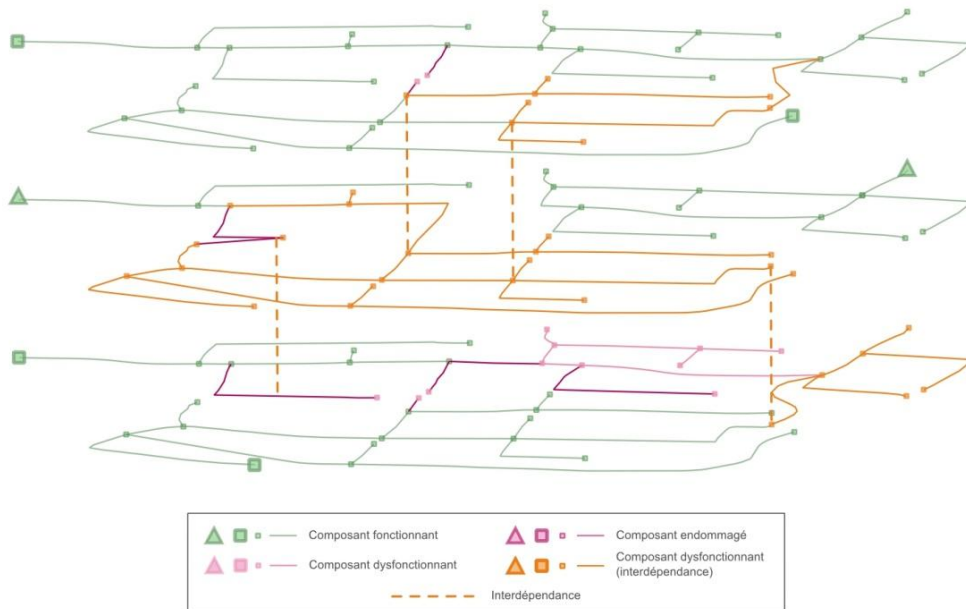


Figure 6.16 : Carte finale du cas théorique présenté.

Les résultats obtenus sur ces réseaux techniques fictifs permettent de démontrer la pertinence de cette démarche. Néanmoins, les résultats sont amenés à évoluer en fonction des indicateurs utilisés et des seuils choisis pour ces indicateurs. Ainsi, si le seuil choisi pour le réseau électrique était plus tolérant, le réseau électrique continuerait à fonctionner tout comme une grande partie des réseaux d'eau potable et d'assainissement. Or, ces seuils sont difficiles à déterminer. De plus, les informations relatives à l'état du réseau jouent un rôle important dans ces scénarios, alors même que cet état est lui aussi difficile à déterminer. Ces variations peuvent alors être jugées problématiques. Cependant, dans les faits, ces variations montrent l'intérêt de cette approche qui place l'utilisateur dans une démarche réflexive en lui permettant de tester différents scénarios.

Une démarche générale d'analyse des réseaux techniques dans un contexte de risques a été développée. Cette démarche, qui a recours à des indicateurs structurels et prend en compte les interdépendances entre les réseaux techniques, a été implémentée au sein d'un SIG. Cette implémentation a permis de tester cette démarche sur des réseaux fictifs. Ce cas d'étude démontre alors la pertinence de la

démarche développée, mais souligne aussi ses limites. En effet, selon les seuils attribués aux indicateurs, les résultats pourront être différents. Or, ces seuils sont difficiles à fixer. De plus, l'état du réseau joue un rôle important, alors même que cet état est lui aussi difficile à déterminer. Néanmoins, cet outil permet de tester différents scénarios et il permet de mieux appréhender les problématiques d'interdépendances entre les réseaux techniques, en plaçant l'utilisateur dans une démarche réflexive.

6.4 SYNTHÈSE DU CHAPITRE 6

Ce chapitre s'est concentré sur la modélisation des interdépendances entre les réseaux techniques, mais l'état de l'art réalisé concerne plus largement les infrastructures critiques. Il apparaît alors que la modélisation des interdépendances entre les infrastructures critiques est un domaine de recherche plutôt récent. Dans les faits, il n'existe pas une méthode unique pour modéliser, simuler et explorer les interdépendances entre les infrastructures critiques. Chaque méthode possède ses avantages et ses inconvénients. Quoi qu'il en soit, la plupart des méthodes analysées nécessitent de connaître *a priori* les interdépendances entre les infrastructures critiques. Or, les connaissances en la matière font défaut. La plupart des méthodes étudiées ne prétendent donc pas à l'exhaustivité et se focalisent davantage sur les problématiques de simulation.

Néanmoins, l'analyse des approches utilisant les réseaux de Pétri a fait apparaître que les méthodes issues de la Sûreté de Fonctionnement offraient un cadre intéressant pour identifier et modéliser les interdépendances entre les infrastructures critiques. En effet, ces méthodes ont fait leur preuve dans les milieux industriels afin d'effectuer des analyses de risques et plus généralement de modéliser des systèmes complexes. La méthodologie développée repose alors sur une phase d'analyses fonctionnelles, la réalisation d'AMDE et des modélisations sous forme d'arbres d'événements ou de défaillances. Cette méthodologie permet ainsi de produire des scénarios de défaillances pour des systèmes complexes fortement interdépendants comme les réseaux techniques. Cependant, la validation de cette méthodologie se révèle difficile. Quoi qu'il en soit, les scénarios obtenus (synthétisés à l'aide d'une analyse statistique générale) ne semblent pas rentrer en contradiction avec les Retours d'EXpérience analysés.

Enfin, la combinaison d'une approche structurelle et de la modélisation des interdépendances entre les réseaux techniques permet de simuler (certes avec des imprécisions) le comportement de ces réseaux face aux inondations. Ainsi, une fois la démarche automatisée, celle-ci permet d'analyser les capacités de résistance des réseaux techniques face aux inondations. La possibilité d'intervenir sur les modes de défaillance (en modifiant l'AMDE) et sur les seuils de tolérance permet de mettre en place une approche très réflexive. Cette approche contribue alors à nourrir les réflexions sur les modes de protection de ces infrastructures réseaux.

Chapitre 7

Analyser la remise en service des réseaux techniques

La troisième thématique de recherche mise en exergue par la méthodologie développée concerne l'analyse de la remise en service des réseaux techniques. Plus précisément, il s'agit d'identifier, au sein d'un territoire, les composants les plus problématiques à remettre en service après un événement dommageable. Ces composants peuvent notamment se révéler problématiques à remettre en service s'ils sont difficilement accessibles. Cette recherche va alors se concentrer sur l'évaluation de cette accessibilité. Ainsi, en exposant clairement les limites d'une méthode d'analyse de la remise en service des réseaux techniques uniquement fondée sur des critères spatiaux, il est possible de mettre en pratique cette méthode tout en justifiant la pertinence de celle-ci.

L'analyse de la remise en service des réseaux techniques constitue une thématique de recherche instituée en matière de gestion des risques sismiques. En effet, des séismes passés ont déjà souligné les enjeux attachés à la remise en service des réseaux techniques. Ainsi, il a fallu près de 60 jours dans certaines parties du Japon pour rétablir le réseau d'eau potable suite au séisme de Kobe (Chang et al., 2002). Si des systèmes alternatifs ont pu être mis en place pour permettre l'approvisionnement en eau potable des populations, une telle situation reste peu tolérable. Or, il est extrêmement difficile de réduire la vulnérabilité intrinsèque de ces infrastructures aux séismes. L'optimisation de la remise en service de ces réseaux représente donc un enjeu de tout premier ordre et des travaux dans ce domaine ont donc émergé (Cagnan & Davidson, 2004 ; Xu et al., 2007).

Dans un premier temps, il convient donc d'explorer cette littérature qui a déjà produit de nombreux résultats intéressants. Par exemple, à partir d'une estimation des coûts engendrés par un séisme sur le réseau d'électricité, il est possible de déduire le coût total de ce séisme pour une entreprise donnée (Dahlhamer et al., 1999). De plus, si cette interruption dure plus de 24 heures, les dommages occasionnés augmentent de façon exponentielle (Dahlhamer et al., 1999). Ainsi, la relation entre le temps de coupure et le coût économique de cette coupure n'est donc pas linéaire. D'ailleurs, une étude menée à Memphis auprès de différentes entreprises montre que le temps médian acceptable d'une coupure en électricité est de seulement 48 heures. Au-delà, cette coupure est dans la majorité des cas intolérable (Tierney & Dahlhamer, 1998).

Dans un premier temps, il apparaît que les travaux relatifs à l'analyse de la remise en service des réseaux techniques peuvent être classés en deux grandes familles.

Premièrement, des travaux ont pour objectif de modéliser la remise en service post-catastrophe des réseaux techniques afin d'améliorer leur gestion (Cagnan & Davidson, 2004). Deuxièmement, d'autres travaux cherchent plus précisément à optimiser cette remise en service en s'appuyant sur des modèles d'optimisation (Xu et al., 2007).

Dans un deuxième temps, la méthode développée est présentée. Elle s'appuie alors sur les travaux présentés afin d'identifier au mieux les composants les plus problématiques à remettre en service, en ayant pour cela uniquement recours à des critères spatiaux. Cette tentative bien qu'imparfaite peut se révéler pertinente.

7.1 MODELISATION ET OPTIMISATION DE LA REMISE EN SERVICE DES RESEAUX TECHNIQUES

Actuellement, les recherches concernant la remise en service des réseaux techniques se concentrent sur la modélisation de ce processus et sur son optimisation. Ces deux grandes familles vont donc être présentées. Plus précisément, différentes approches seront développées afin d'analyser leurs avantages et leurs inconvénients. Bien que ces deux familles soient présentées de manière distincte, la modélisation de la remise en service des réseaux techniques et son optimisation peuvent se combiner et constituent parfois une même continuité (Cagnan & Davidson, 2004).

7.1.1 Modéliser la remise en service post-catastrophe

L'estimation du temps nécessaire pour remettre en service une infrastructure réseau constitue un des principaux apports des travaux en matière de modélisation de la remise en service post-catastrophe des réseaux techniques. Ainsi, à l'aide de cette estimation, il devient possible d'évaluer les impacts économiques liés à ces dysfonctionnements. Or, sachant que ces coûts économiques peuvent très rapidement devenir importants, il est nécessaire de modéliser précisément cette remise en service. En effet, une petite imprécision sur la modélisation de la remise en service impliquera un écart important entre l'évaluation *a priori* des impacts potentiels et l'évaluation *a posteriori* des impacts réellement induits par une catastrophe.

➤ *L'approche statistique*

L'approche statistique poursuit un objectif principal : évaluer le plus précisément possible le temps nécessaire à la remise en service des réseaux techniques (Nojima et al., 2001) ou dans une même continuité les coûts induits par cette indisponibilité (Chang et al., 1996 ; Shinozuka et al., 1998). De plus, cette approche se révèle très importante en matière d'analyse de la remise en service des réseaux techniques. En effet, les résultats obtenus par cette approche sont souvent utilisés dans de nombreuses approches cherchant à modéliser précisément cette remise en service (Dodo et al., 2004).

Cette approche est résolument empirique, puisqu'elle se fonde sur l'hypothèse qu'il est possible de déduire les conséquences d'événements futurs à partir de l'analyse d'événements passés. Ainsi, cette approche requiert des bases de données exhaustives d'événements passés pour affiner au mieux les modèles. Si les données disponibles ne sont pas assez exhaustives, il est possible d'avoir recours à des experts pour compléter la base de connaissances. Le recours aux experts est alors le plus souvent mené par le biais d'interviews (Cagnan & Davidson, 2004). A partir de ces données, l'approche statistique permet d'élaborer des courbes de remise en service (« *restoration curve* »). Ces courbes ont pour objectif d'établir des relations entre le nombre de jours d'indisponibilité du réseau analysé et l'intensité des dommages associés à cette indisponibilité ou d'établir des relations entre la probabilité qu'une infrastructure soit remise en service et le temps écoulé après une catastrophe (Fig. 7.1).

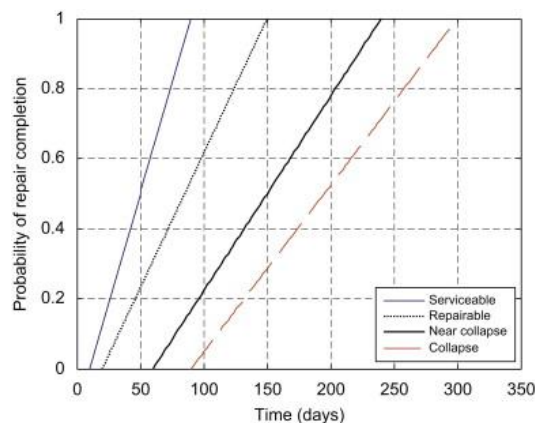


Figure 7.1 : Exemple de courbes de remise en service correspondant à la probabilité qu'un terminal portuaire soit remis en service en fonction du temps écoulé après un séisme (Na & Shinozuka, 2009).

Deux méthodes sont utilisées pour obtenir ces courbes. La première recherche la courbe permettant d'obtenir la meilleure approximation possible. La deuxième méthode se fonde sur la recherche d'une courbe optimale correspondant à un type de fonction bien spécifique, l'objectif étant *in fine* de trouver les paramètres optimaux de cette fonction. Par exemple, il convient dans cette deuxième méthode de postuler que la forme de la courbe de remise en service est de forme log-linéaire, puis de déterminer les coefficients permettant d'obtenir la meilleure approximation (Selingson et al., 1991).

La principale limite de cette approche est qu'elle ne tient pas compte du fonctionnement des réseaux techniques et de leurs contraintes spatiales. Or, la configuration des réseaux influe directement sur leur remise en service (Tabucchi et al., 2007). Objectivement, les courbes produites ne sont précises que si celles-ci concernent un réseau spécifique qui n'a pas évolué depuis les événements de référence. Dans le cas contraire, elles constituent des approximations pouvant se révéler fortement imprécises. D'ailleurs, le manque de données et le manque de pertinence de ces données nécessitent souvent d'avoir recours aux avis d'un certain nombre d'experts. Ainsi, ces courbes ne

peuvent être transposées d'un territoire à un autre et toute évolution du réseau remet en question cette méthodologie.

➤ *L'analyse des ressources*

Contrairement à l'approche précédente, l'analyse des ressources se focalise sur les contraintes relatives aux ressources (personnels, matériels...) disponibles pour faire face à un événement majeur (Cagnan & Davidson, 2004). Cette approche est plus théorique que l'approche statistique. Elle se fonde sur des modèles mathématiques à base d'équations ou de règles (Tabucchi et al., 2007). Ces modèles sont pour la plupart plutôt simples. Ainsi, les contraintes relatives à la limite des ressources disponibles sont prises en compte en spécifiant le nombre de réparations pouvant être effectuées dans un temps donné en fonction du personnel disponible (Ballantyne, 1990 ; Chang et al., 1999). L'analyse des ressources permet alors de modéliser l'état d'avancement de la remise en service d'un réseau à travers le temps et l'espace. De plus, cette approche permet aussi d'analyser les effets éventuels d'une politique de réduction des risques (Chang et al., 1999).

Généralement, les modèles mathématiques utilisés considèrent que les taux de personnels et de matériels disponibles durant la remise en service ne varient pas dans le temps. Certaines recherches vont même jusqu'à considérer ces taux comme étant proportionnels à la population (Chang et al., 2002), puisque ce type d'informations est particulièrement difficile à obtenir. Ainsi, des comparaisons entre les résultats obtenus avec certains modèles théoriques et la réalité d'un événement ont montré les limites de ces modèles. En effet, les résultats obtenus à partir des modèles développés ne correspondent pas nécessairement à la réalité du terrain, comme par exemple pour le séisme survenu à Kobe en 1995 (Chang et al., 1999). Néanmoins, des modèles fondés sur des équations différentielles permettent de faire varier les valeurs des variables au cours du temps et par conséquent de corriger certains biais (Isumi & Shibuya, 1985).

La principale limite de ces modèles ne réside pas tellement dans les hypothèses simplificatrices qui sont faites – puisque ces modèles peuvent davantage être considérés comme des modèles théoriques permettant de s'affranchir de données difficiles à obtenir et permettant alors de produire des résultats systématiques propices à des comparaisons – mais plutôt dans le fait que ces modèles ne tiennent pas compte d'une estimation préalable des dommages (Tabucchi et al., 2007). Par conséquent, ces modèles ne tiennent pas compte d'une plus ou moins grande sensibilité des territoires envers des aléas d'intensités diverses.

➤ *La simulation par événements discrets*

Une simulation à événements discrets est une modélisation informatique où l'état d'un système est représenté par une séquence chronologique d'événements discrets (Ross, 2002). Chaque événement arrive à un instant donné et modifie l'état du système. Tout l'enjeu pour cette approche est alors de déterminer au préalable les effets de chaque événement sur le système. La simulation à événements discrets est une approche de

simulation dynamique qui peut être déterministe ou stochastique (Cagnan & Davidson, 2004).

Les éléments clés dans une simulation à événements discrets sont les entités, les variables et les événements (Cagnan & Davidson, 2004). Les entités correspondent aux différents objets réels qui présentent un intérêt pour le fonctionnement du système étudié (par exemple, des sous-stations, des stations de pompage...). Les ressources sont des entités particulières, car elles fournissent des services à d'autres entités (par exemple, les équipes d'évaluation des dommages vont permettre le rétablissement des stations de pompage...). Les variables décrivent l'état du système (par exemple, l'état d'endommagement...). Ces variables peuvent être spécifiques à une entité ou bien être globales. Les simulations reposent alors sur le suivi temporel de l'évolution de certaines variables (Ross, 2002). Lorsqu'un événement se produit (par exemple, l'inspection ou la réparation d'une composante) les valeurs des variables sont simplement mises à jour.

L'objet de la simulation discrète est de déterminer l'ensemble de ces éléments clés. C'est pourquoi, dans le contexte de la remise en service des réseaux techniques, ces simulations nécessitent une bonne compréhension des opérations de réparation (Cagnan & Davidson, 2004). C'est à l'aide de cette connaissance que la simulation sera par exemple en mesure d'estimer des courbes de remise en service quantitatives. Ainsi, la mise en place de cette approche requiert un échange d'informations avec les gestionnaires des réseaux techniques pour :

- connaître et localiser les ressources (hommes et matériels) disponibles ;
- connaître les procédures de remise en service mises en place ;
- connaître les ressources nécessaires pour chaque réparation ;
- connaître l'efficacité des équipes.

De plus, la simulation par événements discrets requiert des estimations concernant les dommages physiques causés par une perturbation sur l'ensemble des infrastructures étudiées. En effet, ces dommages déterminent le scénario initial de la simulation. Ainsi, les travaux portant sur l'analyse de la remise en service du réseau électrique à Los Angeles suite à un séisme d'une amplitude donnée (Cagnan & Davidson, 2004) s'appuient sur les dommages estimés par le modèle du MCEER-LADWP (Shinozuka et al., 1998 ; Dong, 2002).

Le principal apport de cette approche est qu'elle permet d'analyser progressivement le processus de remise en service des réseaux techniques. Cette simulation ne produit pas qu'un simple résultat final, correspondant au temps nécessaire pour remettre en service les réseaux techniques, elle décompose entièrement ce processus pour le reproduire. A l'aide de cette simulation, il est ainsi possible d'identifier les obstacles qui nuisent à une remise en service optimale. En identifiant ces freins, il devient donc possible de mettre en place les solutions permettant d'améliorer cette remise en service. Puis, en comparant les

résultats entre différentes stratégies de gestion, il est possible de choisir celle qui permet d'obtenir la remise en service la plus optimale (la plus rapide, la moins coûteuse...).

Cette modélisation par événements discrets permet d'obtenir les modélisations les plus détaillées. La précision de cette approche ne dépend alors plus tellement des méthodes scientifiques employées (mis à part pour l'estimation des dommages), mais provient plutôt de la qualité des informations fournies par les gestionnaires des réseaux techniques. Ainsi, si ces modélisations sont très détaillées (à condition d'avoir accès à certaines données difficilement accessibles), elles sont limitées par les connaissances des gestionnaires sur des problématiques complexes (ressources et temps nécessaires pour chaque réparation, efficacité des équipes...). C'est pourquoi, les derniers développements en la matière privilégient des approches stochastiques (Cagnan & Davidson, 2004).

7.1.2 Optimiser la remise en service

D'autres travaux se focalisent sur des problématiques d'optimisation. L'objectif est alors de minimiser le temps d'indisponibilité des réseaux techniques pour l'ensemble des consommateurs en organisant au mieux leur remise en service (*i.e.* en hiérarchisant au mieux les interventions) (Xu et al., 2007). Ces travaux sont plus rares que ceux concernant la modélisation de la remise en service post-catastrophe des réseaux techniques (Xu et al., 2007). En effet, ces travaux ont la particularité d'être à la croisée entre d'une part des recherches centrées sur la modélisation de la remise en service des réseaux techniques et d'autre part des problématiques issues de l'optimisation linéaire (Kozin & Zou, 1991). Ainsi, ces recherches se révèlent particulièrement complexes, puisqu'elles nécessitent théoriquement des connaissances approfondies en mathématiques (pour l'optimisation linéaire), en ingénierie et en management des organisations (pour la modélisation de la remise en service).

Quoi qu'il en soit, plusieurs approches ont été développées. Ces approches se distinguent par des « problématiques » plus ou moins distinctes bien que l'objectif final soit finalement le même (*i.e.* optimiser la remise en service). Ainsi, afin d'optimiser la remise en service, trois problématiques ont été soulevées :

- Quelles infrastructures les gestionnaires doivent-ils prioritairement remettre en service (Nojima & Kameda, 1992) ?
- Où et quand les gestionnaires doivent-ils précisément affecter leurs ressources durant la crise (Kozin & Zou, 1991 ; Xu et al., 2007) ?
- Où les gestionnaires doivent-ils placer leurs dépôts ? Est-il de surcroît nécessaire de créer de nouveaux dépôts (Wang et al., 2004) ?

En fonction des hypothèses retenues, la première problématique peut requérir d'identifier les éléments les plus critiques (si par exemple l'approche ne tient pas compte des ressources dont disposent les gestionnaires et des aspects temporels relatifs à la remise en service). En effet, plus une infrastructure est critique, plus celle-ci occasionnera

des perturbations importantes. Ainsi, afin de minimiser l'indisponibilité des réseaux, il convient de se focaliser prioritairement sur la remise en service des éléments susceptibles d'affecter un grand nombre d'utilisateurs. C'est pourquoi, il a été proposé d'identifier les éléments qui (analysés individuellement) causeraient les impacts les plus importants (en termes de pertes de connectivité par exemple), pour chercher dans un deuxième temps « l'ordonnement » optimal des réparations (*i.e.* organiser dans le temps la réalisation des réparations de manière optimale) (Nojima & Kameda, 1992). Ces travaux combinent donc une problématique d'analyse de la vulnérabilité structurelle des réseaux techniques (Chap. 5) et une problématique d'ordonnement assez classique en optimisation linéaire.

Dans une même continuité, répondre à la deuxième problématique permet aussi de répondre à la première problématique, puisque si l'on sait déterminer où et à quel moment les ressources doivent être affectées en période de crise, il est possible de déduire quelles infrastructures doivent être prioritairement remises en service. La première problématique est en fait plus ouverte que la deuxième, puisqu'il est possible de ne pas tenir compte des contraintes relatives aux ressources disponibles afin d'y répondre, tandis que la deuxième problématique est centrée sur la gestion de ces ressources (Kozin & Zou, 1991 ; Xu et al., 2007).

A partir de certaines approches de modélisation dynamique de la remise en service, il est possible d'évaluer les impacts – en termes de coûts ou de personnes affectées – des choix stratégiques effectués pour améliorer la remise en service. Il convient dès lors d'identifier les choix stratégiques optimaux en tenant compte des ressources disponibles. Pour cela, des travaux proposent d'utiliser les modélisations issues des simulations par événements discrets (Xu et al., 2007) tandis que d'autres proposent d'utiliser des processus de Markov (Kozin & Zou, 1991). Le problème revient alors à minimiser une fonction (correspondant par exemple au nombre de personnes affectées par une coupure d'électricité en fonction du temps) en tenant compte de contraintes (comme par exemple la limite du matériel disponible pour la remise en service des réseaux techniques).

Ce problème d'optimisation linéaire peut se révéler plus ou moins complexe en fonction des hypothèses prises pour le résoudre (comme par exemple faire varier ou non les ressources disponibles au cours du temps). Quoi qu'il en soit, ce problème s'apparente à un problème de gestion de projet à contraintes de ressources ou « *Resource-Constrained Project Scheduling Problem* » (RCPS) (Xu et al., 2007). Ce problème est NP-difficile, il ne peut donc être résolu de manière optimale que par des algorithmes de complexité exponentielle. Les temps de calcul deviennent ainsi très importants pour un nombre relativement faible d'éléments à prendre en considération. C'est pourquoi, des algorithmes heuristiques (donnant ainsi des résultats qui ne sont pas nécessairement optimaux mais qui s'en approchent avec des temps de calcul raisonnables) sont utilisés pour résoudre ces problèmes (Xu et al., 2007).

La troisième problématique se réfère à des modèles de localisation-allocation qui constituent un autre domaine classique de l'optimisation linéaire (7.2.2). L'objectif de ces

modèles est d'identifier les localisations optimales (*i.e.* généralement les localisations qui minimisent les coûts de transport) pour implanter des sites de distribution (comme des sites de production devant desservir des magasins, des dépôts devant desservir des clients...). Ces modèles ont pu être utilisés dans le but d'optimiser la remise en service (Wang et al., 2004). Par exemple, lors de catastrophes engendrant de nombreux dommages sur les réseaux techniques, pour remettre en service ces réseaux, il est bien souvent nécessaire de faire appel à des aides extérieures fournissant divers équipements. L'objectif des gestionnaires est alors de disposer au mieux ces différents équipements, afin de minimiser les coûts de transport et ainsi optimiser la remise en service.

Pour cela, des dépôts provisoires doivent être installés. Ces dépôts contiennent diverses ressources comme des transformateurs, des groupes électrogènes, des câbles électriques... La question suivante se pose alors : où disposer ces dépôts (Wang et al., 2004) ? Pour répondre à cette question des algorithmes spécifiques ont été développés (Wang et al., 2004). Une fois encore ces algorithmes sont des algorithmes heuristiques. En effet, les modèles localisation-allocation sont eux aussi NP-difficiles. Ainsi, si les solutions exactes à ces problèmes d'optimisation peuvent être trouvées, cela n'est possible que pour un nombre relativement faible de sites (Wang et al., 2004).

De plus, des développements ont été effectués afin de déterminer s'il est nécessaire, dans une situation donnée, d'installer de nouveaux dépôts. Pour cela, il convient de tenir compte des coûts engendrés par la mise en place d'un nouveau dépôt. Par exemple, les bénéfices pouvant être obtenus par la construction d'un nouveau dépôt (bénéfices obtenus par la diminution des coûts de transport) peuvent être confrontés aux coûts engendrés par sa construction (Wang et al., 2004). Il est ainsi possible de déterminer si son installation est pertinente d'un point de vue économique (*i.e.* rentable).

Ces trois problématiques peuvent se résumer à des problèmes d'optimisation linéaire. Si l'apport de ces travaux, en termes d'amélioration de la protection des infrastructures réseaux, est potentiellement important, chaque approche comporte néanmoins ses limites. La première simplifie les problématiques d'optimisation de remise en service en ne tenant pas compte de la gestion des ressources disponibles. La seconde requiert des modélisations de la remise en service dont les limites ont été présentées précédemment (7.1.1). Enfin, la troisième problématique requiert de connaître les besoins pour chaque site d'intervention. Or, généralement la mobilisation des ressources est effectuée alors même que les sites d'intervention et les ressources nécessaires ne sont pas encore précisément déterminés. Ce qui remet en question la portée opérationnelle des modèles développés.

La modélisation et l'optimisation de la remise en service des réseaux techniques peuvent être appréhendées de différentes manières. Chaque approche présente alors ses avantages et ses inconvénients. Dans les faits, plus ces approches sont précises, détaillées et semblent in fine satisfaisantes, plus celles-ci sont confrontées à des difficultés concernant leur mise en œuvre pratique : données difficilement

accessibles, voire absence totale de données ; nécessité de recourir à des experts sur des questions complexes qui nécessitent des approximations difficiles à évaluer...

7.2 ANALYSER LA REMISE EN SERVICE PAR DES CRITERES SPATIAUX

Si certaines approches aboutissent à des modélisations de la remise en service particulièrement détaillées, celles-ci requièrent de nombreuses données se révélant parfois particulièrement difficiles à obtenir. Il est alors nécessaire d'impliquer les gestionnaires des réseaux techniques pour obtenir ces données. Néanmoins, compte tenu du niveau de connaissances requis pour mettre en œuvre ces approches, les gestionnaires peuvent eux aussi ne pas avoir les données suffisantes pour de telles approches. Ainsi, il est souvent nécessaire d'avoir recours à des procédures d'expertise, sans que la validité de ces expertises puisse être évaluée.

Quoi qu'il en soit, les approches les plus détaillées tiennent compte de l'accessibilité des éléments endommagés vis-à-vis des centres chargés d'en opérer la réparation. Des approches tentent même d'identifier les localisations optimales pour implanter les centres en charge de la remise en service des réseaux techniques. La localisation des centres de remise en service vis-à-vis des composants endommagés joue donc un rôle important. Il apparaît dès lors nécessaire d'en analyser les spécificités.

7.2.1 Une méthode par agrégation de trois caractéristiques spatiales

Cette recherche accorde donc une importance particulière à l'accessibilité des composants endommagés. Il convient dès lors de déterminer une approche permettant d'identifier les difficultés d'accessibilité aux sites qui nécessitent des interventions. En effet, plus un site est difficilement accessible, plus sa remise en service peut être considérée comme problématique, en comparaison à d'autres sites plus accessibles. Comment évaluer alors cette accessibilité ?

La notion d'accessibilité renvoie à différentes acceptations. Elle peut en effet faire référence à une accessibilité géographique, à une accessibilité physique ou à une accessibilité sociale (CERTU, 2002). Dans les faits, l'évolution de la notion d'accessibilité traduit peu ou prou la manière dont l'aménagement urbain a envisagé les politiques de transport. Ainsi, d'une simple problématique d'efficacité, les politiques de transport ont progressivement évolué vers des problématiques d'égalité d'accès aux fonctions urbaines. L'aménagement des réseaux de transport n'est plus seulement une question technique, c'est aussi désormais une question d'ordre politique et sociale.

Quoi qu'il en soit, « en géographie, l'accessibilité d'un lieu est généralement définie comme la plus ou moins grande facilité avec laquelle ce lieu peut être atteint à partir d'un ou de plusieurs

autres lieux, par un ou plusieurs individus susceptibles de se déplacer à l'aide de tout ou partie des moyens de transport existants » (Chapelon, 2012). Dans ce contexte, l'accessibilité ne dépend pas seulement de critères spatio-temporels, elle dépend aussi du niveau de service du système de transport, qui est lui-même fonction de nombreux facteurs : densité de populations, densité d'activités, choix politiques...

Ainsi, dans le cas des transports individuels, le niveau de service offert est essentiellement fonction :

- de la structure du réseau (sinuosité et configuration des voies) ;
- de la qualité des infrastructures, appréhendée par leurs caractéristiques techniques (nombre et largeur des voies, existence d'un séparateur central de chaussées, etc.) ;
- des contraintes topographiques (pente, sinuosité) ;
- des réglementations en vigueur ;
- des caractéristiques techniques du véhicule utilisé ;
- de la congestion qui perturbe le fonctionnement du système et fait ainsi varier la qualité du service selon les jours de l'année et les heures de la journée.

Dans cette recherche, il convient néanmoins de limiter l'accessibilité à des critères uniquement spatiaux. En effet, l'analyse spatiale offre la possibilité d'appréhender les problématiques de remise en service des réseaux techniques avec un minimum de données (dans un domaine où les données peuvent être difficiles à obtenir) et de mettre en évidence certaines spécificités concernant les territoires étudiés. Dans ce contexte, trois indicateurs se sont révélés pertinents à évaluer : un indicateur de plus court chemin ; un indicateur d'ordonnement ; un indicateur de pénibilité.

➤ *Le plus court chemin (la longueur)*

Le principal critère définissant l'accessibilité à un point est celui du plus court chemin. Ainsi, « il existe un grand nombre d'indicateurs, souvent complémentaires, permettant d'évaluer l'importance relative des différentes composantes explicatives de l'accessibilité. Le point commun entre nombre de ces indicateurs réside dans le calcul préalable des plus courts chemins suivant une logique donnée (minimisation du temps de trajet, de sa longueur, de son coût, etc.) » (Chapelon, 2012). Il convient ainsi de souligner que certaines approches de modélisation et d'optimisation de la remise en service des réseaux techniques tiennent compte des temps de parcours (Cagnan & Davidson, 2004) ou des coûts de transport (Wang et al., 2004). Le plus court chemin est ainsi un critère fondamental concernant la remise en service des réseaux techniques.

C'est pourquoi, la méthodologie développée ici repose notamment sur un indicateur fondé sur les plus courts chemins (I_c). En fonction des données fournies ou de l'importance accordée à une logique particulière, cet indicateur cherchera alors à évaluer :

la distance minimale à un centre de remise en service pour chaque composant endommagé ; le temps de parcours minimal à un centre de remise en service pour chaque composant endommagé ; le coût de transport minimal à un centre de remise en service pour chaque composant endommagé. Cet indicateur peut donc être interprété de différentes manières. Pour prendre un exemple, si la logique du plus court chemin repose sur un critère de distance, plus un composant endommagé est éloigné du centre chargé de le remettre en service (en l'occurrence du centre le plus proche), plus celui-ci se révélera critique (Fig. 7.2) [27].

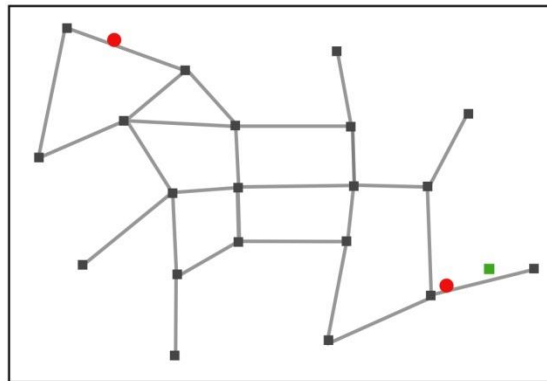


Figure 7.2 : Illustration de l'importance du plus court chemin pour la remise en service des réseaux techniques. En rouge les éléments endommagés et en vert le centre en charge de la remise en service. Dans ce cas, un composant endommagé est beaucoup mieux placé que l'autre. L'indicateur de plus court chemin met en évidence cette différence.

A l'instar de l'ensemble des indicateurs développés par la suite, cet indicateur est normalisé afin de permettre l'agrégation des résultats [28].

$$I_{cc}(i) = \text{Min} [d(i, j)] \quad [27]$$

$$I_{cc_norm}(i) = (I_{cc}(i) - \text{Min} [I_{cc}]) / (\text{Max} [I_{cc}] - \text{Min} [I_{cc}]) \quad [28]$$

Où $I_{cc}(i)$ est l'indicateur de plus court chemin pour i , $I_{cc_norm}(i)$ est l'indicateur de plus court chemin normalisé pour i , $d(i, j)$ est la plus courte distance entre i et j , i est un composant endommagé, j est un centre de remise en service.

➤ L'ordonnement

Le deuxième indicateur est aussi fondé sur des plus courts chemins. Néanmoins, il tient compte d'une réalité plus complexe. Ainsi, il ne suffit pas qu'un composant soit proche d'un centre de remise en service pour que sa remise en service soit facilitée. Dans les faits, il faut que ce composant soit plus proche que les autres composants vis-à-vis d'un centre particulier. En effet, comme les ressources disponibles pour faire face à des crises sont limitées, les centres de remise en service doivent hiérarchiser leurs interventions. Les centres de remise en service ont alors généralement des zones d'intervention déterminées. Ces zones sont notamment déterminées en fonction d'un

critère de distance, de coûts de transport ou de temps. Dans ces zones, sauf si un composant se révèle éminemment plus critique que les autres, l'ordre des interventions se fera par ordre de facilité d'accès, car cela permet de minimiser le temps d'indisponibilité des réseaux.

Conscient des limites d'une modélisation de la remise en service des réseaux techniques uniquement fondée sur des critères spatiaux, l'indicateur d'ordonnancement des interventions (I_{or}) permet alors de tenir compte d'aspects plus organisationnels. Ainsi, pour chaque centre de remise en service, les composants endommagés peuvent être classés par ordre croissant d'intervention (en l'occurrence, par ordre croissant de plus court chemin). L'indicateur d'ordonnancement retient alors pour chaque composant la valeur minimale de ces différents classements [29].

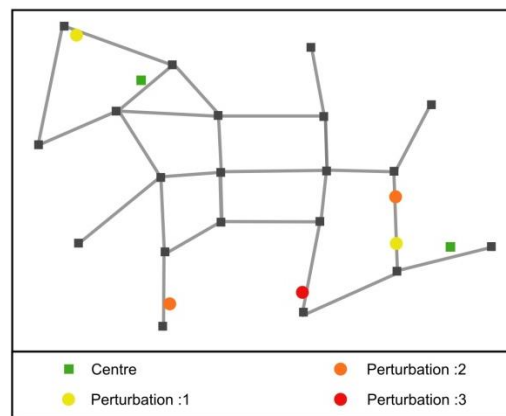


Figure 7.3 : Illustration du calcul de l'indicateur d'ordonnancement (I_{or}).

$$I_{or}(i) = \text{Min} [H(i, j)] \quad [29]$$

Où $I_{or}(i)$ est l'indicateur d'ordonnancement pour i , $H(i, j)$ est le classement par ordre croissant d'intervention du composant endommagé i pour le centre de remise en service j .

➤ La pénibilité (l'allongement)

Enfin, un troisième indicateur a été développé. En effet, dans le cas particulier de cette recherche, il semble essentiel de tenir compte de la position relative des composants endommagés et des centres de remise en service vis-à-vis des inondations. Dans les faits, « l'accessibilité ne renvoie pas uniquement à la seule possibilité d'atteindre ou non un lieu donné, mais elle traduit également la pénibilité du déplacement, la difficulté de la mise en relation appréhendée le plus souvent par la mesure des contraintes spatio-temporelles » (Chapelon, 2012). Ainsi, la pénibilité, dont il fait état ici, peut dans le contexte de ces recherches faire référence à l'allongement des plus courts chemins, causé par les inondations, entre les composants endommagés et les centres de remise en service (Fig. 7.4).

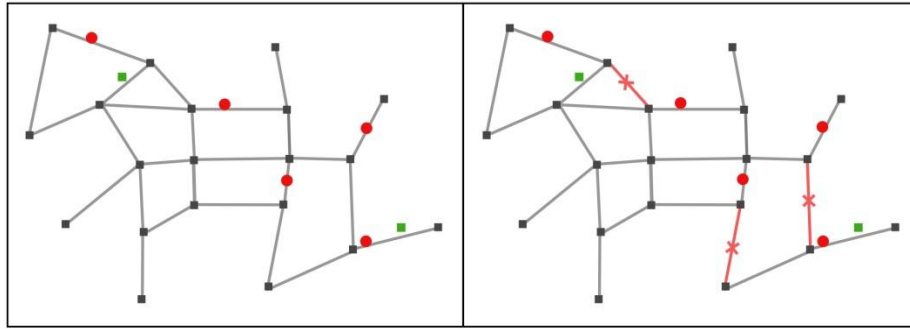


Figure 7.4 : Entre la situation en temps normal (à gauche) et la situation en période de crise (à droite) l'allongement des plus courts chemins entre les composants endommagés et les centres de remise en service peut avoir son importance.

Concrètement, cet allongement peut traduire une situation où, en période de crise, lorsque les informations sont amenées à manquer, les groupes d'intervention pourront être amenés à privilégier des interventions dans des zones apparaissant facilement accessibles, car peu touchées par les inondations. Ainsi, plus l'indicateur d'allongement augmente, plus la séparation physique (induite par les impacts de l'inondation sur le réseau viaire) entre les centres de remise en service et les composants endommagés conduira les gestionnaires à revoir la hiérarchisation de leurs interventions.

Pour conclure, les trois indicateurs développés peuvent être agrégés pour obtenir un indicateur synthétique d'accessibilité. Pour cela, il est simplement possible d'additionner les indicateurs normalisés en pondérant les valeurs de ces indicateurs en fonction de l'importance accordée à chacun des facteurs [30].

$$I_{acc}(i) = \gamma_{or} I_{or_norm}(i) + \gamma_{cc} I_{cc_norm}(i) + \gamma_{pe} I_{pe_norm}(i) \quad [30]$$

Où $I_{acc}(i)$ est l'indicateur d'accessibilité de i , $I_{or}(i)$ est l'indicateur d'ordonnancement pour i , $I_{cc}(i)$ est l'indicateur de plus court chemin pour i , $I_{pe}(i)$ est l'indicateur de pénibilité pour i , γ est un indicateur compris entre 0 et 1.

7.2.2 La prise en compte d'une situation optimale

Les indicateurs développés dans la partie précédente permettent de caractériser la situation présente. Néanmoins, il peut être intéressant, pour identifier des composants problématiques, de comparer cette situation présente à une situation jugée optimale. En effet, la répartition des centres de remise en service n'est généralement pas optimale. Cette répartition peut alors dégrader des situations déjà fortement problématiques. De plus, il peut sembler pertinent de différencier un composant endommagé dont l'accessibilité est médiocre quelle que soit l'organisation adoptée, d'un autre composant difficilement accessible car la localisation des centres de remise en service lui est très défavorable. Dans les deux cas, la réponse à apporter en termes de prévention est différente : il faut ainsi envisager un système de protection spécifique pour le premier et

repenser la localisation des centres de remise en service pour le deuxième si cela est possible.

Optimiser la localisation de ces centres de remise en service revient à résoudre un modèle de localisation-affectation (ou localisation-allocation). Ces modèles trouveraient leur origine dans des travaux comme ceux d'Alfred Weber (Belu, 2008). Alfred Weber cherchait alors à localiser un centre de production de manière à minimiser la distance pondérée entre ce centre et les sources de matières premières (Belu, 2008). En fait, le problème p-médian (un problème particulier de localisation-affectation) est beaucoup plus ancien, il remonte à Pierre de Fermat (1601-1665) qui posa le problème suivant : étant donné trois points dans un plan, trouver un quatrième point dont la somme des distances aux trois points donnés est minimum (la distance entre deux points étant mesurée par la longueur du segment les joignant). Cependant, Alfred Weber pose le problème sous sa forme moderne. Désormais, chaque modèle de localisation-allocation contient cinq composants essentiels :

- **la fonction objective** : elle tient compte de la distance séparant les points de demande des emplacements potentiels.
- **les points de demande** : ils représentent le niveau de la demande pour un certain type de produits (ou de services) à l'échelle d'une ville ou d'un quartier. En règle générale, ce sont des clients (dans cette recherche ce sont les composants endommagés).
- **les emplacements potentiels** : ce sont les emplacements envisageables pour les installations à implanter (points de vente, points de distribution, des dépôts, des centres de remise en service...).
- **la matrice d'éloignement ou de temps** : Cette matrice regroupe toutes les distances (kilométriques ou temporelles selon l'étude considérée) séparant les emplacements potentiels des différents points de demande.
- **la règle d'allocation** : dans un cas simple, il est possible de considérer que les clients (les centres de remise en service) seront desservis en priorité par les installations les moins éloignées de chez eux. La règle d'allocation choisie est alors la proximité géographique (c'est le cas dans cette recherche). Il est cependant possible d'envisager des règles d'allocation plus complexes.

A partir de cette formulation, les modèles de localisation-affectation sont nombreux (Thomas, 1986). Ainsi, le modèle de couverture maximale a pour but de maximiser « la demande potentielle » (souvent le nombre de clients, de consommateurs) en restant à une distance inférieure à une certaine limite. Ce type de modèle est, par exemple, utilisé pour les services publics (Trésor Public, Transport public, Mairie, Services Postiers...). Le modèle p-centré vise quant à lui à minimiser la distance maximale entre les clients et le service considéré. Ce modèle est utilisé pour déterminer des emplacements de services

d'urgence, tels que des localisations d'ambulances, d'hôpitaux, ou de casernes de pompiers.

Le choix d'un modèle dépend donc de la formulation du problème considéré. Une formulation fréquemment utilisée est celle du problème p-médian. Ce modèle présente l'avantage de trouver des solutions exactes (néanmoins les temps de calcul peuvent devenir très longs, car la complexité du modèle est d'ordre factoriel) et d'avoir une formulation souple se rapprochant ainsi de situations concrètes d'aménagement (Thomas, 1986). Le problème p-médian consiste alors à choisir la configuration géographique des unités d'offre de manière à minimiser la somme des distances parcourues sous une série de contraintes énoncées par l'utilisateur. Le modèle assure, en quelque sorte, la couverture efficace (voire équitable) du milieu (Thomas, 1986).

Pour résoudre ce problème, il faut la plupart du temps avoir recours à des algorithmes heuristiques. Un des algorithmes les plus utilisés est l'algorithme flou (*Fuzzy algorithm*). Cet algorithme se formalise alors comme suit : on se donne un graphe $G = (V, E)$ dont les sommets $V = \{V_1, V_2, \dots, V_n\}$ sont les n points représentant les points de demande potentiels (correspondant en l'occurrence aux composants endommagés) et on nomme E l'ensemble des arrêtes de ce graphe. On note alors :

- $d(i,j)$: la longueur du plus court chemin entre V_i et V_j
- w_j : la demande au point V_j

w_j correspond au poids du sommet V_j et représente la demande au point V_j . Le problème p-médian consiste alors à localiser p installations (des centres de remise en service) pour couvrir la demande de tous les sommets de façon optimale. En d'autres termes, cela revient à vouloir minimiser la distance entre chaque site de demande (les composants endommagés) et le centre le plus proche. On note alors :

- $y_i = 1$ si une installation est placée au point V_i et $y_i = 0$ sinon
- x_{ij} = la demande en V_j couvert par l'installation placée en V_i . (On considère en effet, que chaque composant peut être couvert par plusieurs installations).

Le but est ainsi de calculer :

$$\text{Min} \left[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n x_{ij} \times d(i,j) \right] \quad [31]$$

Et les contraintes sont les suivantes :

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=1}^n x_{ij} = w_j, 1 \leq j \leq n, \\ 0 \leq x_{ij} \leq w_j, 1 \leq i, j \leq n, \\ \sum_{i=1}^n y_i = p, y_i \in \{0,1\}, 1 \leq i \leq n \end{array} \right. \quad [32]$$

$$0 \leq x_{ij} \leq w_j, 1 \leq i, j \leq n, \quad [33]$$

$$\sum_{i=1}^n y_i = p, y_i \in \{0,1\}, 1 \leq i \leq n \quad [34]$$

- L'équation [32] assure qu'en tout sommet V_j , la somme des besoins couverts par les installations placées en V_i correspond bien au besoin total w_j du sommet V_j .
- L'inéquation [33] impose que la demande couverte par V_i pour le sommet V_j ne dépasse pas la demande totale w_j et dépend bien de la présence ou non d'une installation en V_i .
- L'équation [34] impose qu'il y ait exactement p installations placées sur le réseau.

Si les techniques pour résoudre ce système sont généralement assez complexes et lourdes à mettre en œuvre, le principe de l'algorithme flou est en revanche assez intuitif. Il repose sur un principe simple : localiser les sites sur le réseau un par un. Ainsi, l'algorithme détermine, dans un premier temps, le meilleur emplacement pour la première installation en calculant la fonction objective pour chaque nœud envisagé (l'algorithme retient alors simplement le nœud pour lequel la fonction objective est la plus faible). Ensuite, l'algorithme détermine un deuxième site en calculant de nouveau pour chaque nœud la fonction objective (sauf pour celui déjà occupé) et assigne à la localisation précédente les nœuds qui lui sont les plus proches (ces nœuds n'interviennent alors plus dans la détermination du nouveau site). De nouveau l'algorithme retient le nœud pour lequel la fonction objective est la plus faible. Cette opération est répétée à plusieurs reprises pour déterminer la localisation des p installations souhaitées.

Pour effectuer cet algorithme, plusieurs hypothèses doivent être faites :

- Il n'y a pas de limite de capacité pour un centre. C'est-à-dire que lorsqu'un centre est placé en un nœud, il peut subvenir à l'ensemble des besoins des autres nœuds dont il doit s'occuper (situés le plus près de lui).
- Le besoin d'un nœud est totalement satisfait par le centre situé le plus près de lui, peu importe combien de nœuds celui-ci doit gérer et peu importe les besoins de ces autres nœuds.
- Le besoin des différents nœuds est fixe et ne fluctue pas en fonction du temps.

A partir de cet algorithme, il est possible de déterminer la localisation optimale des centres de remise en service vis-à-vis d'endommagements identifiés au préalable. L'indicateur développé, nommé indicateur d'optimisation (*Iop*), compare alors la situation optimale par rapport à la situation réelle. En l'occurrence, l'indicateur compare les distances minimales des composants endommagés vis-à-vis de leur centre de remise en service le plus proche dans les deux cas [35]. Cet indicateur peut alors être additionné aux indicateurs précédents pour définir l'indicateur de récupération. Cet indicateur de récupération permet d'identifier les composants les plus problématiques à remettre en service après un événement dommageable [36].

$$I_{op}(i) = \text{Min} [d^*(i,j)] - \text{Min} [d(i,j)] \quad [35]$$

$$I_{rec}(i) = I_{acc}(i) + \gamma_{op} I_{op_norm}(i) \quad [36]$$

Où $I_{acc}(i)$ est l'indicateur d'accessibilité de i , $I_{rec}(i)$ est l'indicateur de récupération pour i , $I_{op_norm}(i)$ est l'indicateur d'optimisation normalisé pour i , $I_{op}(i)$ est l'indicateur d'optimisation pour i , $d(i,j)$ est la plus courte distance entre i et j , $d^*(i,j)$ est la plus courte distance optimale entre i et j , i est un composant endommagé, j est un centre de remise en service.

Cette partie a permis de déterminer un indicateur de récupération des composants endommagés en fonction de critères uniquement spatiaux. Cet indicateur permet plus exactement d'identifier les difficultés d'accessibilité aux sites nécessitant des interventions. Cet indicateur est issu de l'agrégation de quatre indicateurs normalisés : un indicateur de plus court chemin ; un indicateur de pénibilité ; un indicateur d'ordonnancement ; un indicateur d'optimisation. Le choix des coefficients d'agrégation est laissé à l'utilisateur. Ces coefficients sont choisis en fonction de l'importance qu'il souhaite accorder aux indicateurs développés.

7.3 SYNTHÈSE DU CHAPITRE 7

Conscient des limites d'une modélisation de la remise en service des réseaux techniques uniquement fondée sur des critères spatiaux, les indicateurs développés constituent néanmoins une alternative à des modélisations plus détaillées. En effet, plus ces modélisations sont précises et détaillées, plus celles-ci sont confrontées à des difficultés concernant leur mise en œuvre pratique (notamment liées au manque de données nécessaires pour mettre en œuvre ces modélisations). Or, la modélisation développée requiert uniquement des données concernant la configuration des réseaux, l'emplacement des centres en charge de la remise en service et l'endommagement du réseau. Ces dernières informations sont les plus difficiles à obtenir. Néanmoins, dans le chapitre précédent, une méthode a été définie à cet effet.

Cette recherche accorde donc une importance particulière à l'accessibilité des éléments endommagés vis-à-vis des centres chargés d'en opérer la réparation. En effet, plus un site est difficilement accessible, plus sa remise en service peut être considérée comme problématique, puisque d'autres sites jugés plus accessibles pourront être privilégiés.

C'est alors par l'approche définie dans ce chapitre que les capacités de récupération seront analysées. Cette approche repose sur un indicateur synthétique qui agrège quatre indicateurs normalisés : un indicateur de plus court chemin ; un indicateur de pénibilité ; un indicateur d'ordonnancement ; un indicateur d'optimisation. Le choix des coefficients

d'agrégation est laissé à l'utilisateur. Ces coefficients sont choisis en fonction de l'importance qu'il souhaite accorder aux indicateurs développés.

SYNTHESE DE LA DEUXIEME PARTIE

Cette deuxième partie s'est focalisée sur l'analyse de la résilience des réseaux techniques. Ainsi, la première étape a consisté à déterminer la méthodologie générale d'analyse de la résilience de ces réseaux techniques, en s'appuyant notamment sur les recherches existantes. Cette méthodologie repose sur l'analyse de trois capacités : la capacité de résistance, la capacité d'absorption et la capacité de récupération.

Dans le cadre de ces recherches, l'analyse de la capacité de résistance consiste à identifier les endommagements consécutifs à une inondation et les perturbations induites par ces endommagements. L'analyse de la capacité d'absorption ambitionne d'évaluer la redondance des réseaux techniques. Enfin, l'analyse des capacités de récupération contribue à évaluer la remise en service des réseaux perturbés, en se focalisant sur l'accessibilité des endommagements vis-à-vis des centres en charge de leur remise en service.

La méthodologie d'analyse de la résilience des réseaux techniques a alors fait l'objet de choix méthodologiques. Ces choix méthodologiques ont nécessité de s'intéresser à certaines thématiques de recherche comme l'analyse structurelle des réseaux techniques, la modélisation des interdépendances entre les réseaux techniques et l'analyse de la remise en service des réseaux techniques. Ainsi, des développements ont été réalisés dans des domaines aussi divers que :

- la théorie des graphes, avec le développement de travaux remettant en question la focalisation actuelle sur les indicateurs de centralité pour favoriser davantage l'élaboration d'indicateurs de redondance ;
- la modélisation des interdépendances entre infrastructures critiques, avec l'utilisation de méthodes issues de la Sûreté de Fonctionnement afin d'être le plus exhaustif possible concernant l'identification de ces interdépendances ;
- l'analyse post-catastrophe, avec le développement d'une méthode fondée uniquement sur des critères spatiaux afin d'analyser la remise en service des réseaux techniques.

TROISIEME PARTIE

Analyser la résilience des réseaux techniques : de la théorie à la pratique

La troisième partie de cette thèse vise à passer de la théorie à la pratique. Pour cela, il s'est trouvé nécessaire de développer un système informatique afin d'automatiser la méthodologie (Chapitre 8). Il s'agit d'un Web-SIG qui implémente l'ensemble de la méthodologie. Ce Web-SIG a alors été utilisé pour analyser la résilience des réseaux techniques de la ville de Dublin engagée dans le projet FRC (Chapitre 9).



Figure 5 : Plan de la partie 3.

Chapitre 8

Conception d'un prototype web-SIG pour analyser la résilience des réseaux

La partie précédente a permis de définir une méthodologie d'analyse de la résilience des réseaux techniques. Pour rendre cette méthodologie pleinement opérationnelle, le développement d'un système informatique s'est révélé nécessaire. En effet, l'application de cette méthodologie requiert des capacités de calcul assez importantes. Par conséquent, l'automatisation de celle-ci au sein d'un système informatique est un impératif. Cette partie a donc pour objectif de présenter le développement d'un prototype permettant d'analyser la résilience des réseaux techniques selon la méthodologie développée.

Plus précisément, il s'agit de développer un Système d'Information Géographique (SIG). En effet, l'ensemble de la méthodologie développée requiert de l'analyse spatiale. De plus, pour passer d'une analyse de la résilience des réseaux techniques à une analyse de la résilience urbaine, il a été proposé d'analyser le positionnement des enjeux majeurs en fonction de la résilience des réseaux (Chapitre 3), impliquant une nouvelle fois des méthodes issues de l'analyse spatiale. Or, ces analyses spatiales, qui concernent aussi bien l'analyse des réseaux techniques (analyse structurelle des réseaux, analyse de la répartition des endommagements...) que des aspects plus généraux (synthèse des résultats, étude de la répartition des enjeux majeurs ...), requièrent l'utilisation de SIG.

Malgré les progrès constants et considérables des technologies informatiques, les systèmes d'information ne répondent souvent qu'imparfaitement aux besoins qu'ils sont supposés satisfaire. Concevoir un outil logiciel n'est pas chose aisée. Par le passé, la conception de logiciel a ainsi connu certains errements. Par conséquent, une discipline spécifique a émergé dans le domaine informatique : le génie logiciel. Le génie logiciel a pour objectif d'identifier des processus méthodologiques pertinents pour le développement de systèmes informatisés.

Les méthodes modernes de conception s'accordent alors sur une définition générale des phases du cycle de vie du logiciel :

- L'analyse précise des besoins à satisfaire par le futur système. Il s'agit d'appréhender le domaine du problème posé et de spécifier le comportement d'un système qui peut résoudre ce problème. Cette phase implique notamment une modélisation adéquate : la modélisation conceptuelle.

- La conception d'une solution au problème posé, ainsi que de la structure générale d'un système qui va le résoudre.
- L'implémentation de la conception à l'aide des technologies choisies.
- Le test et la validation de l'implémentation, ainsi que la mise en opération du système.
- L'adaptation ou la maintenance du système aux changements des besoins.

Dans cette partie, il est question de se focaliser sur les principaux développements relatifs aux deux premières phases de ce cycle de vie. En effet, ce sont ces développements qui ont permis de concevoir le système. De plus, cette focalisation permet d'appréhender les fonctionnalités et les potentialités du système développé. Dans un premier temps, dans le contexte de cette recherche, il s'est révélé pertinent de développer un web-SIG plutôt qu'un SIG bureautique classique. Une analyse des besoins et une analyse fonctionnelle ont alors été réalisées, dans le but de spécifier plus précisément les fonctions de ce Web-SIG. Puis, dans un deuxième temps, à partir de cette spécification fonctionnelle, des modélisations conceptuelles du système ont pu être réalisées. Enfin, la conception de l'outil a nécessité de retenir des solutions techniques définissant l'architecture finale du système.

8.1 LA SPECIFICATION FONCTIONNELLE DU SYSTEME

A la base de tout développement logiciel, il y a désormais une analyse des besoins. Ainsi, le génie logiciel insiste particulièrement sur cette phase qui explique en grande partie le succès (ou non) des systèmes informatiques qui seront développés par la suite. L'expression des besoins et sa formalisation requièrent donc une attention particulière. Dans une recherche se voulant opérationnelle, cette phase semble par conséquent nécessaire. Néanmoins, cette recherche ne peut être fondée à partir des approches les plus couramment utilisées dans ce domaine, puisque la nouveauté des sujets abordés pose des problèmes pour analyser ces besoins. Quoi qu'il en soit, cette phase reste nécessaire afin de spécifier les fonctions du système.

8.1.1 Un Web-SIG pour rendre opérationnelle la méthodologie d'analyse de la résilience des réseaux techniques

Pour rendre opérationnelle la méthodologie d'analyse de la résilience des réseaux techniques, il a été choisi de développer un outil Web-SIG et non un SIG bureautique classique. En effet, la volonté est ici de créer un outil offrant des standards interopérables et ne limitant pas les développements informatiques à un outil SIG bureautique particulier, puisque les collectivités utilisent des SIG différents. Ce choix permet alors aux différentes collectivités d'utiliser cet outil sans avoir à télécharger un système

supplémentaire, d'exploiter les résultats de l'outil avec leur propre SIG, puis éventuellement de les partager avec d'autres collectivités ou d'autres acteurs.

Afin de justifier ce choix, il est nécessaire de bien définir ce qui est considéré ici comme un web SIG. Pour cela, il est intéressant d'interroger le lien ambigu et paradoxal existant entre les technologies web, la géographie et la géomatique. Le développement des Web-SIG est alors fortement lié au développement de standards permettant d'assurer leur interopérabilité vis-à-vis de nombreux autres systèmes.

➤ *Le paradoxe du web et de la géographie*

Le web a popularisé internet et tend à modifier certaines pratiques sociales, professionnelles et institutionnelles. En effet, ce système hypertexte a mis à la portée du plus grand nombre un des plus grands réseaux de télécommunication du monde. En France, comme dans de nombreux pays, ce réseau informatique mondial est ainsi devenu très accessible. Technologiquement, le web y est pour beaucoup, puisque des outils simples d'utilisation y ont été développés, afin de créer ou de diffuser des contenus contribuant à enrichir celui-ci (Fig. 8.1). Outil de télécommunication, internet à 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.

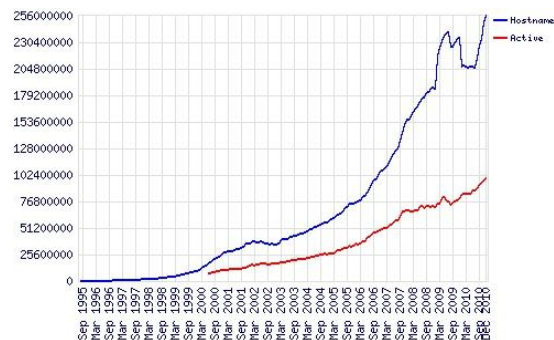


Figure 8.1 : Evolution du nombre de sites web (www.news.netcraft.com).

Ainsi, « l'avènement progressif des réseaux informatiques offre de nouvelles potentialités technologiques à de nombreux domaines scientifiques, tel 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 perfectionnement des réseaux en termes de largeur de bande passante et de débit a permis d'entrevoir une nouvelle façon d'appréhender et de manipuler l'information géographique. En outre, ce perfectionnement a permis de manipuler, de partager et de diffuser de l'information géographique par internet. Cependant, cela ne garantissait pas le développement de l'utilisation de l'information géographique sur le web, car pour certains internet tend à

abolir l'espace géographique (Graham, 2001), rendant *in fine* inutile l'information géographique.

Si la capacité des citoyens à participer efficacement à des débats publics dépend d'une variété de conditions, dont l'accès à l'information en est une primordiale, alors les technologies web sont des outils qui contribuent à améliorer le processus de participation du public, puisqu'ils permettent des gains de temps concernant l'accès à l'information et l'identification des acteurs clés possédant ces informations (Parry et al, 1992). Ces possibilités ont alors fait émerger des fantasmes concernant l'émergence d'une « cyberdémocratie » (Carver et al., 2001). En effet, en comparaison à des méthodes plus traditionnelles, ces nouvelles formes de participation semblent pouvoir abolir certaines barrières géographiques. Conjuguées avec le développement de réseaux de transports toujours plus rapides et plus performants, certains auteurs ont annoncé l'abolition des distances (Cairncross, 1998) et plus généralement l'abolition de l'espace géographique (Graham, 2001). C'est-à-dire l'émergence d'un monde « aspatial ». L'utopie d'une distance réduite à zéro semblait atteinte. « L'effet de distance » deviendrait définitivement une illusion comme de nombreux sociologues s'étaient déjà attachés à le démontrer depuis les années 1940 (Grasland & Potrykowska, 2002).

Contrairement à ce qui a pu être annoncé, ces technologies, qui aboutiraient à un monde « aspatial » abolissant les distances (Cairncross, 1998) et plus généralement l'espace géographique (Graham, 2001), ont contribué à développer des applications cartographiques. D'ailleurs, certaines de ces applications cartographiques ont pour objectif la participation du public face à des problèmes environnementaux à différentes échelles spatiales et en particulier aux échelles locales (Carver et al., 2001). Dans ce cas précis, l'abolition des barrières géographiques permettant une plus grande participation du public est permise par une application géographique.

Paradoxalement, la conclusion de cette réflexion peut être la suivante: « *We argue that location and space are becoming increasingly important in the information technology revolution* » (Hudson-Smith et al., 2009). L'abolition possible de barrières géographiques par le biais du web ne se ferait donc pas au détriment de l'espace géographique, elle contribuerait à le transformer. D'ailleurs, ce réseau repose sur une infrastructure matérielle qui ne peut être totalement indépendante des distances, il est alors possible, lorsqu'on se focalise sur ses dysfonctionnements, d'assister à une « revanche de la distance » (Gorman et al., 2004).

➤ *Les liens entre géomatique et néogéographie*

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). Les plus célèbres sont : Google Map, Yahoo Map, Virtual Earth, NASA World Wind... Ces applications très interactives et intuitives peuvent être classées comme faisant partie de l'esprit web 2.0 (Hudson-Smith et al., 2009 ; Graham, 2005). En

effet, la diversité des contenus, des services et le développement des réseaux sociaux en font un véritable « Social Media » permettant de partager des informations de nature variée, inscrite au sein d'un univers virtuel mais en prise avec le monde réel.

Ce type bien particulier d'applications cartographiques fait partie de ce qu'il est courant d'appeler la néogéographie (Eisnor, 2006). Compte tenu du manque de rigueur et de scientificité de certaines applications (manque de précisions des données, superposition de couches sans apport d'information...), qui pour certaines sont proches de l'amateurisme et sont caractérisées principalement par un manque de maîtrise concernant les systèmes de projection et la sémiologie graphique, il est assez facile de critiquer l'apport de ces nouvelles technologies. Cependant, des acteurs institutionnels, comme l'IGN par le biais du géoportail, mettent à disposition des API, ce qui tend à donner du crédit à celles-ci et surtout à les « institutionnaliser » au sein de la géomatique.

Néanmoins, les relations entre géomaticiens et néogéographes restent complexes. En témoigne la déclaration de Mike Hickey, le patron de Pitney Bowes (MapInfo) en décembre 2007 pour qui *“l'explosion de la néogéographie suscite de l'intérêt et pousse à la convergence des données collaboratives, mais ce n'est pas du SIG”*. Si cette dernière remarque a provoqué de vives réactions chez les utilisateurs et les développeurs des applications web, et plus généralement encore sur la « blogosphère », c'est que celle-ci ignore en réalité les liens entre la néogéographie et la géomatique. Si elle souligne le fossé important qui existe entre un SIG bureautique et un SIG en ligne enrichi de services d'information géographique, elle néglige qu'à l'instar de la géomatique, la néogéographie se situe à mi-chemin entre deux disciplines scientifiques reconnues : la géographie et l'informatique (Joliveau, 2009).

Le terme de néogéomatique serait sans doute plus approprié que celui de néogéographie. D'ailleurs certains néogéographes positionnent la néogéographie comme dépassant la géomatique (Turner, 2006). En effet, *« la néogéographie est le produit d'un peuple de geeks, passionnés d'Internet et de nouvelles technologies et persuadés que les outils cartographiques qu'ils utilisent ou développent sur leurs ordinateurs vont renverser des pratiques archaïques et des idées obsolètes »* (Joliveau, 2009). En fait, la néogéographie a ouvert la géomatique à une géographie dont les finalités sont non conceptuelles et non théoriques, ainsi qu'à une informatique non méthodologique et non professionnelle (Fig. 8.2).

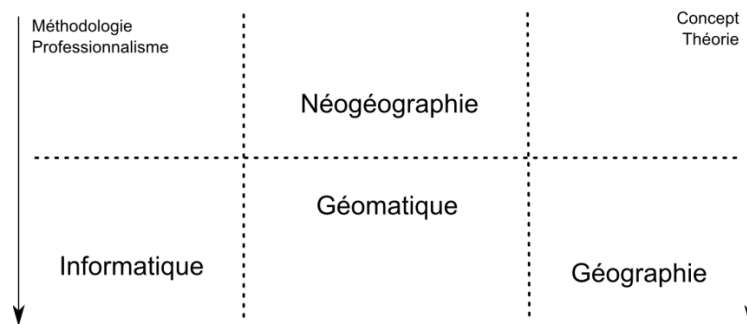


Figure 8.2 : Néogéographie et géomatique.

➤ *SIG, web SIG, webmapping: quelques précisions sémantiques et technologiques*

Loin de ces débats d'ordre disciplinaire, il est important d'étudier les potentialités de ces technologies web en rapport avec les technologies existantes, en se basant sur la terminologie la plus fine possible, afin de débattre des apports de ces technologies sur la base de critères plus objectifs.

Il est possible de définir la cartographie en ligne ou « Webmapping » comme un « processus de distribution de données géoréférencées via un réseau tel qu'Internet ou un intranet et de leur visualisation sur des applications cartographiques via une interface web » (Mitchell, 2005). D'autres chercheurs préfèrent le terme de « Internet GIS » (Peng et Tsou, 2003). En fait, pour être le plus clair et le plus précis possible, ces deux approches seront ici clairement distinguées et une troisième approche sera introduite, car derrière l'utilisation d'un vocable générique se cachent des outils aux réalités très différentes. Pour cela, il faut s'appuyer sur l'étude des fonctionnalités offertes par l'interface client et sur l'infrastructure de l'outil. Pour étudier les fonctionnalités de ces outils, cette recherche s'appuie en particulier sur les fonctionnalités SIG définies par Denègre et Salgé (2004).

Ainsi, le « **webmapping** » correspond ici à des applications cartographiques dont l'affichage (la visualisation, la diffusion) de plusieurs couches de données géographiques sur le web est la principale motivation. 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 (SGBD/serveur cartographique). L'analyse spatiale est souvent absente. Le webmapping peut être clairement classé comme faisant partie de la néogéographie, une géographie généralement non scientifique, mais intuitive, personnelle ou encore artistique. Néanmoins, il ne faudrait pas en limiter les potentialités scientifiques. Le webmapping peut être un outil utile à des fins scientifiques pour rendre visible des phénomènes géographiques ou spatialiser de l'information scientifique. Il présente aussi des potentialités de valorisation des connaissances scientifiques. Un scientifique habitué aux outils informatiques sera sans doute plus enclin à utiliser ce type d'outils, avec lequel il peut disposer de fonds cartographiques qui lui sont précieux, plutôt qu'à se former à un outil de type SIG (qui requiert des connaissances sur les systèmes de coordonnées, les bases de données géographiques...).

La deuxième approche correspond à une application dont une nouvelle fois l'affichage (la visualisation, la diffusion) de données géographiques sur le web 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 associé 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** ». Le terme internet est utilisé, car ce qui intéresse le développeur ici, c'est la mise en réseau (permise par internet) du support cartographique pour assurer sa diffusion et non l'utilisation des technologies web.

Ces deux premières approches se distinguent d'autres applications web, en offrant des possibilités d'analyse et d'archivage de données appartenant à l'utilisateur et ce directement depuis l'interface client. On parlera de web-SIG « **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 bureautiques existants, en exploitant tant que possible les capacités de programmation offertes par le web (html/php/javascript...) (Tab. 8.1).

	SIG bureautique	Webmapping	Web SIG	Internet SIG
Acquisition	X	-	X	-
Archivage	X	-	X	-
Analyse	X	-	X	-
Affichage	X	X	X	X

Tableau 8.1 : Etude de différentes applications à l'aide d'une grille fonctionnelle.

L'utilisation du terme web est justifiée, car le développeur s'intéresse aux capacités de programmation de l'outil web. Les web SIG se situent généralement dans la continuité d'un SIG bureautique existant. Cette structure reprendra alors les serveurs de données et les serveurs cartographiques existants pour leur adjoindre un serveur web (Fig. 8.3).

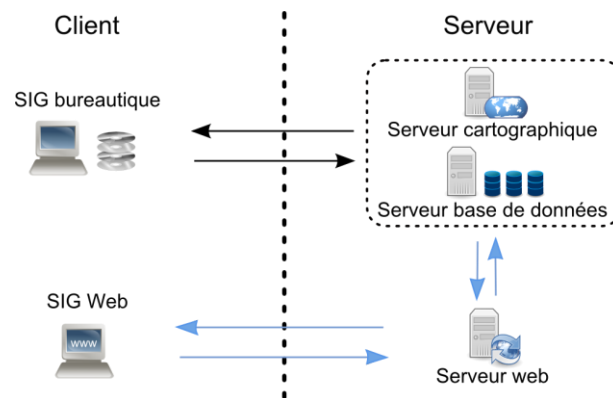


Figure 8.3 : Architecture client-serveur dans le cadre du développement d'un Web SIG.

➤ *L'interopérabilité : le défi des web SIG*

« L'internet apparait comme un moyen de diffusion et de partage à l'échelle planétaire puisque quiconque le désire à l'heure actuelle peut se connecter à ce réseau mondial et communiquer avec d'autres utilisateurs géographiquement distants. La diffusion de l'information géographique ne représente pas une exception en soi, elle peut a priori être échangée à travers le réseau Internet. Cependant, l'aspect composite de l'information géographique, caractérisée par ses propriétés attributaires et spatiales, est un défi technologique majeur pour l'utilisation des SIG en ligne » (Thierion, 2010). Afin d'exploiter pleinement les potentialités des SIG en ligne, le problème de l'interopérabilité se pose. En effet, les applications web permettent de collecter des données provenant de plusieurs sources hétérogènes afin de constituer le

capital de connaissances sur lequel fonder son fonctionnement. Cette hétérogénéité peut engendrer des problèmes critiques de compatibilité.

Ainsi, la directive européenne INSPIRE (*Infrastructure for Spatial Information in Europe*) vise à créer une infrastructure de données spatiales pour mieux formuler, mettre en œuvre et assurer le suivi des politiques communautaires environnementales. Cette infrastructure a pour objectif de permettre la découverte de données spatiales et la construction de chaînes de services d'information géographique par des utilisateurs finaux. Pour cela, INSPIRE se doit de résoudre des problèmes d'interopérabilité donc de normalisation. Une SDI (*Spatial Data Infrastructure*) s'appuie alors sur des standards. Ces infrastructures de données spatiales ont pu être présentées comme la principale innovation dans le monde de l'information géographique (Bregt et Crompvoets, 2005). En effet, INSPIRE n'est pas une exception. Les SDI se développent un peu partout et à différentes échelles.

Comment expliquer le développement de ces SDI ? Et, que peut-on en attendre ? Le développement d'une technologie est généralement complexe parce qu'il résulte d'une combinaison de différents facteurs. Néanmoins, quatre facteurs peuvent être avancés afin d'expliquer ce développement : l'augmentation de la production de données numériques géoréférencées ; un fort besoin de données géoréférencées et de partage de celles-ci ; des développements technologiques, notamment l'émergence des web services ; une volonté politique forte (Bregt et Crompvoets, 2005). Cette dernière peut être corrélée à l'attente des retombées économiques liées au développement des SDI (De Man, 2008) (Rajabifard et al., 2002).

Cependant, l'intérêt pour ces infrastructures est également lié à un effet de mode plutôt qu'à un véritable succès lié aux apports réels de celles-ci (Bregt et Crompvoets, 2005). Ainsi, les potentialités prêtées aux SDI contribuent davantage à leur développement que le réel succès économique pour l'heure encore insuffisant. Par ailleurs, le développement des SDI ne peut pas être séparé de nouvelles pratiques sociales. En effet, une SDI regroupe des éléments techniques et sociaux. Les SDI sont par conséquent une construction sociotechnique (De man, 2008). Technique, car ces SDI reposent sur la mise en place d'infrastructures, d'outils et de normes. Sociale, parce qu'elles soulignent une nouvelle façon d'appréhender les informations géographiques et parce que la réussite de ces infrastructures dépend de l'implication des acteurs concernés.

De telles infrastructures reposent nécessairement sur des standards. Ainsi, l'effort de normalisation de l'OGC (Open Geospatial Consortium) illustre la détermination pour résoudre les problèmes associés à l'intégration d'applications SIG en ligne (Tsou & Buttenfield, 2002). La création de l'OGC est concomitante à l'émergence des SDI et leur développement est difficile à séparer. L'objectif principal de ce consortium (à but non lucratif) est d'établir un ensemble de normes dans le but de faciliter l'échange de données géographiques et plus largement de services dédiés à leur manipulation. Les normes définies correspondent à des documents techniques que les développeurs peuvent utiliser pour produire des interfaces ouvertes ou les implémenter dans leurs produits.

Cela favorise l'accessibilité des contenus et des services. Idéalement, lorsque ces normes sont implémentées au sein de deux applications indépendantes, les résultats peuvent être mis en commun sans qu'il n'y ait de problèmes d'incompatibilité.

Les standards WMS et WFS figurent parmi ceux élaborés par l'OGC. Le principal intérêt du WMS est de pouvoir afficher sur un outil SIG (libre ou propriétaire), une ou plusieurs couches thématiques correspondant à une portion d'image raster. Il permet de travailler au niveau des objets et de produire des cartes de données géoréférencées, à partir de différents serveurs de données, en masquant totalement le processus de constitution de la carte. Le service WFS permet, quant à lui, d'interroger des serveurs cartographiques afin de manipuler des objets géographiques (lignes, points polygones...). Il existe désormais de nombreux exemples de services de l'Etat ou de collectivités qui ont recours à ces normes (WMS ou WFS) pour leur service web (SIGORE, SANDRE, Cartorisque...).

➤ *Le choix d'un Web-SIG*

Le choix d'un Web-SIG, plutôt que d'un SIG bureautique classique, pour analyser la résilience urbaine s'explique par le cadre général dans lequel s'inscrivent ces recherches. En effet, ces recherches sont notamment le fruit de réflexions menées dans le cadre du projet FloodResilienCity. Ce projet européen (Interreg) regroupe huit villes du Nord-Ouest de l'Europe. Une solution web est alors apparue intéressante, car cette solution permettait d'envisager la mise en place d'une plateforme commune. Ainsi, pour ce type de projets, qui met notamment en avant une collaboration transnationale, la mutualisation possible des données permise par une application web semblait pertinente. En outre, comme tous les acteurs de ce projet ne disposaient pas tous des mêmes outils, une application indépendante des SIG propriétaires existants semblait être la meilleure option.

Il est alors intéressant de résumer les choix menant à concevoir un outil Web-SIG pour analyser la résilience des réseaux techniques. L'émergence du concept de résilience en gestion des risques – concept désormais « à la mode » car la gestion traditionnelle des risques semble montrer ses limites – constitue le point de départ de cette recherche. La recherche thématique s'évertue alors à définir le plus finement possible ce concept pour le rattacher aux concepts préexistants. Néanmoins, pour rendre ce concept pleinement opérationnel, il est nécessaire de disposer d'outils permettant de l'analyser. Parallèlement, le développement des outils web, qui offrent la possibilité de développer des Web-SIG, s'appuie sur l'émergence de nouvelles pratiques relationnelles dans le domaine de la recherche et de sa valorisation : collaboration transnationale, informations des citoyens font désormais partie du langage institutionnel et font échos aux projets collaboratifs et aux sites d'informations citoyens (notamment les blogs) résultants des nouvelles pratiques sociales issues du web.

C'est alors le croisement entre d'une part la recherche thématique et épistémologique concernant la résilience et d'autre part des évolutions sociotechniques qui justifient le

recours à un Web-SIG plutôt qu'à un SIG bureautique classique. Ainsi, le choix de concevoir un Web-SIG pour analyser la résilience des réseaux techniques ne peut être séparé de processus sociaux, technologiques et scientifiques.

8.1.2 Formulation explicite des besoins

Cette recherche a donc pour objectif de concevoir un Web-SIG destiné aux collectivités pour leur permettre d'analyser la résilience de leurs réseaux techniques. Les développements entrepris répondent donc à un « besoin principal » clairement identifié. Néanmoins, à l'heure actuelle, il n'est pas possible de recenser plus précisément auprès des collectivités les besoins qui en découlent, puisque le concept de résilience et les méthodologies pouvant lui être associées échappent pour partie à ces mêmes collectivités. Il s'agit donc dans cette partie d'explicitier plus précisément ces besoins en s'appuyant, non pas sur un recensement de ceux-ci auprès des collectivités (c'est-à-dire sur une analyse classique des besoins « exprimés »), mais plutôt sur une analyse *a priori* des fonctions principales semblant nécessaires au bon fonctionnement de l'outil développé. Ces fonctions se doivent alors de prendre en considération les contraintes de ces collectivités. Cette analyse correspond, en quelque sorte, à une analyse des besoins « exigés ».

En l'occurrence, trois fonctions principales (associées ici indirectement à des besoins) ont été définies : intégrer des données accessibles aux collectivités ; incorporer une méthodologie d'analyse de la résilience des réseaux techniques ; communiquer les résultats.

➤ *Intégrer des données accessibles aux collectivités*

Ce besoin repose sur le postulat assez intuitif que les collectivités ne seront pas intéressées par un système dont le fonctionnement requiert des données qui leur sont difficilement accessibles. L'objectif de ce système est donc de ne pas entraîner les collectivités dans une démarche longue et fastidieuse.

En pratique, la disponibilité des données constitue le principal point d'achoppement de cette recherche. En effet, si cette recherche se veut opérationnelle, elle s'appuie sur une approche théorique qui peut alors rentrer en contradiction avec les réalités du terrain. Ainsi, dans la plupart des cas, les collectivités ne disposent pas de données précises et exhaustives concernant les réseaux techniques qui desservent leur territoire. Or, ces données sont indispensables au fonctionnement de cet outil. C'est pourquoi, il est pertinent d'opter pour une analyse structurelle de ces réseaux techniques, qui constitue, en quelque sorte, une analyse minimaliste par rapport aux approches rhéologiques.

Quoi qu'il en soit, ce besoin définit une fonction principale somme toute courante des systèmes informatiques. Ainsi, la génération, l'utilisation, la manipulation, la transformation et le stockage des données font partie intégrante de tous les développements logiciels. Dans ce contexte, les systèmes informatiques se doivent d'être

souples et d'offrir une certaine flexibilité d'utilisation, en permettant notamment l'utilisation de nombreux formats de données. Par exemple, dans le domaine des sciences géographiques, les formats propriétaires sont nombreux et la question de l'interopérabilité est centrale. C'est pourquoi, le système développé doit être en mesure d'intégrer de nombreux formats de données géographiques.

En ce qui concerne les données produites par le système, les questionnements soulevés rejoignent ceux concernant la communication des résultats. En effet, les résultats doivent pouvoir être exploités par le biais des SIG utilisés par les collectivités. Deux solutions sont alors possibles : proposer une multitude de formats ou opter pour un format offrant une bonne interopérabilité. Entre les phases d'intégration des données et de communication des résultats, il est nécessaire de stocker ces données. Pour cela, le recours à une base de données géographiques est logique.

Enfin, ces données géographiques sont caractérisées par leur localisation dans l'espace à un moment donné. Or, une localisation doit toujours être associée à un système de coordonnées géoréférencées. Ainsi, le référentiel géographique est une des informations de base des données géographiques. L'intégration de données géographiques dans un SIG nécessite donc la prise en compte d'un certain nombre de systèmes de coordonnées géoréférencées. Ce système doit aussi être en mesure de les transformer. Pour cela, il est possible d'implémenter des listes déjà existantes, comme celle de l'ESPG (European Petroleum Survey Group).

➤ *Incorporer une méthodologie d'analyse de la résilience des réseaux techniques*

Cette fonction découle directement de la nécessité pour les collectivités d'analyser la résilience de leurs réseaux techniques pour appréhender la résilience de leur territoire. Si la méthodologie a été développée, son implémentation au sein d'un prototype SIG nécessite néanmoins une réflexion profonde. En effet, plusieurs options sont possibles pour implémenter cet outil : opter pour un système de type « boîte noire » ou un système de type « boîte blanche ».

Un système de type boîte noire peut être considéré comme un système fermé où l'utilisateur ne sait pas comment le système fonctionne. Cet utilisateur n'a alors accès qu'aux résultats finaux. Ainsi, l'utilisateur ne peut comprendre la méthodologie mise en place, ni même être sensibilisé à celle-ci. L'utilisateur se doit uniquement de fournir au système les données nécessaires à son fonctionnement. L'utilisateur récupère finalement des résultats qu'il doit être en mesure d'interpréter et éventuellement de réutiliser.

Les systèmes de type « boîte blanche » sont des systèmes ouverts, en ce sens où le mécanisme interne du système est entièrement accessible. En termes d'outils informatiques, les outils libres sont un bon exemple de ces systèmes de type boîte blanche. En effet, le code de l'outil est entièrement lisible et peut même être modifié par l'utilisateur.

Entre les systèmes de type boîte blanche et les systèmes de type boîte noire, il existe des systèmes de type « boîte grise ». Sans être entièrement libres, ces systèmes dévoilent en partie leur mécanisme. Compte tenu de la méthodologie développée, le simple affichage de cartes synthétiques n'a aucun intérêt. C'est pourquoi, un fonctionnement de type boîte noire n'est pas envisageable. Le choix inverse semble plus approprié, puisque le système le plus ouvert possible est souhaitable, afin d'une part de sensibiliser l'utilisateur à la méthodologie (et le faire ainsi entrer dans une démarche réflexive) et d'autre part de tirer profit de sa connaissance du fonctionnement de son territoire pour choisir les seuils et les données appropriés. Néanmoins, sans dévoiler toutes les facettes des différents algorithmes, mais en cherchant plutôt à sensibiliser les utilisateurs à la méthodologie, un système de type « boîte grise » semble être la meilleure solution.

➤ *Communiquer les résultats*

Cette dernière fonction correspond à l'aboutissement de la recherche entreprise. Les résultats qui s'expriment sous forme de cartes, voire de graphiques, doivent ainsi faire l'objet d'une attention particulière.

Comme les principaux résultats sont produits sous forme de cartes, les principaux questionnements concernent ici la sémiologie graphique. Deux possibilités peuvent alors être envisagées : d'une part privilégier une réflexion *a minima* sur ces questions en laissant les choix sémiologiques à l'utilisateur, ou d'autre part privilégier une réflexion plus importante sur ces questions en choisissant les différentes sémiologies pour l'utilisateur. C'est précisément la deuxième option qui a été privilégiée, puisque si l'utilisateur n'est pas en mesure de comprendre toute la méthodologie, il doit être en mesure d'en interpréter les résultats. La sémiologie se voudra alors être la plus compréhensible possible. Quoi qu'il en soit, toutes les cartes se devront d'être accompagnées de la légende correspondante.

De plus, il est important de pouvoir communiquer les résultats en dehors du système développé. Pour cela, il est nécessaire de pouvoir sauvegarder les cartes produites sous un format numérique compatible avec de nombreux systèmes d'exploitation et de pouvoir imprimer ces cartes simplement. L'édition des cartes sous format PDF semble ainsi nécessaire, tout comme la mise en place d'un système d'aide à l'impression des cartes. Enfin, les données géographiques doivent pouvoir être récupérées dans un format (ou plusieurs formats) exploité par une majorité des SIG.

8.1.3 Analyse fonctionnelle du Web-SIG

Les parties précédentes ont permis de dégager les besoins concernant le système à développer : le besoin principal étant *in fine* de développer un Web-SIG permettant à des collectivités d'analyser la résilience de leurs réseaux techniques. Il est désormais nécessaire de formaliser ces besoins sous forme de fonctions plus précises.

Les besoins identifiés peuvent être formulés sous la forme de « prestations attendues ». Ces prestations correspondent à des fonctions de service que l'outil se doit d'implémenter. Différents diagrammes FAST (Function Analysis System Technique) ont alors été réalisés afin d'élaborer les fonctions techniques permettant de répondre aux fonctions de service. Imaginée par l'américain Charles W. Bithenay, la méthode F.A.S.T est utilisée lors de la conception d'un produit.

Plus exactement, ce diagramme permet une traduction rigoureuse de chaque fonction de service en différentes fonctions techniques. Ainsi, un diagramme FAST permet de rechercher un maximum de solutions technologiques devant satisfaire les fonctions du système étudié. Il se construit de gauche à droite, dans une logique du « pourquoi au comment » et consiste à se poser précisément trois questions pour chaque fonction du produit :

- Pourquoi une fonction doit-elle être assurée ? Il est possible de répondre à cette question en lisant le diagramme de droite à gauche.
- Comment cette fonction doit-elle être assurée ? Il est possible de répondre à cette question en lisant le diagramme de gauche à droite.
- Quand cette fonction doit-elle être assurée ? Cette temporalité doit alors être représentée verticalement.

Cette technique consiste donc à représenter le cours de la décomposition logique d'un problème en sous-questions et à les articuler suivant une hiérarchie temporelle. Elle s'opère par itérations successives et s'il n'est pas possible de subdiviser un élément en composants de rang supérieur, alors c'est qu'il s'agit d'une tâche élémentaire « autosuffisante » (Gobin, 2003). Pour résumer, cette technique permet :

- d'ordonner les fonctions identifiées ;
- de vérifier la logique fonctionnelle ;
- d'avoir une bonne connaissance du produit ou du système étudié ;
- de prendre conscience de l'importance relative des éléments vis-à-vis des fonctions qu'ils assurent ;
- de mettre en évidence des synchronisations entre les fonctions indépendantes (Zwingelstein, 2009).

Trois diagrammes FAST ont donc été réalisés pour chacune des trois fonctions principales : utiliser les données des collectivités (Fig. 8.4) ; incorporer la méthodologie d'analyse de la résilience (Annexe 3) ; communiquer les résultats (Annexe 3).

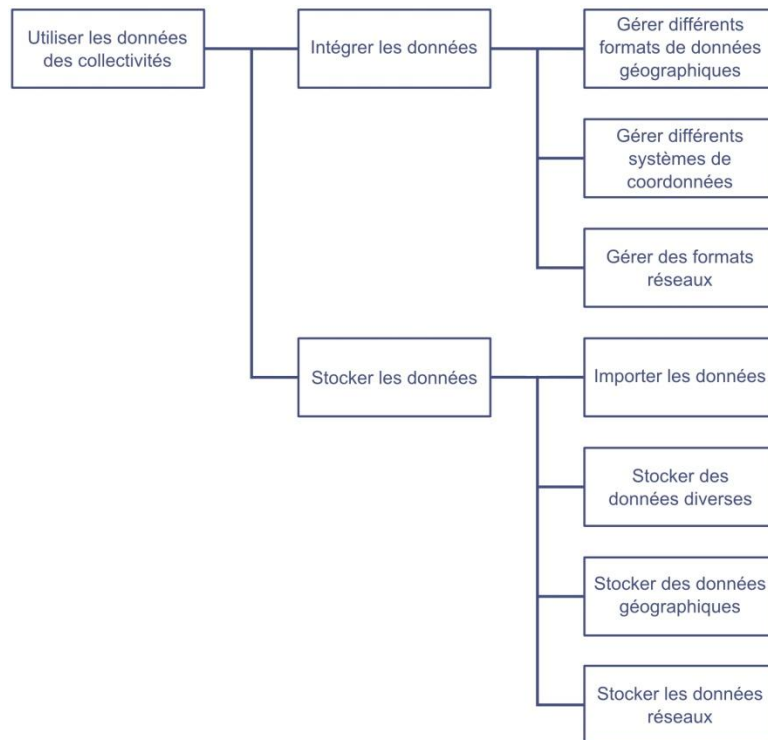


Figure 8.4 : Diagramme FAST pour la fonction principale « utiliser les données des collectivités »

Il a été décidé, dans le cadre de cette recherche, de développer un Web-SIG plutôt qu'un SIG bureautique classique. Cette partie a alors permis de déterminer l'ensemble des fonctions de service et des fonctions techniques de ce Web-SIG. Ces fonctions ont été organisées pour remplir trois fonctions principales : utiliser les données des collectivités ; incorporer une méthodologie d'analyse de la résilience des réseaux techniques ; communiquer les résultats. Cette analyse fonctionnelle est fondée sur une analyse des besoins un peu particulière, puisque compte tenu de la recherche engagée, il n'est pas possible d'avoir recours à une analyse des besoins exprimés.

8.2 MODELISATION CONCEPTUELLE DE L'OUTIL

Après avoir défini les spécifications du web-SIG, il devient possible de modéliser conceptuellement celui-ci. « L'idée qui sous-tend la modélisation conceptuelle est très simple : il s'agit de développer un modèle d'un domaine d'application particulier en termes de concepts familiers aux acteurs de ce domaine et non en termes technique tels que "fichiers", "stratégies d'accès", "programmation", ou "architecture client-serveur". Ces considérations technologiques ne deviennent pertinentes que plus tard, dans la phase d'implémentation, postérieure à celle de la modélisation conceptuelle » (Kolp et al., 1997). Il s'agit d'une étape intermédiaire entre

l'exploitation des analyses fonctionnelles effectuées auparavant et l'implémentation de l'outil. Cette étape permet alors d'entrevoir les solutions adoptées pour faire face aux problématiques posées dans les analyses fonctionnelles, sans pour autant détailler l'implémentation de ces solutions.

L'objectif dans cette partie est donc d'élaborer des modèles qui décrivent de manière abstraite l'outil au travers de schémas conceptuels qui représentent graphiquement les entités, leurs propriétés et les relations qu'elles entretiennent. Très exactement, deux modèles conceptuels vont être présentés : le modèle conceptuel de données et le modèle conceptuel de traitement.

8.2.1 Le modèle conceptuel de données

Le modèle conceptuel de données a pour but de représenter d'une manière structurée les données qui seront exploitées par le système d'information. Plus précisément, le modèle conceptuel de données décrit la sémantique, c'est à dire le sens attaché à ces données et non l'utilisation qui peut en être faite. C'est pourquoi, il est possible de saisir ces modèles sans être initié aux bases de données. Pour établir un modèle conceptuel de données, il est nécessaire au préalable de recenser et de nommer l'ensemble des données du domaine étudié : c'est-à-dire de recenser les entités. Puis dans un deuxième temps, il est nécessaire d'analyser les relations existantes entre ces données pour aboutir au modèle conceptuel de données (c'est-à-dire d'identifier les dépendances fonctionnelles).

Une entité représente un ensemble d'objets du système d'informations ayant les mêmes caractéristiques. Une entité est alors caractérisée par des informations appelées propriétés (ou attributs) et partagées par chacun des objets. Les propriétés concernant ces entités sont collectées lors de l'établissement d'un dictionnaire de données. Une propriété particulière, appelée identifiant, permet alors de distinguer sans ambiguïté toutes les occurrences de l'entité. Dans cette recherche, les entités sont les suivantes :

- l'entité territoire
- l'entité réseau (technique)
- l'entité arc
- l'entité nœud
- l'entité centre
- l'entité infrastructure critique (autre que les réseaux)
- l'entité aléa

Chaque entité est donc caractérisée par ses propriétés. Par exemple, un territoire est caractérisé par un identifiant, un nom, une géométrie de type surfacique et un système de coordonnées... L'ensemble de ces propriétés a été déterminé pour chaque entité.

Une relation (ou une association) est un lien existant entre deux entités. Chaque relation possède un nom (souvent un verbe) qui caractérise le type de relation existant entre les entités. De plus, pour chaque relation, il est nécessaire d'établir les cardinalités, c'est-à-dire le nombre de participation d'une entité à une relation. A partir de ces différents travaux, il a été possible de produire un modèle « entité-association » permettant de résumer graphiquement l'ensemble des informations obtenues (Fig. 8.5).

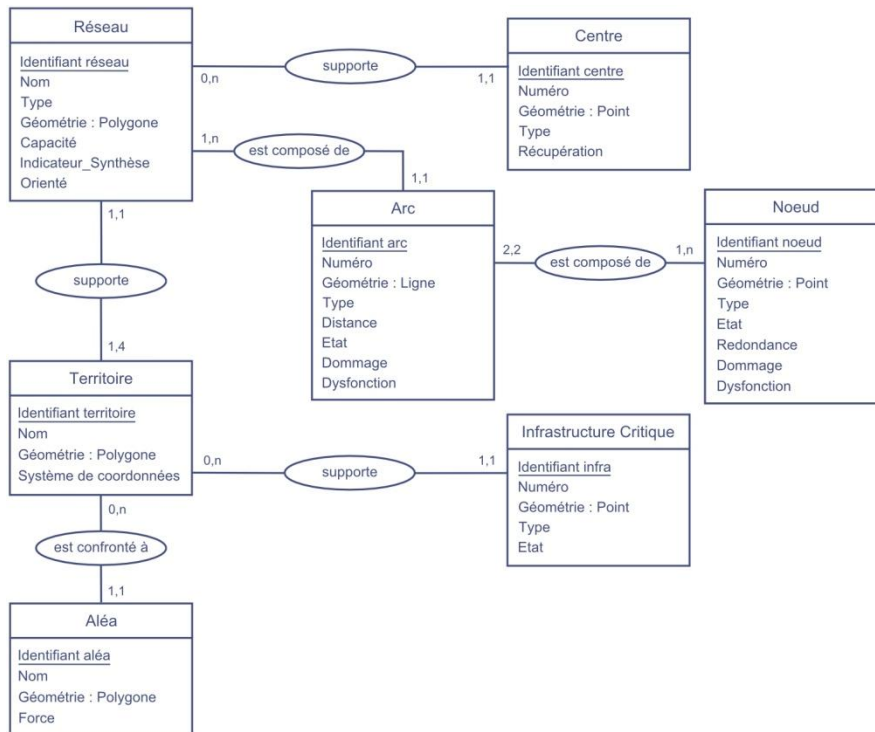


Figure 8.5 : Le modèle « entité-association » du système développé.

8.2.2 Le modèle conceptuel de traitements

La modélisation des traitements a pour finalité de représenter la dynamique du système d'information, c'est-à-dire de représenter l'enchaînement des traitements réalisés par ce système. Ces traitements sont alors déclenchés par des événements. L'événement est ainsi une sollicitation du système d'information qui génère une réaction de la part de celui-ci. Pour un outil informatique, ces événements sont bien souvent le résultat de l'interaction entre l'utilisateur et l'interface qui lui est proposée. En effet, à partir de l'interface, l'utilisateur peut lancer des requêtes ou des commandes.

Ces traitements sont composés d'opérations. Une opération est un ensemble d'actions accomplies par le système d'information en réaction à un événement ou à une conjonction d'événements. Ces actions ne peuvent être interrompues par un événement externe. Une opération constitue donc un ensemble d'actions non directement visibles par l'utilisateur (la partie boîte noire du système). Ces actions aboutissent systématiquement à un résultat que l'utilisateur peut interpréter comme la fin de la

procédure. Par exemple, en cas d'échec d'une opération, un message d'erreur(s) doit s'afficher pour permettre à l'utilisateur de comprendre les raisons de l'échec afin que celui-ci puisse le résoudre.

Le modèle conceptuel de traitements prend alors en considération les événements et décrit les opérations que ces événements déclenchent puis les résultats obtenus. Ce modèle décrit aussi dans quel ordre s'enchaînent les traitements.

Dans cette recherche, chaque capacité a fait l'objet d'un modèle conceptuel de traitements. Ces modèles sont simplement exprimés ici sous la forme de diagrammes de cas d'utilisation (Fig. 8.6) (Annexe 3).

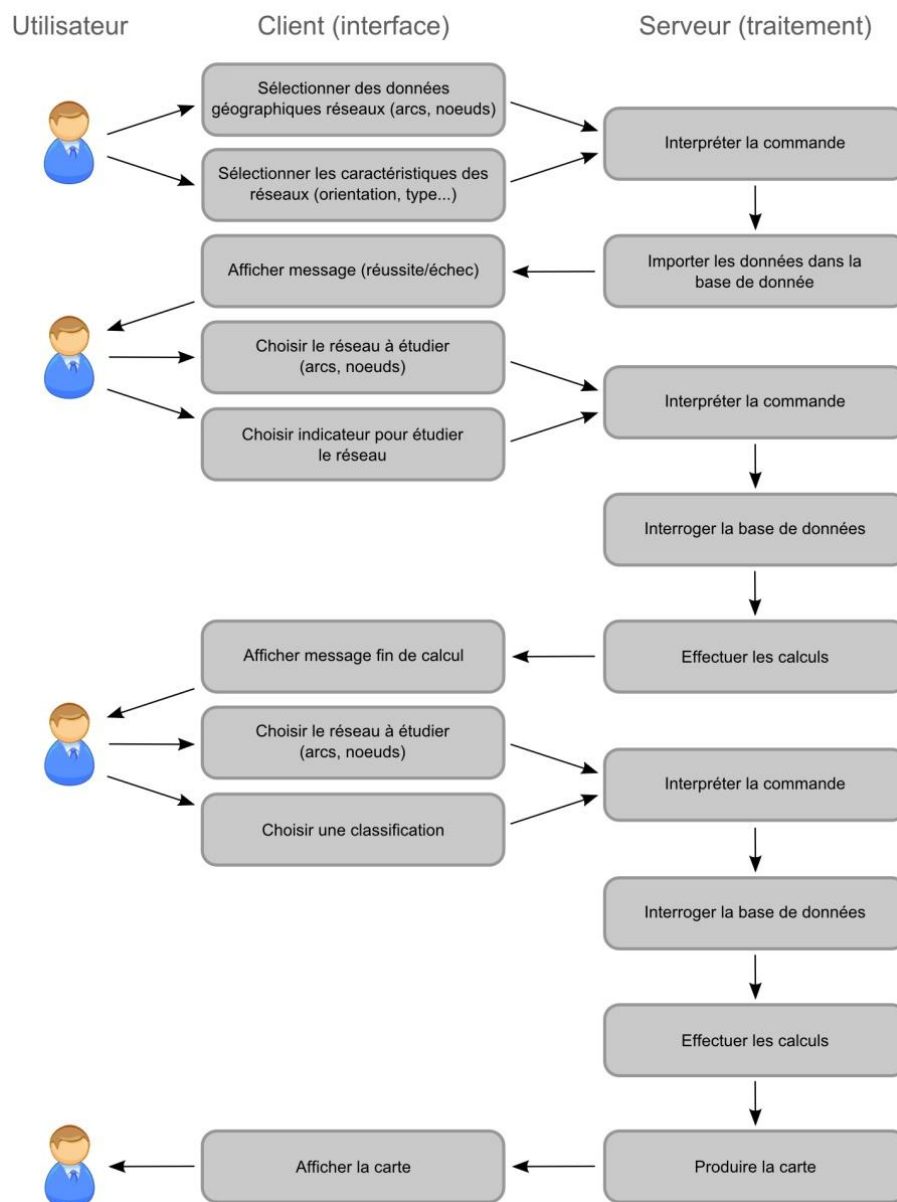


Figure 8.6 : Diagramme des cas d'utilisation concernant la capacité d'absorption.

L'outil est ainsi fondé autour des trois capacités de la méthodologie développée. Ces trois capacités peuvent être analysées indépendamment avant d'être éventuellement synthétisées. Les diagrammes réalisés permettent alors de présenter de façon graphique et synthétique (*i.e.* d'une façon assez facilement interprétable) l'ensemble des actions et des événements menant à l'affichage des résultats sous la forme de cartes ou de graphiques (Annexe 3).

La comparaison des différents diagrammes souligne les points communs entre les traitements aboutissant à l'affichage des résultats sous forme de cartes et les principales particularités de ces traitements.

De plus, à partir de ces diagrammes, il est possible d'entrevoir la composition de l'interface du système, de même que les principaux processus informatiques (sans pour autant entrer dans le détail de ces processus).

Cette partie conceptuelle a permis d'établir des modélisations qui sans entrer dans des considérations trop techniques vont servir directement pour l'implémentation de l'outil. En effet, le modèle conceptuel de traitements a permis de modéliser les différents événements et les différentes actions à implémenter. Le modèle conceptuel de données permet concrètement de construire une base de données supportant à la fois les données importées par l'utilisateur et les données issues des différents calculs.

8.3 CONCEPTION DU WEB-SIG

A partir des analyses fonctionnelles réalisées, il est nécessaire de chercher les différentes solutions techniques qui permettent de réaliser ces différentes fonctions. Ces solutions techniques sont alors organisées afin de déterminer l'architecture de l'outil. Il convient aussi de déterminer l'interface utilisateur qui va permettre l'interaction entre l'utilisateur et l'architecture mise en place. Cette interface s'appuie alors sur les modèles de traitements réalisés.

Il est important de préciser que cette phase de conception, ici découpée en deux parties, est encore une phase abstraite, bien que la frontière avec l'implémentation devienne de plus en plus difficile à établir.

8.3.1 Présentation de l'interface (les modules méthodologiques)

L'interface de l'outil web-SIG est le dispositif qui permet à l'utilisateur d'interagir avec le système développé (et par conséquent avec la méthodologie implémentée au sein de ce système). Cette interface est divisée en cinq zones (Fig. 8.7) : l'espace cartographique (1) ; les capacités (2) ; le ruban interactif (3) ; les outils (4) ; une zone complémentaire (5).

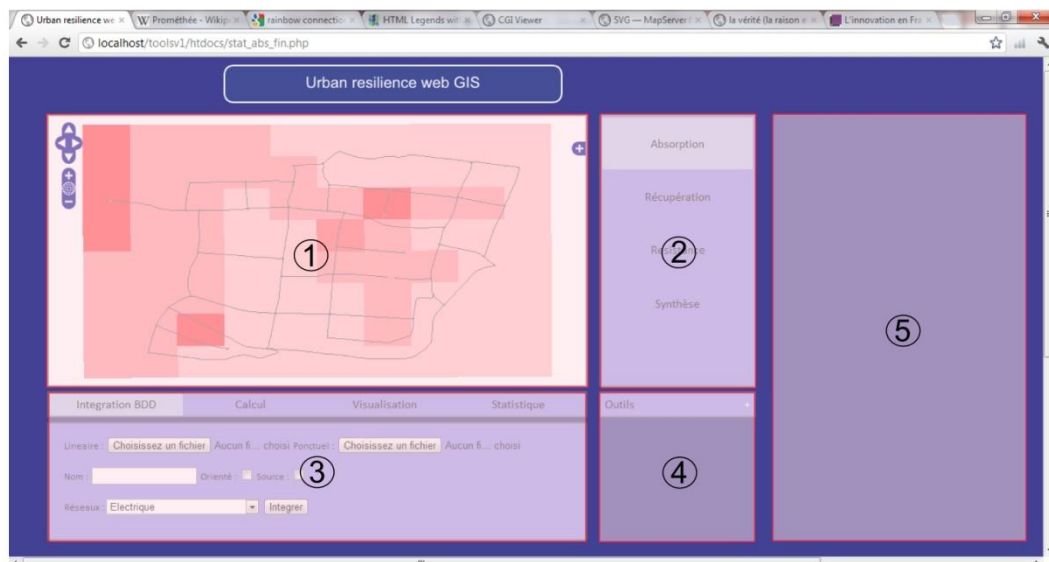


Figure 8.7 : Les différentes zones de l'interface.

➤ L'espace cartographique (1)

Pour un outil web-SIG, cette zone est par essence la zone principale. Cette zone concentre la carte et l'ensemble des éléments permettant de naviguer et d'interroger celle-ci (Fig. 8.8). Elle s'appuie pour cela sur le client cartographique Open Layers. Ainsi, en complément de la carte, cette zone comporte les outils de déplacement, de zoom, d'affichage des différentes couches d'informations géographiques et d'affichage des coordonnées.

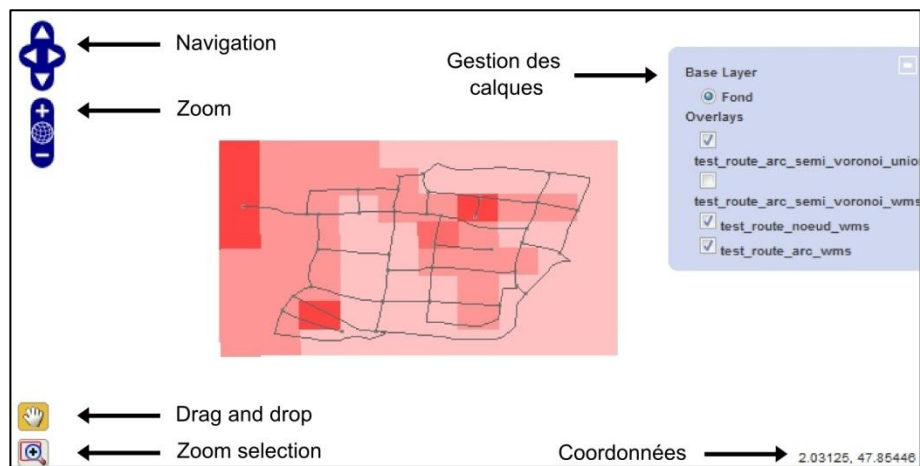


Figure 8.8 : Présentation de l'espace cartographique.

L'outil de zoom comprend la possibilité de revenir à tout moment sur une emprise générale englobant l'ensemble des couches d'information. Ainsi, sachant que l'outil de déplacement permet de se déplacer librement et sans limite, cette emprise permet à tout moment de revenir au centre de la carte, si l'utilisateur est perdu. Que ce soit l'outil de déplacement ou l'outil de zoom, ces outils sont optionnels. En effet, l'utilisateur peut se

déplacer à l’aide de « drag and drop » et zoomer à l’aide de la molette de la souris (à condition d’être sur la carte et d’avoir sélectionné l’outil de drag and drop). Il est donc possible de naviguer d’une manière assez intuitive et interactive sur la carte.

A noter, que l’affichage des cartes se fait dans le système de coordonnées international WGS 84 (code EPSG 4326) à l’aide d’une simple projection Mercator. En effet, ce système géodésique est associé au système GPS et il s’est rapidement imposé comme une référence pour la cartographie. Ce sont ces coordonnées qui sont affichées en bas à droite de la carte (correspondant à la position du curseur sur la carte). Comme l’outil implémente une multitude d’autres systèmes de coordonnées en entrée, le système peut être amené à réaliser de nombreuses transformations pour afficher ces cartes dans le système final choisi.

La gestion des couches d’information est assurée à l’aide du bouton situé en haut à droite de la carte. Une fois dépliée, il est simplement possible d’afficher les calques en cochant les cases correspondantes à ces couches comme sur un SIG classique. Par défaut, l’organisation des couches est telle que les éléments surfaciques sont affichés en dessous des éléments linéaires, eux-mêmes affichés en dessous des éléments ponctuels.

➤ *Les capacités et le ruban interactif (2) et (3)*

Les capacités et le ruban interactif constituent deux zones distinctes au sein de l’interface. Cependant, ces deux zones sont indissociables puisqu’elles interagissent. La zone de capacité se justifie alors simplement par la volonté de bien distinguer les différents aspects de la méthodologie d’analyse de la résilience des réseaux techniques, sensibilisant ainsi l’utilisateur à la démarche. Cette zone distingue les trois capacités de résilience à analyser, ainsi qu’un espace réservé à la synthèse des résultats permettant notamment d’introduire les enjeux majeurs et par conséquent d’analyser un peu plus généralement la résilience du territoire étudié.

Comme les deux zones interagissent, pour chaque capacité le ruban interactif affiche des onglets différents. Néanmoins, ces différents onglets montrent de nombreuses similitudes. Ainsi, chaque capacité comporte un onglet d’intégration des données, un onglet de calcul, et éventuellement un onglet de visualisation et un onglet statistique (Fig. 8.9).

Figure 8.9 : Présentation d’un onglet.

Ce sont surtout les formulaires correspondant à ces onglets qui diffèrent en fonction des capacités. Par exemple, les formulaires d’intégration des données sont différents. En

effet, chaque capacité requiert des données qui lui sont plus ou moins spécifiques. Les capacités d'absorption requièrent ainsi moins de données que les autres capacités. C'est en effet le niveau le plus générique de l'analyse de la résilience des réseaux techniques. Ces données concernent spécifiquement les réseaux (les arcs, les nœuds, l'orientation, le type de réseau...) et elles sont par la suite utilisées pour le calcul des autres capacités. Pour analyser la résistance des réseaux, il est nécessaire d'introduire les données liées à l'aléa. Enfin, l'analyse de la récupération des réseaux techniques nécessite d'introduire des données concernant les centres techniques (en charge de la remise en service des différents équipements) et les endommagements des réseaux étudiés (ces endommagements peuvent être issus du calcul de résistance).

A contrario, les onglets « statistique » des différentes capacités sont très similaires. En effet, ces onglets proposent à l'utilisateur différents modes de classification. A l'heure actuelle, deux modes de classification sont proposés : par intervalles égaux ou par quantile. De plus, il est nécessaire de préciser le mode de représentation des graphiques (en camembert, en barre...) et le paramètre sur lequel effectuer les classifications. A noter que les onglets « statistique » sont en interaction avec la zone complémentaire, puisque les graphiques s'affichent dans cette zone (Fig. 8.10).

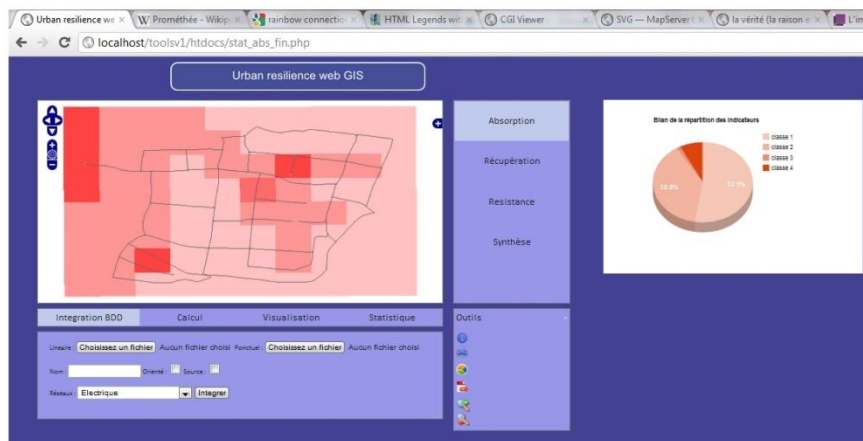


Figure 8.10 : Exploitation de la zone complémentaire par les graphiques statistiques.

➤ Les outils et la zone complémentaire (4) et (5)

L'espace cartographique possède ses propres outils. Cependant, d'autres outils, qui ne sont pas cartographiques, sont nécessaires pour le fonctionnement du système : comme les outils d'impression, les outils de gestion d'affichage de la zone complémentaire... A noter que cette zone comprend aussi des outils interagissant avec l'espace cartographique, comme par exemple un historique des différentes vues.

L'outil d'impression permet ainsi de lancer la production de la carte affichée à l'écran et de la légende correspondante. Cette cartographie s'affiche alors dans un popup permettant de lancer le gestionnaire d'impression du navigateur internet utilisé. Cette automatisation est très fonctionnelle mais ne donne pas un résultat très esthétique. C'est

pourquoi, il est possible gérer tous ces aspects cartographiques en dehors du web-SIG, à l’aide par exemple d’un SIG bureautique classique puisque les cartes sont accessibles en WMS et WFS (Fig. 8.11).

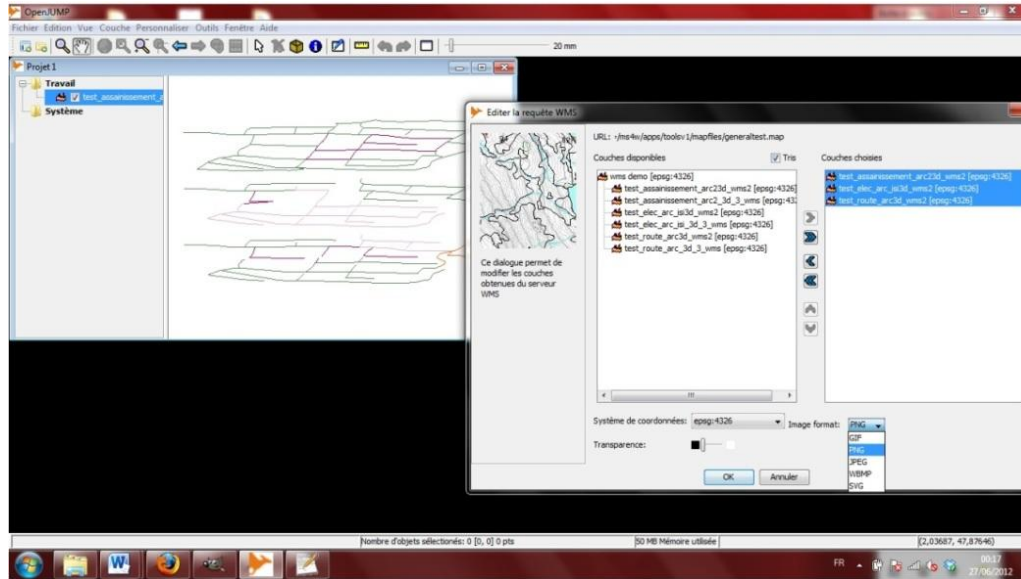


Figure 8.11 : Affichage d’une couche WMS produite par l’outil web-SIG à l’aide du SIG OpenJump.

De plus, trois icônes sont spécifiquement dédiées, dans cette zone « outil », à la gestion des affichages de la zone complémentaire. Ainsi, une icône permet d’afficher ou de cacher les informations relatives aux couches interrogées. Une autre icône affiche ou cache les graphiques produits. Enfin, une dernière icône affiche ou cache la légende correspondant à la carte affichée.

La zone complémentaire aurait pu ne pas être présente. En effet, cette zone aurait pu être remplacée par des popups, faisant alors apparaître les résultats des différentes requêtes. Cependant, le recours à des popups peut paraître un peu agressif pour l’utilisateur si les requêtes sont nombreuses. De plus, si les popups offrent une bonne flexibilité, ils créent des objets plus ou moins indépendants qui peuvent devenir difficile à gérer. La création d’une zone complémentaire s’est donc imposée. Concernant l’affichage des informations relatives aux objets interrogés, il est possible d’avoir recours à des popups qui s’affichent directement sur la carte.

8.3.2 Architecture de l’outil

L’architecture d’un outil logiciel correspond à la décomposition d’un système en plusieurs modules. Ces modules semblent simples puisque la complexité interne de ces modules est cachée. Le découpage et l’organisation de ces modules sont d’autant plus importants lorsque plusieurs personnes travaillent conjointement au développement du système logiciel, ou lorsque ce système devient quelque peu complexe.

Contrairement aux spécifications issues de l'analyse fonctionnelle, le modèle d'architecture, produit lors de la phase de conception, ne décrit pas ce que doit réaliser un système informatique, mais plutôt comment il doit être conçu de manière à répondre aux spécifications. L'architecture se place ainsi dans la continuité directe des modélisations conceptuelles en abordant néanmoins des aspects plus techniques.

C'est dans ce but que chaque fonction technique a fait l'objet de recherches afin d'identifier les meilleures solutions techniques (Tab. 8.2) (Annexe 3).

Fonctions de service	Fonctions techniques	Solutions techniques
Intégrer les données	Gérer différents formats de données géographiques	OGR/GDAL
	Gérer différents systèmes de coordonnées	Proj4
	Gérer format réseau	Définition d'une nomenclature
Stocker les données	Importer les données	PHP
	Stocker les données diverses	Serveur de base de données POSTGRESQL
	Stocker les données géographiques	Postgis
	Stocker les données réseaux	PgRouting
Incorporer les aspects réseaux	Différencier les capacités	Interface HTML
	Explorer la méthodologie	Javascript
	Faire les calculs	PHP
Incorporer les aspects enjeux majeurs	Différencier ces aspects	Interface HTML
	Synthétiser les capacités	PHP
	Faire les calculs	PHP
Editer les résultats	Editer les cartes	Mapserver
	Editer les graphiques	Google Chart

Tableau 8.2 : Inventaire « partiel » des solutions techniques.

A partir des différentes solutions retenues, une architecture générale a alors été définie. Ainsi, trois serveurs constituent la structure de l'outil : le serveur de base de

données PostgreSQL (et sa composante géographique Postgis), le serveur web Apache et le serveur cartographique Mapserver. Ces trois serveurs peuvent être interrogés par un navigateur internet à l'aide du client cartographique OpenLayers, ou bien à partir d'un SIG bureautique classique à l'aide de requêtes WMS et WFS (Fig. 8.12).

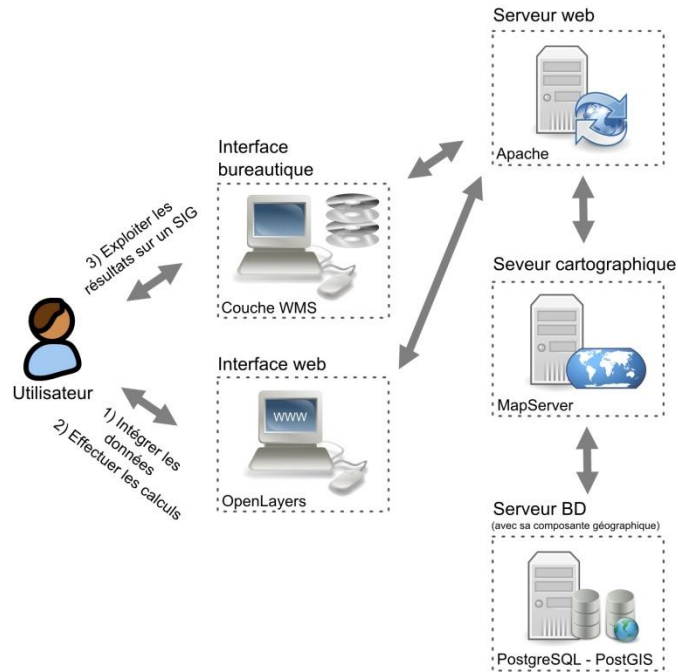


Figure 8.12 : Architecture générale du Web-SIG.

Plus exactement, l'architecture du système développé implique d'autres solutions techniques (Fig. 8.13).

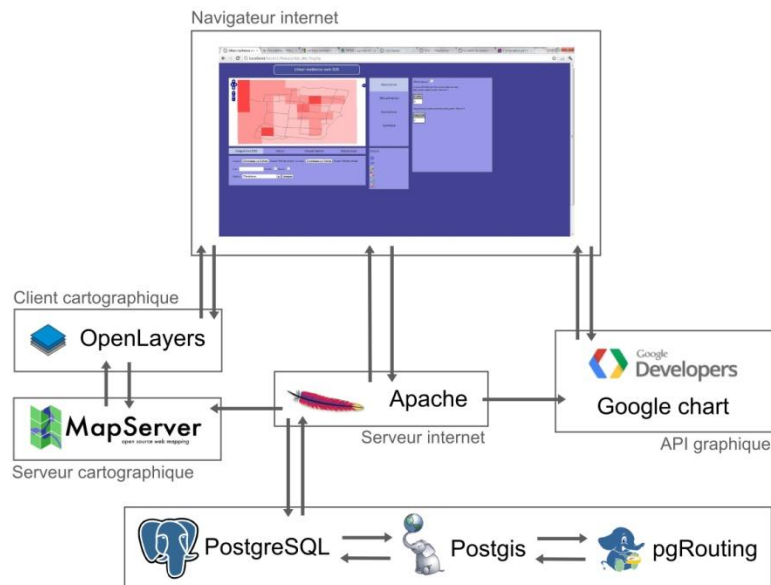


Figure 8.13 : Architecture du Web-SIG.

L'implémentation et l'exploitation des données réseaux sont gérés par l'intermédiaire de PgRouting au sein du serveur de base de données Postgres. La production des différents graphiques fait appel à une API google.

Ce chapitre concernant la conception de l'outil web-SIG a permis de présenter plus précisément celui-ci. Ainsi, l'architecture de l'outil permet d'appréhender son fonctionnement de manière générale tandis que la présentation de l'interface permet d'appréhender son fonctionnement de manière plus concrète. Il s'agit de la dernière phase de conception avant l'implémentation de l'outil.

8.4 SYNTHÈSE DU CHAPITRE 8

Ce chapitre a permis de présenter l'ensemble des différentes phases de conception qui ont contribué à l'implémentation de l'outil. Cette implémentation est importante, car elle permet de rendre opérationnelle la méthodologie d'analyse de la résilience des réseaux techniques développée dans cette recherche. En effet, avec cet outil, il est envisageable d'appliquer la méthodologie développée sur des terrains d'étude.

Compte tenu de cette importance, il s'est trouvé nécessaire de suivre une démarche de conception rigoureuse, même si l'outil développé n'est qu'un prototype. Cette démarche de conception s'appuie sur une définition générale, issue du génie logiciel, des phases du cycle de vie d'un logiciel. Ainsi, de la spécification fonctionnelle à la conception de l'outil, chaque développement a été formalisé à l'aide de méthodes déjà éprouvées. Des diagrammes UML, des schémas « entités-relations », des diagrammes de cas d'utilisation, des diagrammes FAST ont alors été réalisés.

Le développement d'un web-SIG, au détriment d'un SIG bureautique classique, constitue le choix principal effectué dans ce chapitre. Ce choix s'explique par la volonté de créer un outil indépendant vis-à-vis des SIG existants. De plus, comme les outils SIG se sont largement développés sur le web, ce développement s'accompagnant de standards qui assurent leur interopérabilité avec la plupart des SIG existants, le développement d'un Web-SIG apparaissait crédible. En outre, les changements de pratiques dans les milieux institutionnels de la recherche et des collectivités territoriales, accompagnant plus largement des changements de pratiques sociales, ont encouragé la mise en place de cet outil.

Chapitre 9

Dublin une ville à l'épreuve des inondations

Une méthodologie permettant d'analyser la résilience des réseaux techniques face aux risques d'inondation a été développée dans les chapitres précédents. Puis, un outil Web-SIG a été conçu afin d'implémenter la méthodologie développée. Ainsi, ce Web-SIG permet de rendre cette méthodologie opérationnelle. Il convient dès lors d'utiliser cet outil sur un terrain d'étude approprié pour appliquer la méthodologie sur un cas concret.

Dans le cadre de ces recherches, des contacts ont pu être établis avec différentes collectivités européennes : Orléans, Dordrecht, Dublin, Mayence... Cependant, il s'est révélé difficile de trouver des terrains d'étude propices à la mise en pratique de la méthodologie développée, car de nombreuses collectivités ne possèdent pas de données géographiques, qui soient directement exploitables par un SIG, concernant leurs différents réseaux techniques. Dans les faits, la majorité des collectivités ont délégué la gestion de leurs réseaux techniques (comme l'eau, l'électricité, la téléphonie...). C'est pourquoi, dans la plupart des cas, l'application de la méthodologie nécessiterait une sensibilisation incitant les collectivités à entrer dans une démarche de recueil des données. Or, cet aspect dépasse le cadre de cette recherche. Pourtant, les choix méthodologiques effectués (notamment le choix d'une modélisation mathématique des réseaux techniques plutôt que d'une modélisation physique des flux) permettent de minimiser les besoins concernant les données.

En outre, aborder les problématiques relatives aux inondations par le biais d'une analyse des réseaux techniques surprend la plupart des collectivités, qui sont davantage familiarisées avec les analyses de risques centrées sur l'aléa. Même si certaines collectivités sont désormais familiarisées avec les analyses de risques davantage centrées sur les enjeux et leurs vulnérabilités, les approches centrées sur les réseaux techniques sont peu courantes.

Il faut admettre que si la plupart des collectivités rencontrées étaient intéressées par cette méthodologie, elles étaient en revanche peu enclines à la mettre en pratique. Néanmoins, une collectivité s'est montrée particulièrement intéressée par la méthodologie développée. Ainsi, la ville de Dublin, engagée dans le projet FloodResilienCity, a rassemblé l'ensemble des données qu'elle possédait concernant ses différents réseaux techniques afin de permettre une application sur son territoire. En effet, la ville de Dublin gère directement son réseau de voirie et son réseau

d'assainissement. De plus, elle possède l'ensemble des données concernant son réseau électrique. Il était alors possible, à partir de ces données, d'appliquer la méthodologie développée sur le territoire de Dublin.

Dans un premier temps, le contexte dublinois sera présenté afin de souligner la nécessité pour ce territoire de mettre en place des politiques de résilience pour faire face aux risques d'inondation. En effet, la ville de Dublin, et plus largement la région du Grand Dublin, se révèlent être en pleine expansion et très exposées à des inondations d'origines diverses. Puis, il sera question, dans un deuxième temps, d'appliquer la méthodologie développée à l'ensemble des réseaux techniques de la ville de Dublin afin d'analyser leur résilience.

9.1 LA RESILIENCE COMME IMPERATIF

Dublin est à la fois la capitale et la plus grande ville irlandaise (Fig. 8.1). Longtemps ouverte sur le monde par la seule mer d'Irlande, Dublin est toujours aujourd'hui une ville portuaire (www.dublinport.ie). A l'instar d'une partie du pays, la ville de Dublin a connu un développement économique important, notamment durant la décennie 1990-2000 (Ellis & Kim, 2001), rattrapant ainsi en partie son retard sur d'autres capitales européennes, alors même qu'elle apparaissait dans le milieu des années 1980 comme une ville industrielle en déclin (McLaran, 1984, Crotty, 2000). Néanmoins, ce développement soulève de nombreuses questions. Ainsi, les inégalités se creusent entre Dublin et une partie du pays (Grison, 2004). De plus, ce développement économique s'accompagne d'un développement démographique qui soulève des questionnements d'ordre technique et urbanistique.



Figure 9.1 : Dublin une ville côtière.

En outre, comme Dublin est une ville fortement exposée aux inondations, cette ville côtière doit faire face à un défi de taille : continuer à se développer tout en réduisant les coûts économiques et sociaux induits par des inondations récurrentes. C'est pourquoi, la ville Dublin tente actuellement de mettre en place une politique de résilience.

9.1.1 Une « petite » capitale en plein essor

Une des principales spécificités de la capitale irlandaise tient simplement à son nombre relativement peu élevé d'habitants pour une capitale européenne, puisque sa population est seulement d'environ 520 000 habitants (www.cso.ie). En ce sens, il est possible de considérer la ville de Dublin comme une « petite » capitale. Ainsi, la ville de Dublin est classée au-delà des 50 villes les plus peuplées d'Europe (entre la 50 et la 60^{ème} place) et parmi les capitales européennes elle se classe au-delà de la vingtième place (23^{ème} sur 30) (www.urbanaudit.org). La prise en compte de l'agglomération dublinoise – incluant les comtés de Fingal, Dublin Sud et Dun Laoghaire-Rathdown (Fig. 8.2) – qui compte un peu plus d'un million d'habitants, ou encore plus largement la prise en compte du Grand Dublin – incluant de plus les comtés de Meath, Kildare et Wiclow (Fig. 8.2) – qui regroupe alors un peu plus de 1 800 000 habitants, permet de nuancer le précédent constat. Néanmoins, si la prise en compte de ces comtés permet de mieux appréhender la réalité du territoire dublinois, ils soulignent alors une autre spécificité de ce territoire : sa faible densité.

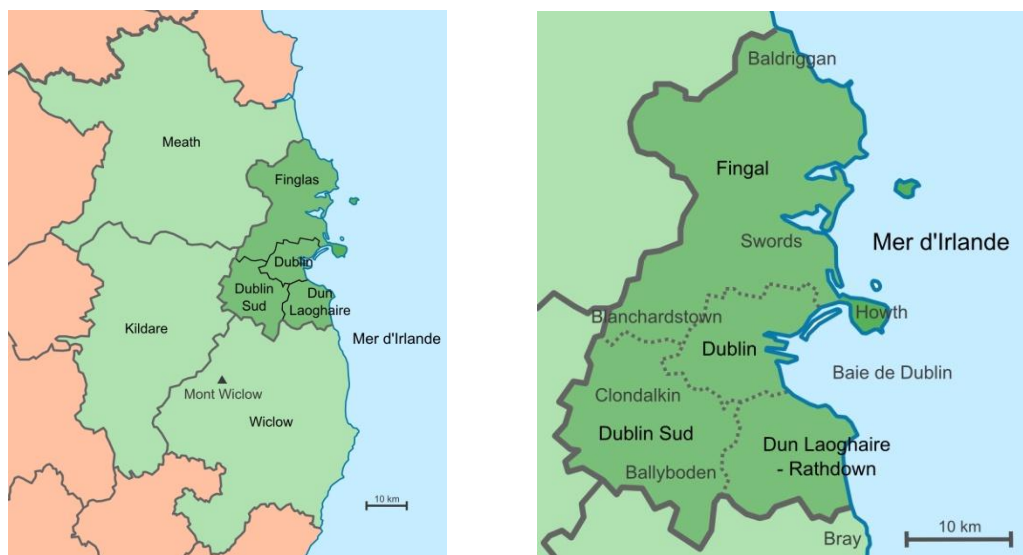


Figure 9.2 : Le grand Dublin (à gauche) et le comté de Dublin (à droite).

Toute proportion gardée, à l'instar d'une ville comme Paris, la banlieue et la région rassemblent plus d'habitants que la ville centre (le rapport de la population totale du Grand Dublin sur la population de la ville est environ égal à 3.1, c'est un des rapports les plus élevés parmi les capitales européennes). Or, si le centre de Dublin est plutôt dense, environ 4500 hab/km² (10^{ème} sur 28 au classement des capitales européennes), son aire

urbaine affiche au contraire une densité très faible pour une capitale européenne, environ 230 hab/km² (28^{ème} sur 28 au classement des capitales européennes). En effet, la « proche » banlieue de Dublin est presque exclusivement constituée de lotissements et de grands espaces verts. Ces chiffres confirment ainsi la sensation d'un citoyen visitant pour la première fois la capitale irlandaise : une ville peu « verticale » et verdoyante, certes étendue, mais opposée à l'image de mégapoles comme Paris ou Londres et d'autres capitales moins gigantesques comme Madrid, Rome ou bien Amsterdam. *In fine*, la densité du Grand Dublin, qui est de 25 hab/km² (rappelons que la DATAR (Délégation interministérielle à l'Aménagement du Territoire et à l'Attractivité Régionale) fixe à 30 hab/km² la limite pour caractériser un espace urbanisé en France), illustre bien la diversité de cet espace, regroupant une ville centre assez densément peuplée, des zones de lotissement où se concentre la majorité de la population, et des espaces majoritairement ruraux lorsqu'on s'éloigne de Dublin dans l'arrière-pays (Fig. 8.3).

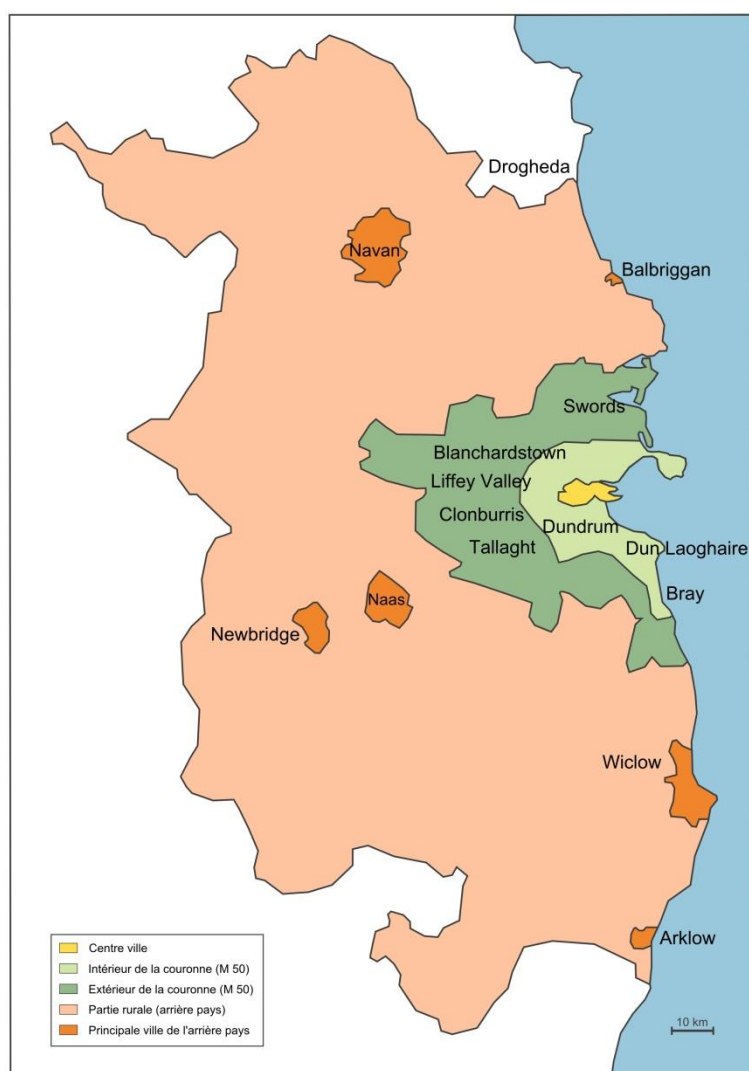


Figure 9.3 : Dublin d'un point de vue plus fonctionnel et moins administratif (d'après : NTA, 2011).

Au début des années 1980, l'économie irlandaise est surtout tournée vers l'agriculture (Grison, 2004). Son économie est alors plutôt fragile, malgré l'entrée de l'Eire dans le marché commun européen en 1973. Ainsi, en 1985, le PIB par habitant est inférieur de plus de 30% à la moyenne européenne, le taux de chômage y est de 19 % et l'inflation de 20 % (Crotty, 2000). A la fin des années 1980, l'Irlande s'oriente vers une politique volontairement libérale (voire néolibérale) qui consiste à attirer des investisseurs étrangers et à concentrer principalement le développement du pays sur trois secteurs d'activité : les produits chimiques et pharmaceutiques, les technologies de l'information et de la communication, et les services financiers. Des aides logistiques et financières sont notamment prévues pour les entreprises étrangères qui veulent s'installer et les taux d'imposition sur les bénéfices des sociétés sont abaissés. Ces taux sont désormais parmi les plus faibles d'Europe. Enfin, une grande flexibilité du marché du travail, conjuguée à de forts investissements dans l'éducation, assurent à l'Irlande une prospérité durant les années 1990 (Grison, 2004). Entre 1995 et 2000, le taux de croissance du PIB irlandais dépasse les 8 % par an. En 2007, le taux de chômage n'était plus que de 4,6 %. Pour qualifier ce développement, il était devenu courant d'utiliser l'image du « tigre celtique » en comparaison aux tigres asiatiques qui se développaient eux aussi de manière spectaculaire durant la même période (Crotty, 1998).

Or, la croissance irlandaise s'est surtout concentrée sur les villes de Dublin et de Cork (la principale ville du sud du pays). En effet, la tête du « tigre celtique », l'agglomération dublinoise, a fortement profité de la croissance économique irlandaise durant les années 1990 (Crotty, 2000 ; Grison, 2004). Dublin attire aujourd'hui beaucoup d'irlandais et de plus en plus d'immigrants du Royaume-Uni (40% du total), d'Asie, ou encore d'Afrique. Son accroissement démographique est très rapide et la population du Grand Dublin devrait atteindre les 2,4 millions d'habitants en 2020 (Fig. 9.4).

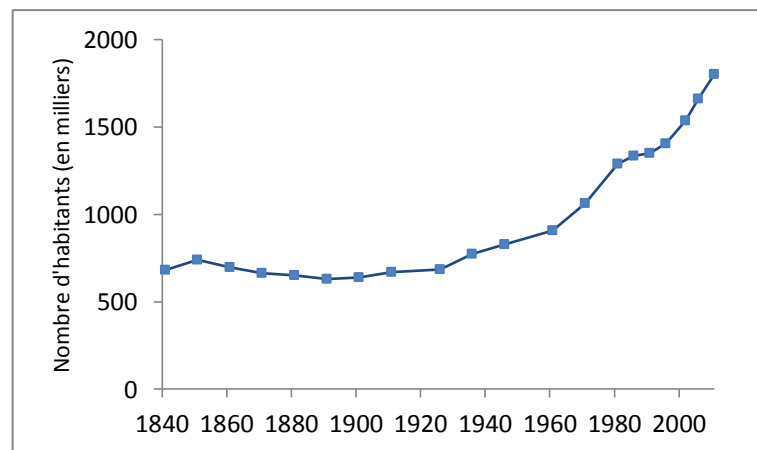


Figure 9.4 : Evolution de la population (en millier d'habitants) de la région de Dublin de 1840 aux années 2000 (www.cso.ie).

Métropole européenne, interface entre l'Irlande et le monde (près de 50% des échanges commerciaux irlandais transitent par le port de Dublin), elle concentre la

population (le grand Dublin représente 40% de la population du pays) et la richesse du pays. L'emploi y a augmenté de 41% en 10 ans et le taux de chômage y est le plus faible du pays. Deux tiers des 800 entreprises étrangères du pays y sont implantées et l'écart entre Dublin et le reste du pays a tendance à se creuser (Grison, 2004). Dans une Irlande encore rurale (58,8% d'urbains seulement), les élus des zones peu urbanisées s'inquiètent d'une mise à l'écart des régions les plus fragiles (Grison, 2004).

Ainsi, durant les années 1990, l'Irlande est devenue une place centrale en matière de développements des technologies de l'information et de la télécommunication (Breathnach, 2000 ; Ellis & Kim, 2001). Dublin est, en quelque sorte, devenue la capitale européenne d'internet. Elle est même considérée par certains comme la « Silicon Valley européenne » attirant des milliers d'ingénieurs et de cadres français, allemands, espagnols... En effet, beaucoup d'entreprises de télécommunication et d'informatique s'y sont implantées : Oracle, Microsoft, Paypal, Yahoo, Hewlett Packard, Intel, Dell... Plus récemment, les sièges sociaux des entreprises des réseaux sociaux comme Facebook et LinkedIn s'y sont aussi implantés, Dublin attirant particulièrement les entreprises américaines (Breathnach, 2000).

Le géant Google n'a pas échappé à cette « attraction » en installant en plein cœur de Dublin son siège européen. L'entreprise Google a alors réussi à ramener son taux d'imposition sur les bénéficiaires à seulement 2,4% (Bloomberg). De plus, Google va encore investir 75 millions d'euros pour développer un nouveau centre de stockage de données à Dublin, impliquant la création de 230 emplois, pour des raisons cette fois-ci avant tout « climatiques » (en l'occurrence le climat dublinois est intéressant pour le refroidissement des serveurs). L'informatique en nuage (ou *cloud computing*) qui nécessite de nombreux centres de ce genre va sans doute encore renforcer cette image de « Silicon Valley européenne ».

Enfin, dans la controverse entourant Apple, qui à l'aide d'un procédé de défiscalisation complexe échappe légalement à des milliards d'euros d'impôts (Duhigg & Kocieniewski, 2012), il est à noter qu'un des sièges sociaux du groupe est situé à Cork. Ainsi, les deux principales villes bénéficiant du développement irlandais sont trivialement identifiables en suivant l'actualité des entreprises de télécommunication et d'informatique.

L'autre secteur moteur dans le développement économique de Dublin concerne les services financiers, les banques et le commerce (Breathnach, 2000). A titre d'exemple, l'IFSC (International Financial Services Centre) est un centre d'affaires irlandais situé dans le centre de Dublin (dans le quartier de North Wall) qui embauche environ 14 000 personnes et traite environ 1 milliard d'euros de valeurs par an. Ce centre a été créé en 1987 et a bénéficié d'un régime fiscal particulier avec l'accord de l'Union Européenne (Financial act de 1987). Ainsi, tout établissement financier s'implantant dans cette zone a bénéficié de ces avantages jusqu'en 2005. Désormais, ces entreprises sont taxées à hauteur de 12,5%, c'est-à-dire au taux d'imposition actuellement en vigueur en Irlande (taux qui reste très avantageux en Europe), au lieu de 10% précédemment.

Des entreprises internationales, comme la Citibank et la Commerzbank, y ont établi leur siège, tout comme la Bourse des valeurs irlandaises (ISEQ). Ce centre abriterait plus de la moitié des 50 plus grandes institutions financières mondiales (www.ifsc.ie). C'est pourquoi, la ville de Dublin a pu être considérée comme la 10^{ème} place financière mondiale en 2009 selon certains classements (GFICI, 2009). Il n'est donc pas étonnant que la crise financière récente, qui a fortement secoué l'ensemble des places financières mondiales, ait frappé fortement l'Irlande et en particulier Dublin. L'Irlande a ainsi été le premier pays européen à entrer en récession : le produit intérieur brut (PIB) reculant de 1,6 % en 2008.

Ce développement économique, qui s'accompagne d'une croissance démographique importante, ne va pas sans poser de nombreux défis techniques à la collectivité de Dublin et à l'ensemble de la Région. Ainsi, en ce qui concerne le réseau d'assainissement, une étude stratégique du système d'assainissement du Grand Dublin (GSDSDS : The Greater Dublin Strategic Drainage Study) a été réalisée afin de répondre à deux défis clairement identifiés :

- tenir compte à la fois du développement économique important de la région du Grand Dublin et de la nécessité de prévoir l'avenir socio-économique de celle-ci ;
- se conformer aux dernières législations sur l'environnement qui font suite aux directives européennes sur l'eau.

Cette étude, qui a abouti en 2005, s'est appuyée sur une évaluation de la croissance de la population dans la zone d'étude considérée (zone en l'occurrence inférieure à celle du Grand Dublin, mais supérieure à celle de l'agglomération). Cet accroissement représente le principal défi pour les gestionnaires du réseau d'assainissement (Tab. 9.1). L'étude conclut que la station d'épuration de Ringsend ne pourra à elle seule faire face aux besoins futurs. Il n'est ainsi pas possible de maximiser la capacité de cette station de manière à satisfaire les besoins futurs (GSDSDS, 2005). En effet, en augmentant sa capacité de traitement au maximum, l'usine de Ringsend ne pourra satisfaire qu'environ 2 100 000 habitants. Une nouvelle installation est donc nécessaire. Cette station aura pour objectif d'intercepter certains flux s'écoulant en direction de l'usine de Ringsend. Actuellement, les gestionnaires sont à la recherche du meilleur emplacement pour cette nouvelle station d'épuration.

	2002	2011	2031
Population	1 255 545	1 489 962	2 054 401
Comparaison 2002		+ 22%	+ 68%
Habitations	420 130	605 667	943 627
Comparaison 2002		+ 44%	+ 125%

Tableau 9.1 : Evolution de la population dans la zone d'étude stratégique du système d'assainissement du Grand Dublin (GSDSDS, 2005).

Un autre défi technique est directement induit par le développement de Dublin. Ce défi concerne les modes de déplacement des dublinois (Ellis & Kim, 2001). En effet, la ville de Dublin connaît régulièrement des embouteillages assez conséquents (Fig. 9.5). Autrement dit, Dublin est congestionnée. Selon des classements établis par la société de GPS TOMTOM et par le producteur de données routières NAVTEQ, Dublin se classerait régulièrement parmi les 30 villes les plus embouteillées d'Europe. Certains mois, Dublin a même pu être classée parmi les 10 villes européennes les plus embouteillées.



Figure 9.5 : Une ville fortement congestionnée. En rouge les embouteillages matinaux à Dublin (NTA, 2011).

De plus, la situation n'est pas sur le point de s'arranger, puisque le nombre de voitures circulant chaque matin dans le centre-ville de Dublin a augmenté entre 2005 et 2008, et ce malgré l'accroissement de l'offre en matière de transports en commun (notamment concernant les bus). Ainsi, une étude conduite dans la zone urbaine de Dublin a montré l'échec des différentes tentatives du gouvernement pour inciter les dublinois à prendre les transports en commun plutôt que les transports individuels motorisés (NTA, 2011).

La diminution de la circulation automobile enregistrée durant presque dix années a aujourd'hui pris fin. Selon certains experts, la situation est telle que la congestion routière est en train progressivement d'étouffer la vie commerciale et sociale de Dublin. Ainsi, la congestion automobile coûterait aux entreprises de la ville environ 650 millions d'euros par an (NTA, 2011). Une des solutions les plus couramment avancées pour faire face à cette croissance est alors de limiter celle-ci à l'aide d'un système tarifaire contraignant. La mise en place d'un péage urbain est notamment envisagée afin de limiter le trafic. Cette proposition est promue par l'Autorité Nationale des Transports (NTA). Néanmoins, le gouvernement actuel a totalement exclu cette solution. Pourtant, selon la NTA, un péage urbain est nécessaire afin d'éviter l'aggravation des problèmes de congestion au cours des

années à venir. En effet, l'agence chargée des transports publics a averti le gouvernement que les volumes de trafic augmenteraient au cours de ces prochaines années, conduisant ainsi inévitablement à augmenter la durée des trajets pour les « *commuteurs* » (navetteurs, travailleurs effectuant un mouvement pendulaire quotidien). Le développement urbain en dehors de la ceinture autoroutière (territoire extérieur à l'autoroute M50) de Dublin pose alors des problèmes importants en termes d'aménagement des infrastructures de transports (Fig. 9.6).

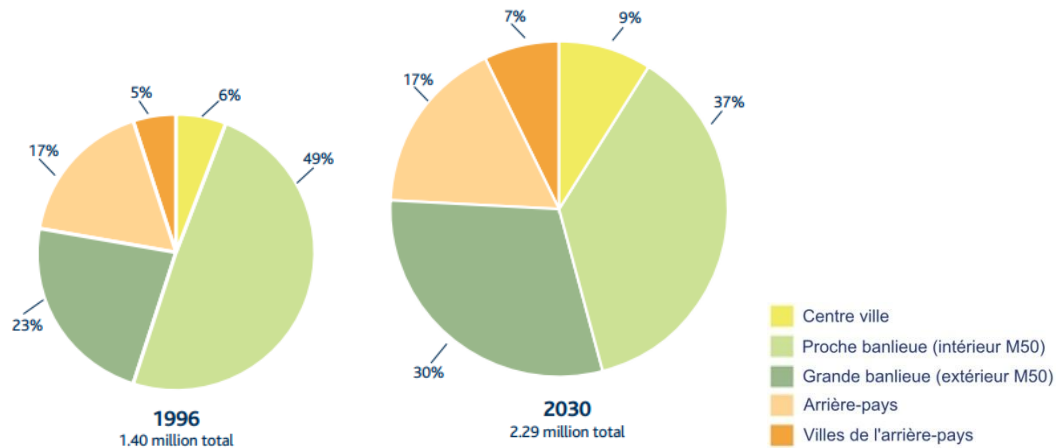


Figure 9.6 : Evolution estimée de la population entre 1996 et 2030 (NTA, 2011).

Pour le gouvernement, le système de transports en commun n'est pas actuellement assez développé et n'offre pas une alternative crédible aux transports individuels motorisés. Ainsi, selon le gouvernement, il serait nécessaire de développer les transports en commun avant d'envisager la mise en place d'un péage urbain.

Pour résumer, si la crise financière récente interroge le modèle de développement irlandais, et peut par conséquent laisser entrevoir des incertitudes concernant le futur développement de la ville de Dublin (à titre d'exemple, Dublin n'est plus aujourd'hui classée parmi les 40 premières places financières mondiales), il n'en reste pas moins évident que Dublin va continuer à se développer fortement. D'ailleurs, la comparaison de l'évolution démographique des villes européennes, entre 1950 et 1990, résume bien la trajectoire singulière de Dublin par rapport aux autres villes anglo-saxonnes (Rozenblat & Cicille, 2003).

Cette « petite » capitale en plein essor est aujourd'hui à un tournant en ce qui concerne la gestion de ses différentes infrastructures dont certaines sont déjà dégradées ou très anciennes. En effet, ce développement interroge sa politique d'aménagement qui repose presque exclusivement sur un étalement urbain de plus en plus important. Alors que la crise économique touche fortement Dublin, les investissements nécessaires pour assurer le développement de ses infrastructures se font rares, soulevant alors des questionnements légitimes sur la pérennité de son mode de développement.

9.1.2 Une ville fortement exposée aux inondations

Lundi 24 octobre 2011, des pluies diluviennes se sont abattues sur la côte Est de l'Irlande. En l'espace de 3 heures, la pluviométrie a atteint environ 80 millimètres, soit une quantité qui tombe normalement en 3 jours. Deux cours d'eau qui traversent la ville (les rivières Dodder et Camac) sont alors sortis de leur lit, inondant de nombreuses habitations (environ 300) et noyant tragiquement deux personnes (Leahy, 2011). Parallèlement à ces débordements, les pluies torrentielles ont eu pour effet d'inonder de grands axes routiers et l'un des plus grands centres commerciaux de Dublin. Cet événement hydrométéorologique majeur a nécessité le déclenchement d'un plan d'urgence pour protéger la ville et ses habitants (Leahy, 2011). Cet épisode récent rappelle que la ville de Dublin est fortement exposée aux inondations (Fig. 9.7).



Figure 9.7 : Dublin et les différentes zones inondables (Leahy, 2009).

Ainsi, la ville de Dublin subit régulièrement des inondations. Ces dix dernières années, trois événements majeurs se sont produits : une inondation côtière en Février 2002 impliquant le débordement de la rivière Dodder, des précipitations extrêmes en Août 2008 et la combinaison d'inondations pluviales et fluviales en Octobre 2011. Dans les faits, la ville de Dublin est un « cas d'école » en matière de problématiques relatives à la gestion des inondations en milieu urbain, puisque d'une part ce territoire concentre un ensemble assez diversifié de sources d'inondations (Dublin est ainsi exposée aux crues fluviales, pluviales et côtières) et d'autre part elle doit faire face à un développement urbain continu qui requiert d'aménager ces zones inondables.

Si Dublin est une ville fortement exposée aux inondations, elle l'est notamment en raison de sa situation géographique (Fig. 9.8). Ainsi, Dublin est une ville côtière (Mer d'Irlande) traversée par 3 rivières principales (Liffey, Dodder, Tolka), des canaux (Royal Canal, Grand Canal) et de nombreux autres cours d'eau (Wad, Poddle, Camac) dont certains sont désormais souterrains. De plus, cette ville est soumise à de très fortes pluies et à de nombreuses tempêtes. En outre, deux des principaux cours d'eau de la ville (la rivière Liffey et la rivière Dodder) se rejoignent en plein cœur de Dublin. Cette jonction, conjuguée à la présence de nombreux petits cours d'eau, donnent naissance à une situation hydrologique complexe au niveau de l'estuaire de la Liffey (plus précisément au niveau des Docks du Grand Canal, à l'entrée du quartier de Ringsend).



Figure 9.8 : Les principaux cours d'eau de Dublin.

La ville de Dublin doit faire face à des crues qui sont souvent violentes et rapides. En effet, la ville de Dublin est traversée et délimitée par des cours d'eau dont les bassins versants sont petits et assez réactifs. C'est pourquoi, les crues pluviales et fluviales s'additionnent souvent, formant alors un seul événement majeur. Cela explique aussi l'attention particulière apportée à la prévision et à la modélisation de ces aléas par le service responsable de la gestion des risques d'inondation (en l'occurrence le service de l'eau, des déchets et de l'environnement du *Dublin City Council*)⁴. Ainsi, les principaux cours d'eau ont fait l'objet d'études hydrologiques spécifiques.

C'est notamment le cas pour la rivière Dodder. La rivière Dodder est l'une des rivières les plus connues et les plus importantes de Dublin. Cette rivière prend sa source dans les montagnes voisines de Dublin (dans le comté de Wicklow) et sa partie amont fait partie intégrante du système d'approvisionnement en eau potable de la ville (avec notamment le réservoir de Bohernabreena). Cette rivière coule à travers les zones

⁴ Il sera fait référence désormais au DCC pour ce service.

périurbaines de Tallaght et Rathfarnham, puis à travers les quartiers des villes de Donnybrook et Ballsbridge, pour finalement aller se jeter dans l'estuaire de la Liffey au niveau du quartier de Ringsend. La Dodder apporte de nombreuses aménités, puisqu'elle est largement utilisée par les pêcheurs et offre une variété d'activités sportives et récréatives tout au long de ses 26 km.

La rivière Dodder a débordé à de nombreuses reprises durant le 20^{ème} siècle, donnant ainsi naissance à une longue histoire en matière d'inondations. Ces inondations sont qualifiées de crues éclairées (« flash flood »), puisque cette rivière a un temps de réponse très court aux fortes pluies. En effet, sa source étant située dans les montagnes de Dublin, cette rivière possède une pente relativement importante. Les vitesses d'écoulement peuvent donc y être importantes. Une des inondations les plus importantes s'est produite le 25 Août 1986, suite au passage de l'ouragan Charlie, avec au total plus de 300 propriétés touchées par les inondations.

De nouveaux barrages réservoirs ont alors été construits afin de faire face à une crue de référence maximale. Ces travaux ont été achevés en 2006. Un autre événement remarquable s'est produit en Février 2002, alors même qu'il y avait une marée importante. D'ailleurs cette crue est plutôt référencée comme une crue côtière provoquée en partie par cette marée. Plus de 600 propriétés ont alors été inondées. Enfin, les inondations récentes de 2011 ont abouti à peu près au même bilan.

Compte tenu de cet historique, une enquête topographique et hydrologique détaillée du fleuve et de ses principaux affluents a été effectuée. L'objectif de cette étude était de fournir des données géolocalisées afin de modéliser précisément le fonctionnement de ce fleuve. Ainsi, à partir de cette modélisation, une identification précise des zones inondables a pu être obtenue. De plus, des modèles de prévision couplés à un système d'alerte sont aujourd'hui en phase de développement.

Parallèlement à ces modélisations, un cabinet d'ingénieurs a élaboré des mesures spécifiques afin de réduire les risques existants et les risques potentiels futurs dans le bassin versant de la rivière Dodder. Les mesures envisagées comprennent des mesures structurelles et des mesures non structurelles.

Certaines mesures sont plutôt locales, comme la construction de nouvelles défenses structurelles contre les inondations et la préservation des plaines inondables par un zonage spécifique. D'autres mesures sont plus globales (elles s'appliquent à l'échelle du bassin versant) comme la mise en place d'un système de surveillance, de prévision et d'alerte des crues. Grâce à cette évaluation, les gestionnaires du DCC pensent disposer d'un éventail complet de mesures potentiellement viables, prenant en compte une série de critères (techniques, économiques et environnementaux) à l'échelle du bassin versant de la rivière Dodder.

D'ailleurs, à partir des modélisations réalisées et des mesures proposées, un plan de gestion des risques d'inondation à l'échelle du bassin versant a été réalisé. Ce plan fait actuellement l'objet d'une consultation auprès de la population du bassin. Parallèlement à ces développements réalisés sur la rivière Dodder, des études similaires ont été

conduites sur la rivière Liffey et la rivière Tolka (qui ont connu 17 inondations de diverses amplitudes depuis 1980), menant elles aussi à la mise en place de plans de gestion des risques d'inondation à l'échelle des différents bassins versants. Autrement dit, le DCC a résolument adopté une gestion des risques d'inondation à l'échelle du bassin versant associant des mesures structurelles et non structurelles. De plus, le DCC tente de sensibiliser la population aux risques d'inondation et aux démarches accomplies pour les réduire. Ainsi, des journées sont régulièrement organisées pour sensibiliser la population.

Pour faire face aux inondations côtières, une politique de gestion particulière a été mise en place. En effet, les possibles effets du changement climatique sur cet aléa inquiètent fortement les gestionnaires du DCC. Ces gestionnaires mobilisent ainsi des moyens importants afin de modéliser précisément cet aléa et les effets du changement climatique sur celui-ci. Toute la côte du district de Clontarf, qui est fortement exposée à ces inondations (Fig. 9.9), a donc fait l'objet d'une modélisation complète.



Figure 9.9 : Les inondations côtières de 2002 à Dublin dans le quartier de Clontarf (Leahy, 2009).

Un système de prévision et d'alerte est aussi en cours de développement. En outre, un plan de protection a été adopté pour cette zone. Ce plan se fonde essentiellement sur des mesures structurelles : notamment avec la construction d'une série de digues tout le long de la promenade de Clontarf afin de protéger les routes et les propriétés situées à proximité de la côte. La longueur totale du système de protection sera d'environ 3 km. De plus, des travaux sur le réseau d'eaux pluviales devraient contribuer à lutter contre cet aléa. Si l'approche adoptée sur la côte de Clontarf est presque uniquement technique, les aspects paysagers et les aménités pouvant être offertes par les infrastructures envisagées ont aussi été étudiés. Par exemple, l'intégration d'une voie cyclable, actuellement en projet, qui permettrait de relier par la côte les villes de Sutton à Dun Laoghaire, a ainsi été prise en compte.

Enfin, les crues pluviales soulignent particulièrement le sous-dimensionnement du réseau d'écoulement des eaux pluviales ainsi que sa vétusté dans certaines parties de la ville de Dublin (Fig. 9.10). Ainsi, les principaux enseignements tirés des inondations d'Octobre 2011 confirment que de nombreuses infrastructures du réseau d'assainissement (il s'agit d'un réseau majoritairement unitaire excepté dans certaines zones urbaines récentes) doivent être remplacées et redimensionnées. En effet, certaines infrastructures ont plus de 200 ans.

Par exemple, le réseau des docks fonctionne actuellement à sa pleine capacité. Des inondations se produisent ainsi régulièrement pour des événements pluviométriques d'un temps de retour de seulement un ou deux ans. Ce réseau fait donc actuellement l'objet de plusieurs études. Deux lacunes principales ont clairement été identifiées dans ce quartier : le sous-dimensionnement des canalisations ; les capacités insuffisantes des pompes de relèvement.



Figure 9.10 : Un réseau d'évacuation des eaux pluviales régulièrement dépassé (Leahy, 2009).

La situation est problématique, car tout développement dans la zone des docks contribuera à augmenter le ruissellement et par conséquent la fréquence et l'amplitude des inondations. Une étude produite en Juillet 2002 a conclu que la seule solution viable impliquait la construction d'une nouvelle station de relèvement. Cette station doit ainsi diriger directement les flux hydrauliques vers la station de Ringsend via une nouvelle canalisation passant sous la rivière Liffey.

Plus généralement, l'imperméabilisation grandissante des sols et le sous-dimensionnement des réseaux d'assainissement conduisent ceux-ci à déborder de plus en plus fréquemment : la ville inonde la ville. Le DCC, qui a conscience de ces enjeux urbanistiques, tente pour le moment d'y faire face en ayant recours à des solutions locales et techniques. L'objectif est notamment : de réduire le ruissellement à l'aide d'une végétalisation des espaces urbanisés ; de laisser les crues inonder les jardins des particuliers... A plus grande échelle, ce sont les politiques d'aménagement qui sont

questionnées. L'objectif général est alors de donner plus d'espace à l'eau. L'atténuation du ruissellement urbain passe alors par différents modes d'actions et par différentes législations mettant en œuvre des mesures préventives et curatives.

Ainsi, en matière de gestion des risques d'inondation, le DCC mène depuis une dizaine d'années une politique volontariste en multipliant les actions (Fig. 9.11). Le DCC y est simplement contraint par sa forte exposition aux inondations et sa croissance importante. Ces actions, qui peuvent sembler disjointes et désordonnées, reposent en fait sur une politique générale qui s'est structurée progressivement. La crue de Février 2002 a alors été l'événement déclencheur qui a conduit le DCC à revoir presque entièrement sa politique de gestion.

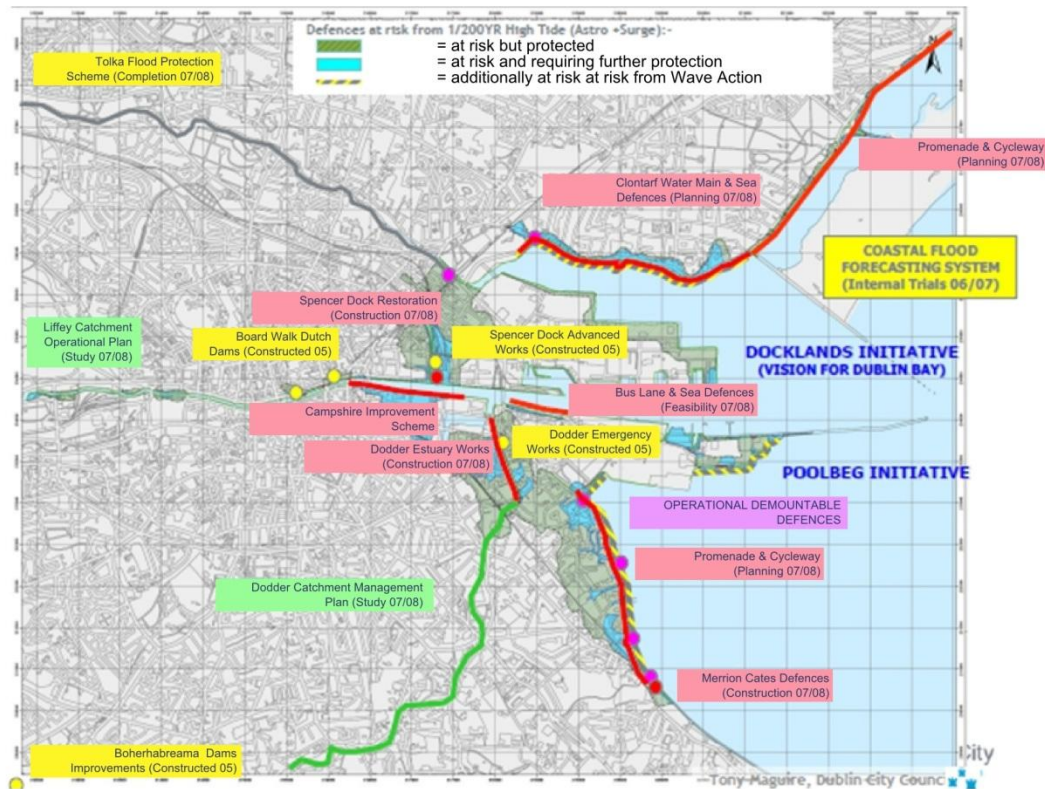


Figure 9.11 : Les principales actions menées par la ville Dublin afin de faire face aux inondations durant la période 2005-2008 (Leahy, 2009).

Dans la continuité des politiques passées, cette politique se concentre sur des stratégies de protection et sur la mise en place de systèmes de prévision et d'alerte. Les lourds investissements induits par ces stratégies ont pu être en partie financés par le développement économique important de la ville ces dernières années. Néanmoins, ces stratégies sont aujourd'hui mises en œuvre à l'échelle des différents bassins versants, afin de tenir compte du fonctionnement des différentes rivières. De plus, parallèlement à ces stratégies classiques, les gestionnaires se sont aussi interrogés sur des problématiques plus générales d'aménagement urbain, ainsi que sur la construction d'une culture du

risque chez ses administrés. Ainsi, sans totalement rompre avec les politiques passées, le DCC a adapté et diversifié ces modes de gestion.

En combinant d'une part des stratégies classiques de lutte contre les inondations et d'autre part des questions d'aménagement urbain dépassant le seul cadre des inondations, le DCC affiche clairement sa volonté de travailler à la mise en place de stratégies d'amélioration de la résilience urbaine. Les difficultés économiques récentes, qui ont déjà sérieusement entamé et ralenti les grands projets d'aménagement prévus, auront sans doute pour conséquence d'orienter les gestionnaires vers des solutions moins coûteuses et plus flexibles qui ne seront alors plus spécifiques aux inondations. Ainsi, faire de la gestion des inondations une opportunité pour construire une ville plus durable devient progressivement un leitmotiv pour les gestionnaires du DCC.

Pour mettre en place cette politique de gestion, le DCC s'est appuyé sur des partenariats. Premièrement, le DCC s'est impliqué dans plusieurs projets européens. Ainsi, le DCC a pu tirer bénéfice des connaissances d'autres villes européennes (notamment de collectivités allemandes, néerlandaises et écossaises). Deuxièmement, le gouvernement irlandais a aussi mis en place une politique de gestion des risques d'inondation qui a pour partie conforté la politique du DCC.

Ainsi, pour rendre la ville de Dublin aussi résiliente que possible aux inondations, le DCC coopère avec 10 organisations européennes spécialistes dans différents domaines : la planification urbaine, la gestion des risques d'inondation, le changement climatique, l'innovation, la compétitivité et le développement durable. Le DCC est donc rentré dans une démarche résolument transnationale d'échanges avec d'autres municipalités européennes. Dans ce cadre, le DCC collabore aussi avec des organismes de recherche. Cette démarche s'articule autour de trois projets INTERREG : SAFER, NOAH et FloodResilienCity. Selon les responsables dublinois, ces projets ont été indiscutablement bénéfiques en termes d'amélioration de la gestion des risques d'inondation.

A titre d'exemple, pour sa politique générale de gestion des risques d'inondation, le DCC s'est inspiré de l'approche définie dans le cadre du projet FloodResilienCity (FRC), qui repose elle-même sur l'approche écossaise (les 4 A : Awareness, Allaviation, Avoidance, Assistance) (Ashley et al., 2012). De plus, le système de prévision des inondations côtières, initialement conçu dans le cadre du projet SAFER, puis amélioré dans le cadre du projet FRC, est opérationnel. Le système d'alerte de la population attaché à ce système fonctionne actuellement par envoi de courriels et de SMS. Il devrait être déployé sur un portail Web dans le cadre du projet FRC.

La sensibilisation aux risques relatifs aux inondations côtières (permise par les projets INTERREG) a également donné naissance à des projets essentiels pour mieux protéger les zones côtières des inondations : comme par exemple la restauration et la construction de vannes au Spencer Dock (Fig. 9.12). Enfin, les initiatives entreprises aux Pays-Bas (notamment dans le cadre du projet « Room for the river ») contribuent d'une part à renforcer le DCC dans sa volonté de lutter contre l'imperméabilisation des sols et d'autre part à favoriser un urbanisme laissant davantage de place à ses cours d'eau.



Figure 9.12 : Les travaux effectués sur les vannes du Spencer Dock (à gauche) et les réflexions d'aménagement accompagnant ces travaux (à droite) (Leahy, 2009).

La nouvelle politique irlandaise de gestion des risques d'inondation vient quant à elle renforcer la plupart des choix stratégiques effectués par le DCC. L'objectif pour le gouvernement irlandais est de mettre en accord sa politique de gestion des risques d'inondation avec la directive européenne inondation. Le « Flood Policy Review Group », qui a été mis en place par le gouvernement irlandais, a alors défini les traits caractéristiques de cette nouvelle politique. Or, ces traits caractéristiques vont de pair avec la politique menée par le DCC : privilégier les mesures non structurales ; mettre en place des plans de gestion des risques d'inondation à l'échelle des bassins versants...

Dublin est une capitale en plein essor économique. Ce développement économique, qui s'accompagne d'une croissance démographique importante, pose certains défis techniques à la collectivité de Dublin et à l'ensemble de sa région. Ainsi, le réseau routier est saturé et le réseau d'assainissement opère à sa pleine capacité. Dans le même temps, la ville de Dublin est fortement exposée aux inondations. Dans les faits, Dublin est un « cas d'école » en matière de problématiques relatives à la gestion des inondations en milieu urbain, puisque d'une part ce territoire concentre un ensemble assez diversifié de sources d'inondations et d'autre part ce territoire doit faire face à un développement urbain continu exerçant une pression foncière importante sur les zones inondables. C'est pourquoi, le DCC mène actuellement une politique volontariste afin d'améliorer la résilience de son territoire.

9.2 LA RESILIENCE DES RESEAUX TECHNIQUES DE DUBLIN

Après avoir présenté le contexte dublinois, la méthodologie d'analyse de la résilience des réseaux techniques va être appliquée à l'aide du web-SIG développé. Premièrement, l'analyse des capacités d'absorption va permettre de mettre en exergue les principales spécificités des différents réseaux analysés. Deuxièmement, l'analyse des capacités de

résistance confronte les différents réseaux techniques à différents scénarios, tout en tenant compte des interdépendances identifiées entre ces réseaux. Enfin, l'analyse des capacités de récupération contribue à synthétiser les différents résultats. Il est ainsi possible d'analyser la résilience des réseaux techniques et plus généralement de soulever des questionnements relatifs à la résilience de la ville de Dublin face aux inondations.

9.2.1 Des caractéristiques et des réalités très différentes entre les réseaux

Les réseaux techniques analysés dans cette partie sont : le réseau d'assainissement, le réseau routier et le réseau d'électricité. Ces réseaux sont premièrement analysés indépendamment. Pour cela, des choix ont été effectués afin de modéliser ces réseaux. Il convient donc de les expliciter.

➤ *Le réseau d'assainissement*

Le réseau d'assainissement de la ville de Dublin entretient une histoire commune très ténue avec le développement de la ville. En effet, depuis le 18^{ème} siècle, le réseau d'assainissement s'est développé conjointement avec la ville. L'enjeu est en effet de taille : assurer la salubrité d'un espace urbanisé assez dense qui tend à s'étendre de plus en plus.

Au 19^{ème} siècle, la mise en place d'un système d'assainissement « moderne et viable » était devenue un impératif pour la ville de Dublin (GSDSDS, 2005 ; Corcoran, 2007). Avec le développement de la ville à la confluence de la rivière Liffey et de la mer d'Irlande, l'amélioration de la collecte des eaux usées (et bien entendu de son traitement) était devenue primordiale, puisque cette collecte influait dès lors directement sur les conditions sociales et sanitaires des habitants.

Ainsi, le système existant (qui consistait à utiliser des fosses d'aisance – nécessitant alors un entretien régulier – ainsi que des canaux ouverts pour l'évacuation des eaux de surface) était à l'origine de la contamination de la ressource en eau potable qui était elle-même à l'origine de nombreuses maladies. En effet, un mauvais système de traitement des eaux usées, combiné à la pollution de l'eau potable, provoquaient des épidémies régulières de choléra. Ainsi, tous les efforts entrepris pour approvisionner les citoyens en eau potable de qualité étaient conditionnés par le traitement de ces eaux usées (Corcoran, 2007).

Vers la fin du 18^{ème} siècle, une législation ordonna alors la création d'une autorité chargée de la propreté des rues (plutôt de la gestion de l'insalubrité) et introduisit une réglementation sur les rejets d'eaux usées. Progressivement, cette législation aboutit à la construction d'un système d'égouts couverts déversant les effluents dans la rivière Liffey. Ainsi, l'utilisation des fosses d'aisance était abolie.

Néanmoins, au milieu du 18^{ème} siècle, la population avait rapidement augmenté (augmentation engendrée notamment par le début du développement industriel et par la famine dans les zones rurales) et le système était très largement insuffisant. Ainsi, en

dehors du centre-ville, le développement du réseau d'assainissement posa de nombreux problèmes (en particulier dans les quartiers pauvres ne pouvant financer leur propre service). De plus, le rejet des eaux usées s'effectuait alors directement dans la rivière Liffey (Corcoran, 2007). Or, ces rejets étaient une source importante de pollutions (auxquelles venaient s'ajouter les pollutions industrielles). Enfin, les égouts étaient de mauvaises qualités (*i.e.* mal construits, mal dimensionnés...). C'est pourquoi, dans le même temps, les fosses d'aisance continuaient d'être utilisées.

Entre 1851 et 1880, un important réseau d'égouts fut construit. Les conduites étaient alors principalement en brique. Dans le même temps, Parke Neville (premier ingénieur à temps plein chargé du réseau d'assainissement de la ville de Dublin) souligna la nécessité de construire des intercepteurs (*i.e.* des émissaires, des grands égouts) sur les quais Nord et Sud de la rivière Liffey. L'objectif de ces intercepteurs était de diminuer la pollution de la rivière Liffey qui ne cessait de croître.

Puis, à la fin des années 1870, une commission fut spécifiquement créée afin d'étudier une série de propositions émises pour faire face aux besoins de Dublin en matière d'assainissement. Cette commission approuva les propositions émises par Parke Neville en 1879. Ces propositions, qui ont évolué au fil du temps, ont finalement abouti en 1906 à l'élaboration du principal plan d'assainissement de la ville de Dublin (« The Main Drainage Scheme »).

Ce plan fut conçu pour satisfaire une population d'environ 325 000 habitants. Il comprenait la construction d'émissaires de collecte des eaux usées le long de la rivière Liffey et un grand nombre de points de rejet dans cette même rivière. Les flux d'eaux noires étaient transportés vers l'usine de traitement des eaux usées à Ringsend. Ce plan apporta de nombreuses améliorations notamment concernant la qualité écologique de la rivière Liffey.

Les décisions prises alors vont orienter de manière définitive les politiques menées en matière d'assainissement, le réseau se développant dès lors progressivement autour de la station d'épuration de Ringsend. Ainsi, depuis 1906, cette station a été développée et élargie à plusieurs reprises pour répondre aux besoins de la région de Dublin. A un tel point qu'aujourd'hui, elle recueille la quasi-totalité des eaux usées de l'agglomération dublinoise. Depuis ce plan, d'autres grands projets ont aussi vu le jour pour faire face au développement de la ville :

- Dans les années 1950, un système d'assainissement distinct a été construit pour desservir le nord de Dublin (de Finglas à Howth). Ce système a été conçu pour satisfaire environ 265 000 utilisateurs. Les boues furent pendant longtemps éliminées en mer. En 2003, ce bassin versant a été détourné vers Ringsend via une canalisation sous-marine partant de Sutton et allant directement à Ringsend.
- Les égouts du Grand Canal, et les systèmes desservant les zones de Lucan, Clondalkin, Blanchardstown et Mulhuddart, ont été construits

dans les années 1980. Ces constructions ont alors grandement élargi le bassin versant de Ringsend.

- Le plan concernant Dún Laoghaire a été mis en œuvre dans les années 1990 afin de détourner les eaux usées vers le bassin versant de Ringsend à travers une nouvelle canalisation sous-marine.

En 2003, la station d'épuration de Ringsend a été de nouveau améliorée afin d'être en mesure de traiter les eaux usées d'environ 1,64 million d'habitants. Depuis, la station est en conformité avec la directive européenne adoptée en 1994. L'élimination des boues d'épuration en mer a alors totalement cessé à cette époque et les boues sont désormais traitées et utilisées comme engrais agricole.

Actuellement, le réseau d'assainissement rentre dans une nouvelle phase de développement. En effet, le réseau d'assainissement a fini par être progressivement centralisé autour d'une unique station de traitement (Ringsend) qui va bientôt atteindre ses limites. Or, historiquement il existait différents systèmes plus ou moins indépendants. De même, des solutions très locales existaient. La construction d'une nouvelle station de traitement devrait donc infléchir cette centralisation exacerbée.

Cet historique s'est révélé nécessaire afin de modéliser le réseau d'assainissement de la ville de Dublin (Fig. 9.13).

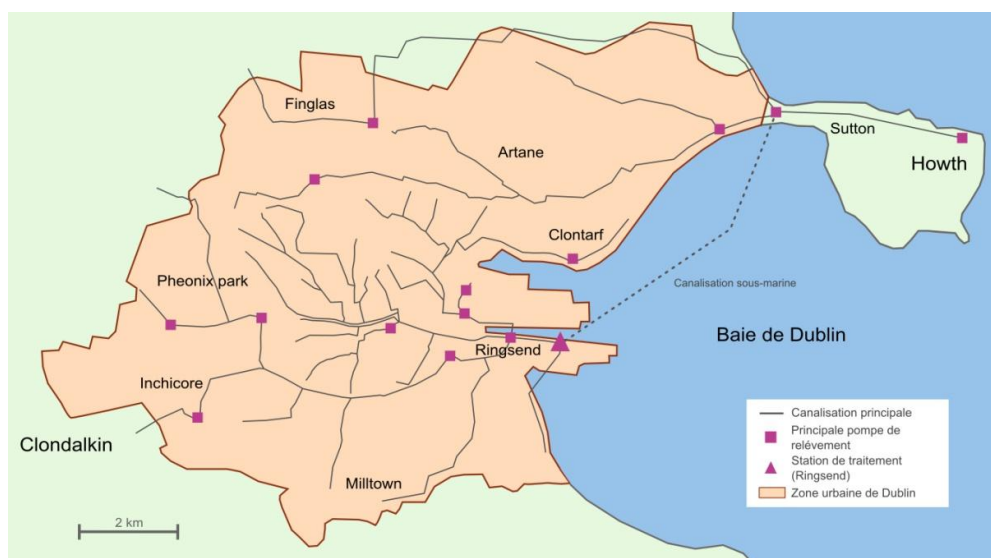


Figure 9.13 : Modélisation retenue du réseau d'assainissement. Il s'agit d'une modélisation simplifiée.

En effet, les données fournies par Dublin étaient très complètes. Or, compte tenu de la taille de cette ville, l'exploitation du jeu de données devenait peu optimale (avec des temps de calcul trop longs, des incohérences...). Cela revenait à manipuler des milliers de tronçons et nécessitait de les modéliser sous la forme d'un graphe cohérent. Il semblait ainsi plus pertinent de concentrer l'analyse sur les principales canalisations (les émissaires notamment). Ces canalisations pouvaient être extraites facilement et

l'exploitation des données devenait plus souple. Néanmoins, pour modéliser ce réseau, il fallait tenir compte des problématiques de connectivité et par conséquent de dessertes plus locales. Pour cela, il se révéla nécessaire de connaître le fonctionnement général de ce réseau qui peut être appréhendé en partie par son historique.

D'un point de vue topologique, le réseau d'assainissement est d'une redondance nulle (Fig. 9.14). En effet, ce réseau est arborescent, comme par ailleurs l'ensemble des réseaux d'assainissement. Or, comme le réseau est aujourd'hui entièrement centralisé autour d'une unique station de traitement (Fig. 9.13), la situation en termes d'absorption se révèle hautement problématique, puisque tout incident à proximité de Ringsend paralyserait presque totalement le réseau d'assainissement. Cette situation est d'autant plus problématique que la vétusté du réseau d'assainissement est attestée et requiert de considérer ce réseau comme étant très vulnérable aux inondations.

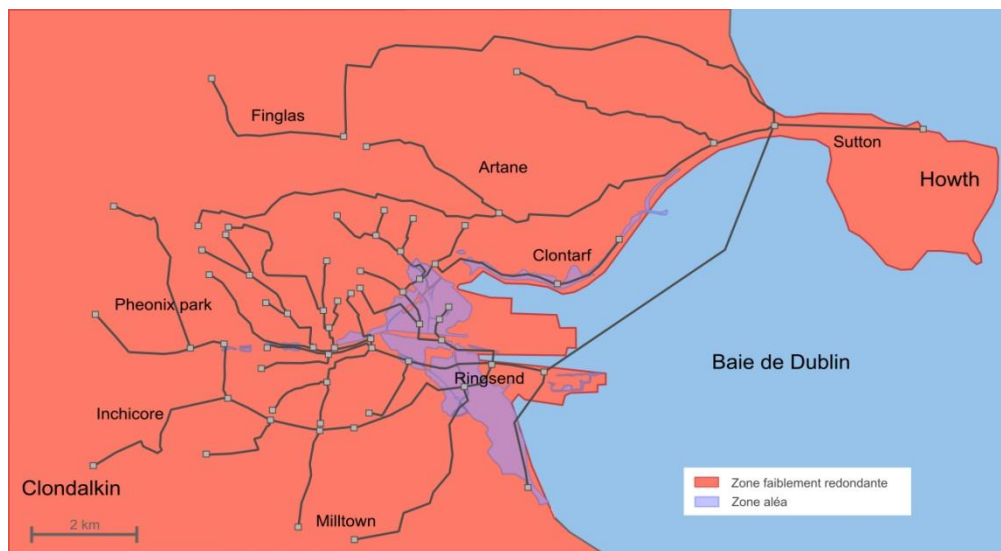


Figure 9.14 : Une redondance nulle du réseau d'assainissement et par conséquent une capacité d'absorption nulle.

➤ *Le réseau routier*

Le réseau routier existant délimite le comté de Dublin. Ainsi, l'autoroute M 50 encercle l'agglomération de Dublin et crée une distinction visible entre les comtés extérieurs à cette couronne (constituant alors le réseau routier du Grand Dublin) et le territoire interne à celle-ci (constituant alors le réseau routier de Dublin). De nombreuses autoroutes (M 1, M 2 - N2, M 3, M 4 - N 4, M 7 - N 7, M 11 - N 11, N 81) drainent les flux entre Dublin et les autres comtés de l'agglomération du Grand Dublin (Fig. 9.15).

Ce périphérique M 50 capte alors une partie importante de la circulation quotidienne de l'agglomération. A l'intérieur du périphérique, la circulation s'articule principalement autour des routes nationales qui sont pour certaines les prolongements des différentes autoroutes de l'agglomération. La modélisation se concentre particulièrement sur ces axes (Fig. 9.16). A noter qu'il existe l'équivalent d'un deuxième périphérique encerclant

cette fois-ci le centre historique de la ville de Dublin (ce périphérique comprend la route circulaire Nord et la route de Grand Canal).



Figure 9.15 : Le réseau autoroutier du Grand Dublin.



Figure 9.16 : La modélisation retenue pour l'analyse du réseau routier de Dublin

L'analyse topologique du réseau routier de Dublin révèle que celui-ci est très redondant (Fig. 9.17). A l'instar des grandes villes européennes, le maillage du réseau routier n'est donc pas responsable des congestions.

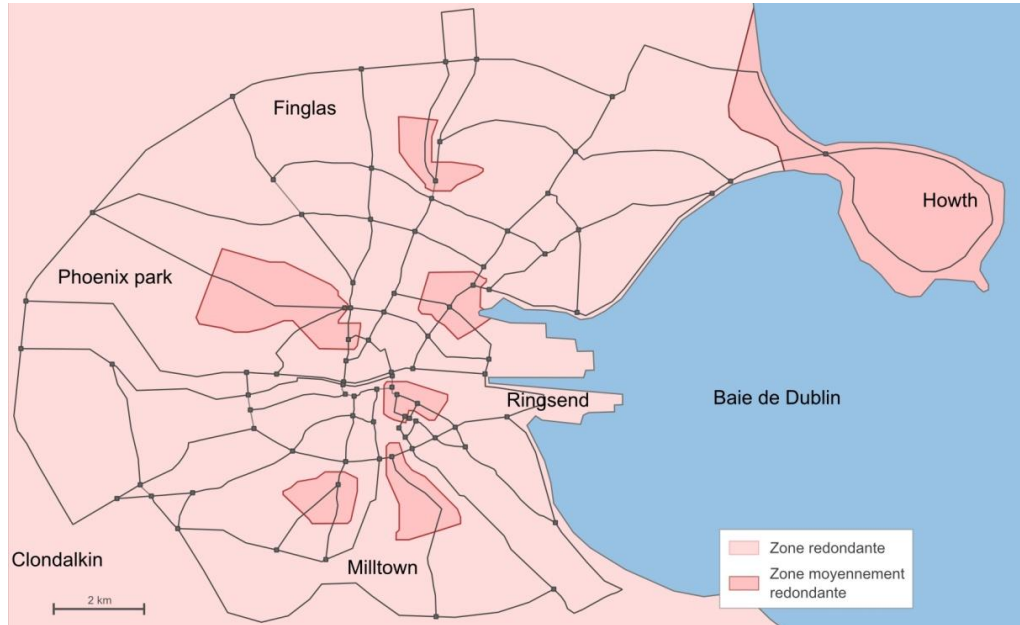


Figure 9.17 : Un réseau routier très redondant.

Ce réseau est directement exposé aux inondations. De plus, il subit les débordements récurrents induits par le sous-dimensionnement du réseau d'assainissement. Ainsi, de nombreuses rues peuvent être inondées par des crues pluviales. C'est pourquoi, le réseau routier de Dublin, qui est déjà fortement congestionné en « temps normal », peut devenir très vite saturé en période de crue, comme l'attestent les inondations de 2011 (Leahy, 2011) (Fig. 9.18).



Figure 9.18 : Un réseau routier vite submergé par les inondations (DCC, 2011).

Ainsi, les voyageurs censés se rendre à l'aéroport de Dublin étaient expressément conviés à vérifier au préalable si leurs itinéraires étaient praticables. De plus, malgré l'envoi de nombreuses pompes, une partie du périphérique – pourtant si importante pour le fonctionnement de l'agglomération – a été fermée pendant plus de 24h. Plus généralement, d'importantes perturbations ont été enregistrées sur les autoroutes M 1 et M 7 (plus d'une heure de retard sur un trafic déjà surchargé en temps normal).

Dans les faits, le fonctionnement du réseau routier dublinois est fortement conditionné par le fonctionnement du réseau d'assainissement en période de crue. Cette dépendance exacerbée a conduit à ne pas inclure ce réseau par la suite dans l'analyse des interdépendances, puisque l'outil peut difficilement rendre compte de cette particularité.

➤ *Le réseau électrique*

Le premier système d'approvisionnement public en électricité d'Irlande fut créé à Dublin dans les années 1880. Cette apparition est plutôt tardive en comparaison à des villes comme Paris, Londres ou encore Vienne. Dès 1888, la municipalité de Dublin prit la décision d'assurer la gestion et le développement de ce réseau, puisque les différents propriétaires, qui se succédèrent, furent très contestés. Une première station d'alimentation fut alors construite à Fleet Street et a commencé à fonctionner dès 1892. Dans la continuité de Dublin, d'autres villes irlandaises commencèrent aussi à mettre en place leur propre réseau d'électricité (Combes & O'Shea, 2011).

Pour faire face à l'augmentation de la demande en électricité, de nouvelles stations d'alimentation – fonctionnant au charbon – furent construites à Poolbeg et à Pigeon House en 1903. Ces stations fonctionnent toujours au charbon. Ce charbon est importé par bateau, ce qui explique pourquoi ces stations sont localisées dans le port de Dublin.

Après l'indépendance irlandaise, un plan fut mis en place par le gouvernement (1922) afin de construire un réseau électrique moderne. En effet, le réseau électrique était alors très segmenté. Ce plan avait donc pour objectif de rattraper le retard du pays en la matière (vis-à-vis d'autres états européens). Ce fut aussi l'occasion pour le nouveau gouvernement d'afficher au monde sa récente souveraineté. Ce projet très ambitieux constitue encore aujourd'hui le plus grand projet de génie civil de l'histoire irlandaise (Combes & O'Shea, 2011). Ce plan reposait sur la construction d'un réseau national alimenté principalement par une station hydroélectrique construite sur la rivière Shannon. Les coûts d'investissement étant tellement lourds, le gouvernement accorda le contrat de construction de la station hydroélectrique à la société allemande Siemens (www.esb.ie).

En 1925, le gouvernement créa le Electricity Supply Board (ESB) (O'Sullivan, 1996). En effet, la station hydroélectrique de Shannon se révéla très vite insuffisante pour alimenter en électricité toute l'Irlande et de nombreuses autres stations furent construites à travers tout le pays. Un générateur fut notamment construit à Leixlip (ville située à l'ouest de Dublin). Or, le gouvernement eut recours à de nombreuses sociétés privées pour construire ces différentes infrastructures. On comptait alors pas moins de 300

sociétés différentes. L'ESB fut donc créé afin d'assurer la cohérence du réseau au niveau national. Comme la demande continuait à augmenter une nouvelle station fut construite à Dublin (North Wall) en 1951.

Plus récemment, afin de se conformer à la législation européenne en vigueur, concernant la libéralisation du marché de l'énergie, le gouvernement a créé la société Eirgird. L'ESB assure aujourd'hui la maintenance du réseau de Eirgird. Eirgird est donc actuellement en charge des plans de développement du réseau qui permettront à l'Irlande, et à Dublin en particulier, de faire face à la demande future.

Quoi qu'il en soit, le réseau électrique de Dublin est plutôt bien maillé (Fig. 9.19). En effet, son port assure un approvisionnement en charbon efficace des stations d'alimentation des docks. Au sud, une station hydroélectrique a été construite à Pollaphuca dans les montagnes de Wicklow. Enfin, des stations de transformation comme Inchicore et Maynooth (à l'est) ou encore Finglas (au nord) sont essentielles afin d'assurer la connexion du réseau de la ville de Dublin au reste du réseau du pays. Pour modéliser ce maillage, il a alors semblé pertinent de se focaliser sur le réseau haute-tension.

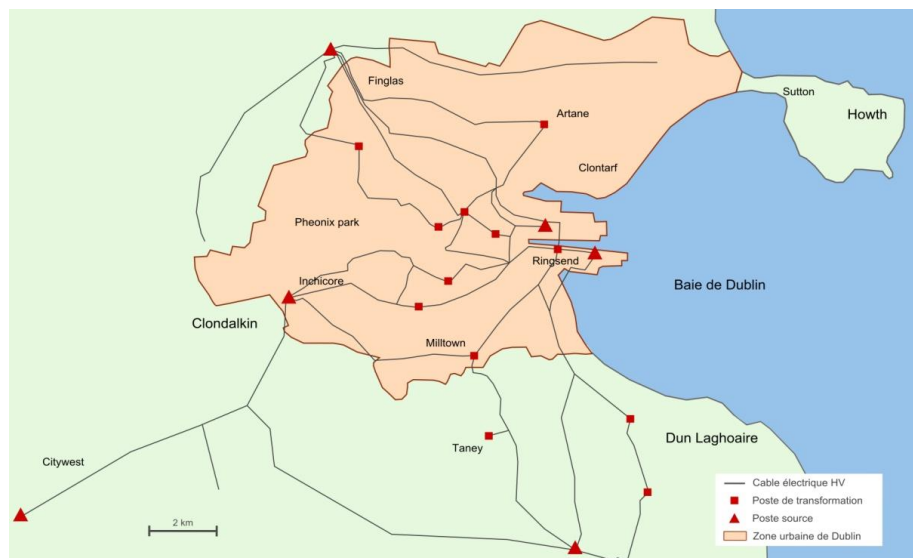


Figure 9.19 : La modélisation retenue du réseau électrique haute tension de Dublin.

L'analyse de la redondance de ce réseau fait apparaître cette configuration plutôt maillée (Fig. 9.20). Néanmoins, il est possible d'identifier des parties moins redondantes, comme par exemple les nœuds pendants. Ces nœuds pendants peuvent être des stations d'approvisionnement, ce qui ne pose alors pas de problème puisque celles-ci sont autosuffisantes (North Wall). De plus, cette analyse fait aussi apparaître les points d'interconnexion situés dans le centre-ville de Dublin comme peu redondants, voire comme très peu redondants. En effet, la rivière Liffey constitue une barrière naturelle entre une « partie nord » potentiellement alimentée depuis Fingal et une « partie sud » potentiellement alimentée depuis Inchicore ou Carrickmines. Si la rupture de l'interconnexion entre la partie nord et la partie sud n'est pas en soi problématique,

puisque chaque partie peut être alimentée indépendamment, cette configuration souligne une certaine vulnérabilité du réseau, l'interconnexion étant de surcroît située en zone inondable (Fig. 9.20). Néanmoins, la principale problématique concerne l'isolement probable des stations d'alimentation de Poolberg, ShellyBank et IrishTown situées dans le quartier de Ringsend en cas d'inondation. En effet, cet isolement conduirait à une reconfiguration importante de l'approvisionnement en électricité pouvant se révéler fortement problématique (Fig. 9.21).

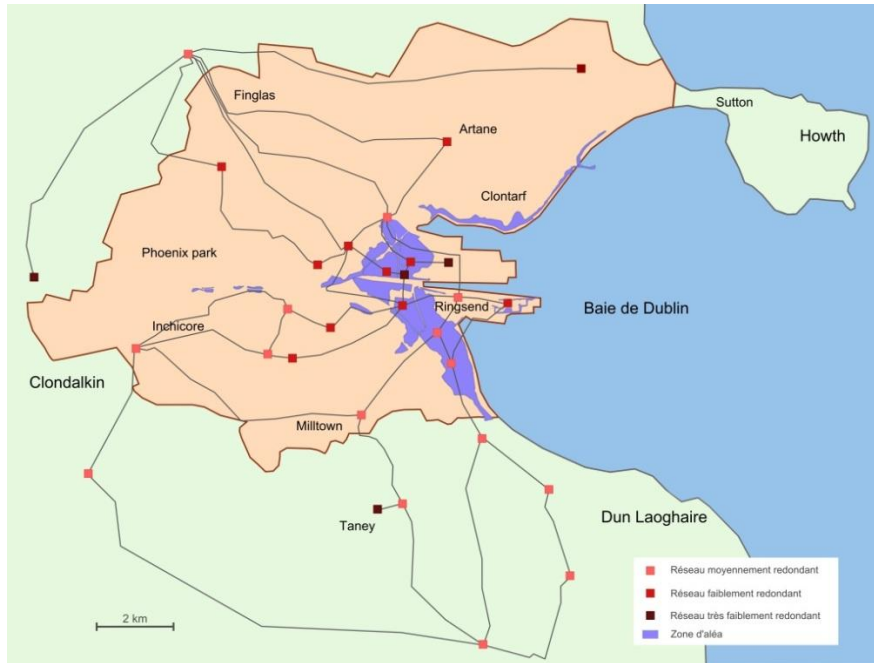


Figure 9.20 : La redondance du réseau électrique.

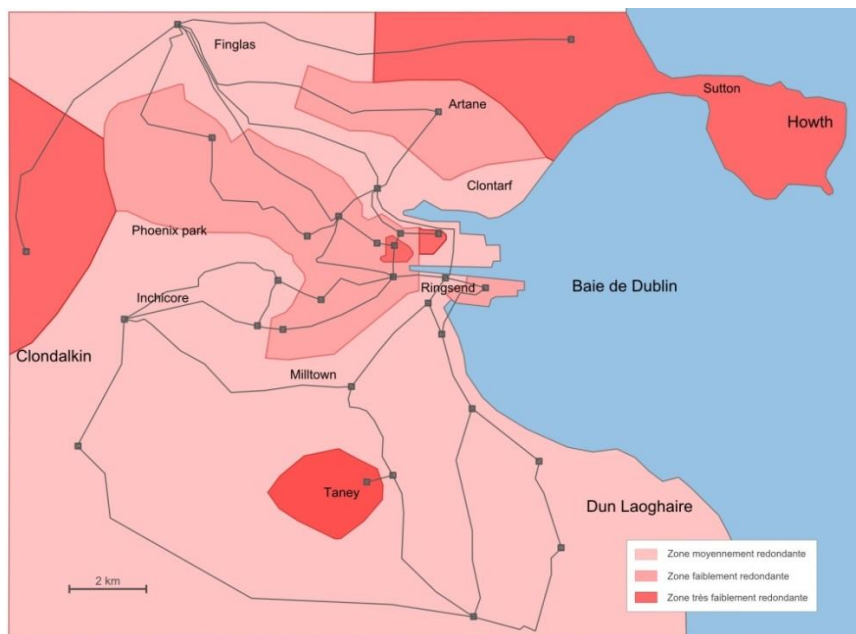


Figure 9.21 : Les zones de redondance du réseau électrique.

Les inondations de 2011 ne laissent pas entrevoir ce scénario catastrophe. En effet, les gestionnaires du réseau électrique semblent bien appréhender ces problématiques et il n'a été aucunement question de *blackout* durant ces inondations. De plus, au niveau national, un tel événement est jugé comme improbable. Néanmoins, près de 1 200 personnes étaient privées d'électricité le 27 Octobre 2011 consécutivement à des coupures préventives. De plus, ces coupures ont pu toucher des infrastructures essentielles pour la vie quotidienne des Dublinois. Ainsi, le Merrion shopping Center s'est vu privé d'électricité pendant plusieurs jours pour des raisons de sécurité.

9.2.2 Les réseaux face aux inondations : des scénarios fortement problématiques

Après avoir analysé les différents réseaux techniques indépendamment, en se focalisant sur leur capacité d'absorption, il est pertinent d'analyser plus précisément comment ces réseaux sont amenés à faire face à des inondations. Pour cela, il est nécessaire de prendre en compte leurs interdépendances. Autrement dit, il s'agit ici d'analyser les capacités de résistance de ces réseaux pour identifier les endommagements causés par des inondations, puis pour évaluer les conséquences induites par ces endommagements. En l'occurrence, il s'agit de se focaliser ici sur deux réseaux : le réseau électrique et le réseau d'assainissement.

Premièrement, cette analyse est effectuée à partir d'un aléa d'origine : une inondation côtière bicentennale (probabilité de 1/200 de se produire chaque année). En effet, compte tenu des effets probables du changement climatique, les inondations côtières mobilisent en partie l'attention des gestionnaires dublinois. C'est pourquoi, une modélisation précise de cet aléa est disponible. De plus, cet aléa touche une partie du centre-ville historique de Dublin, ce qui préoccupe énormément les gestionnaires.

Deuxièmement, si les informations géographiques sont disponibles pour les deux réseaux analysés, ces données ne contiennent pas d'information sur l'état (en l'occurrence sur la vulnérabilité aux inondations) des composants de ces réseaux. C'est pourquoi, il est nécessaire d'émettre des hypothèses afin de simuler les conséquences éventuelles d'une crue côtière bicentennale sur les réseaux techniques. Les hypothèses les plus pertinentes ont alors été regroupées. Ainsi, elles ont donné naissance à deux scénarios. Le premier scénario sera considéré comme le scénario « principal », car il s'appuie directement sur les retours d'expérience des inondations passées. Le second scénario sera considéré comme le scénario « alternatif », car il s'appuie sur une analyse critique du premier scénario et sur une connaissance générale de la vulnérabilité des réseaux techniques aux inondations.

➤ *Le scénario principal fondé sur les inondations passées à Dublin*

Les hypothèses émises pour ce scénario sont les suivantes :

- Le réseau d'assainissement étant connu pour sa vétusté, il semble logique de considérer les composants de ce réseau (de la canalisation à la pompe de relevage) comme étant très vulnérables aux inondations ;
- Le réseau électrique, pour lequel peu d'informations sont disponibles concernant l'état actuel de ses composants et dont les retours d'expérience ne révèlent pas une vulnérabilité particulière, sera considéré comme étant dans un bon état et par conséquent peu vulnérable.

A partir de ces deux hypothèses, l'analyse devient possible. Cette analyse aboutit alors à une situation binaire. Ainsi, le réseau d'assainissement est amené dans ce scénario à subir des dommages importants (Fig. 9.22) tandis qu'au contraire le réseau électrique ne subit aucun dommage. Ainsi, tous les composants du réseau d'assainissement qui sont directement en contact avec l'inondation sont considérés comme endommagés. En revanche, aucun composant du réseau électrique situé en zone inondable n'est amené à subir de dommages. Ces résultats sont la conséquence directe des hypothèses émises et peuvent donc être considérés comme faisant partie intégrante du scénario initial.

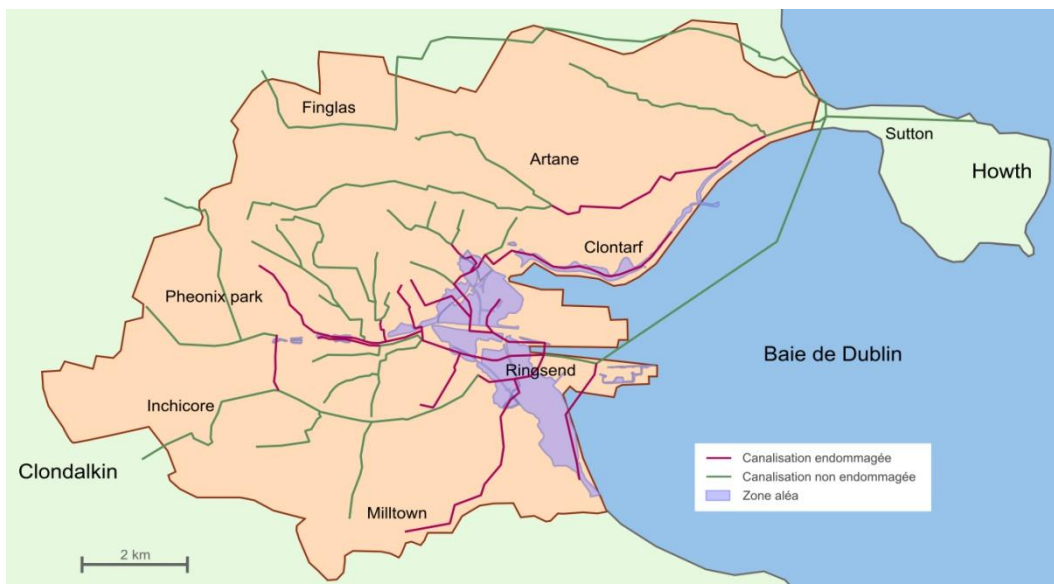


Figure 9.22 : Les endommagements consécutifs à une inondation côtière bicentennale sur le réseau d'assainissement d'après le scénario principal.

Dans un second temps, il convient d'analyser comment les réseaux réagissent face à ces endommagements potentiels, tout en tenant compte des interdépendances pouvant exister entre les deux réseaux analysés. Une nouvelle fois, cette analyse aboutit à une situation binaire. Elle souligne même davantage l'opposition entre d'une part un réseau d'assainissement fortement perturbé et d'autre part un réseau électrique qui fonctionne normalement. En effet, le réseau d'assainissement, qui est structuré de manière arborescente, n'est pas en mesure de pouvoir faire face aux endommagements identifiés.

Ainsi, des composants endommagés sont localisés à proximité de la station de traitement de Ringsend (Fig. 9.23). Par conséquent, les dysfonctionnements induits par ces endommagements perturbent une grande partie du réseau d'assainissement qui dépend directement du fonctionnement de ces composants (Fig. 9.24). Quel que soit l'indicateur choisi pour simuler le fonctionnement de ce réseau, les résultats sont identiques.

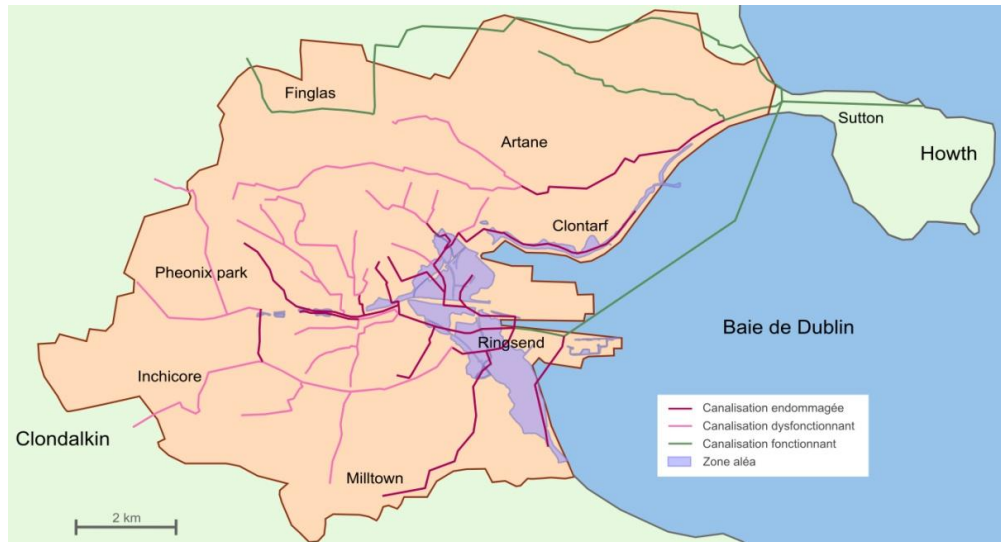


Figure 9.23 : Endommagements et dysfonctionnements consécutifs à une inondation côtière (bicentennale) sur le réseau d'assainissement d'après le scénario principal.

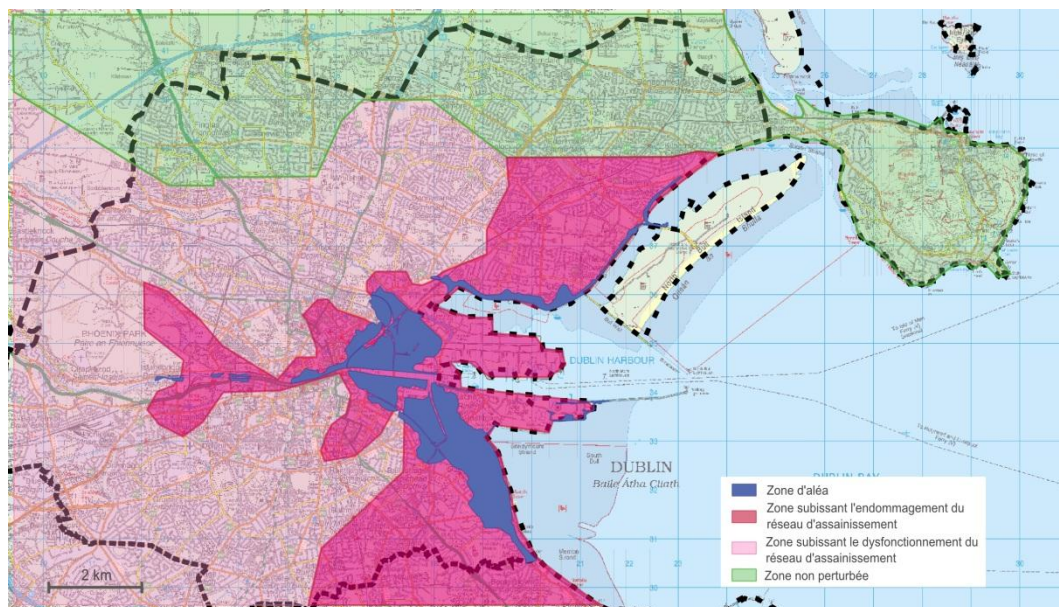


Figure 9.24 : Le territoire de Dublin face aux dysfonctionnements du réseau d'assainissement consécutifs à une inondation côtière bicentennale d'après le scénario principal.

Dans ce scénario, le réseau électrique, qui est peu sensible aux endommagements et aux dysfonctionnements du réseau d'assainissement, ne devrait pas subir de dysfonctionnements particuliers. Bien sûr, les dysfonctionnements du réseau

d'assainissement ne sont pas sans conséquence pour le réseau électrique. Néanmoins, compte tenu des hypothèses faites sur l'état du réseau électrique et de sa localisation par rapport aux endommagements du réseau d'assainissement, l'analyse conclut que ces dysfonctionnements seraient sans conséquence.

Enfin, pour synthétiser ces résultats, il est possible d'analyser les conséquences de ces endommagements pour les territoires qui les supportent. Ainsi, le réseau électrique, qui fonctionne normalement, continue logiquement à desservir en électricité la totalité du territoire. Au contraire, le réseau d'assainissement n'est plus en mesure d'assurer son fonctionnement pour une partie importante du territoire (Fig. 9.24).

➤ *Le scénario alternatif fondé sur une connaissance plus générale de la vulnérabilité des réseaux*

Les hypothèses émises pour ce scénario sont les suivantes :

- Le réseau d'assainissement est certes connu pour sa vétusté, mais il peut sembler improbable que tous les éléments de ce réseau soient endommagés par le simple contact avec l'inondation. En effet, certains éléments sont plus vulnérables que d'autres. Il convient donc de différencier les éléments vulnérables en fonction de leurs caractéristiques. Par exemple, dans ce scénario, les pompes de relevage sont jugées plus vulnérables que les canalisations.
- Le réseau électrique, quel que soit son état, est très sensible aux inondations. Les gestionnaires sont alors souvent amenés à couper provisoirement de manière préventive les parties de ces réseaux directement exposées aux inondations. L'objectif est ainsi de limiter les dommages sur ces infrastructures. C'est pourquoi, dans ce scénario, le réseau électrique sera jugé très vulnérable.

Dans un premier temps, les résultats de ce scénario diffèrent amplement des résultats du scénario précédent. En effet, d'après les hypothèses retenues, le réseau électrique subit de forts endommagements (Fig. 9.25). Néanmoins, il faut nuancer ce premier résultat, puisque les composants endommagés sont en réalité mis hors-service pour justement prévenir ces endommagements. Quoi qu'il en soit, le réseau électrique apparaît segmenté suite à l'inondation. Le réseau d'assainissement subit quant à lui beaucoup moins de dommages que dans le scénario précédent. Ainsi, seules deux pompes de relevage peuvent potentiellement être endommagées. Les nouvelles hypothèses de départ semblent donc contredire la première analyse.

Dans un deuxième temps, quelles sont les conséquences de ces endommagements si l'on tient compte des interdépendances entre les deux réseaux ? Compte tenu de son maillage et du positionnement géographique des postes sources, le réseau électrique ne devrait pas subir de forts dysfonctionnements. Les dysfonctionnements de ce réseau se limitent alors aux parties pouvant être coupées préventivement (Fig. 9.25). En revanche, la situation est beaucoup plus préoccupante pour le réseau d'assainissement. En effet,

l'endommagement des pompes de relevage est loin d'être sans conséquence pour ce réseau à la structure arborescente (Fig. 9.26). De plus, le réseau électrique, qui est très agressif envers les autres réseaux techniques, perturbe ici fortement le réseau d'assainissement. Ainsi, la pompe de relevage, située un peu en amont de la station de traitement de Ringsend, est menacée par les perturbations du réseau électrique. Or, une partie importante du réseau d'assainissement dépend de cette pompe de relevage. Finalement, les perturbations provoquées par le réseau d'électricité sur le réseau d'assainissement se révèlent être très problématiques.

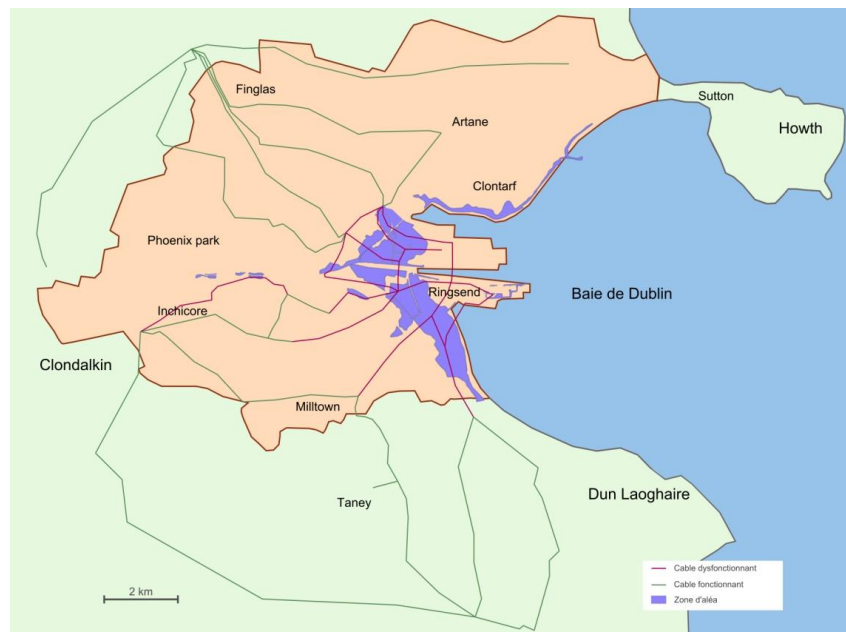


Figure 9.25 : Les parties du réseau électrique en contact avec l'eau ne fonctionnent plus dans le scénario alternatif.

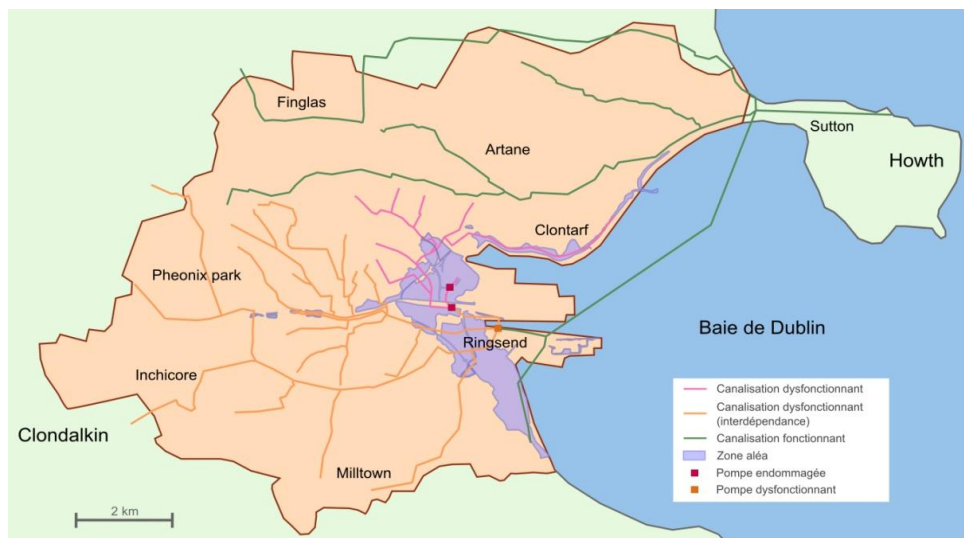


Figure 9.26 : Malgré des hypothèses plutôt favorables, en ce qui concerne la résistance du réseau d'assainissement, ce réseau est fortement perturbé par le scénario alternatif.

Une nouvelle fois, le dysfonctionnement du réseau d'assainissement (Fig. 9.27) affecte une plus grande partie du territoire que le réseau électrique (Fig. 9.28). Plus précisément, ce sont les dysfonctionnements liés à la dépendance du réseau d'assainissement envers le réseau électrique qui en sont la cause (Fig. 9.27).

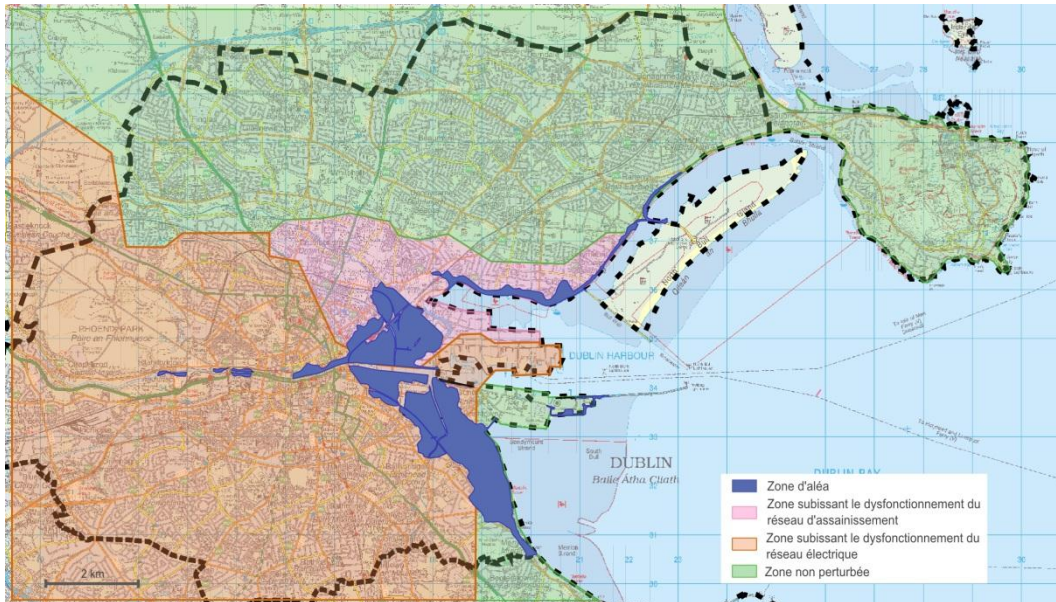


Figure 9.27 : Des dysfonctionnements importants induits par la dépendance du réseau d'assainissement envers le réseau électrique.

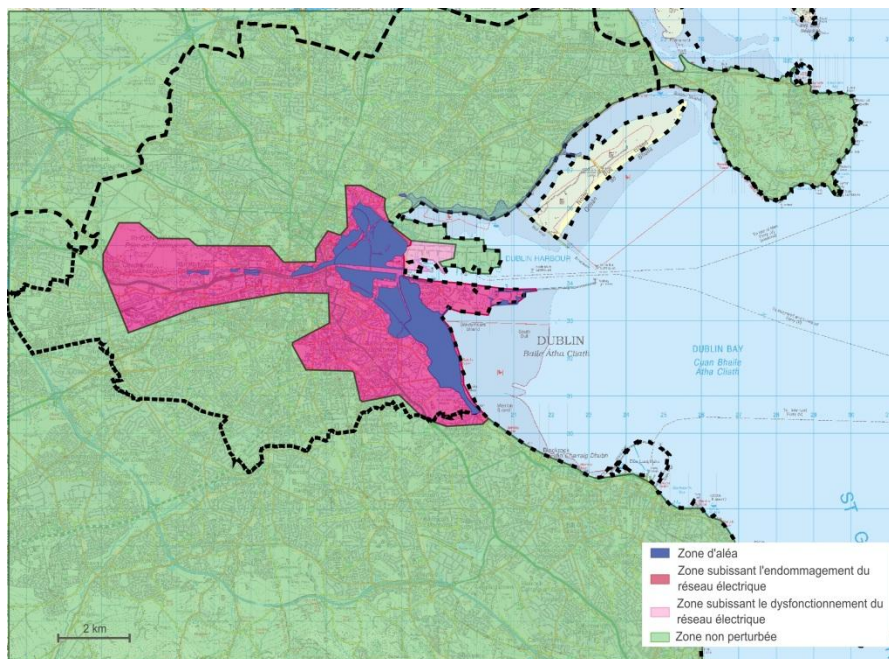


Figure 9.28 : Les dysfonctionnements du réseau électrique dans le scénario alternatif.

9.2.3 D'une analyse des capacités de récupération des réseaux techniques à une analyse de la résilience urbaine

Compte tenu des différents endommagements identifiés dans la partie précédente, il semble approprié de se focaliser sur le réseau d'assainissement afin d'analyser ses capacités de récupération, puisque ce réseau concentre les endommagements induits par une inondation côtière bicentennale. Plus précisément, il convient de se focaliser sur le scénario principal qui engendre un endommagement important du réseau d'assainissement dont la remise en service semble alors complexe à analyser.

Le DCC, qui gère le réseau d'assainissement de la ville de Dublin, dispose de plusieurs centres en charge de son fonctionnement. Ainsi, le centre administratif regroupe à la fois du personnel administratif et technique auquel peut être associé le dépôt de Marrowbone Lane et son centre de télédétection. De plus, les pompes de relèvement de Clontarf, de Vernon et de Ringsend disposent de personnels sur site, comme la station d'épuration de Ringsend et un dépôt à Bonnow Road (Fig. 9.29).

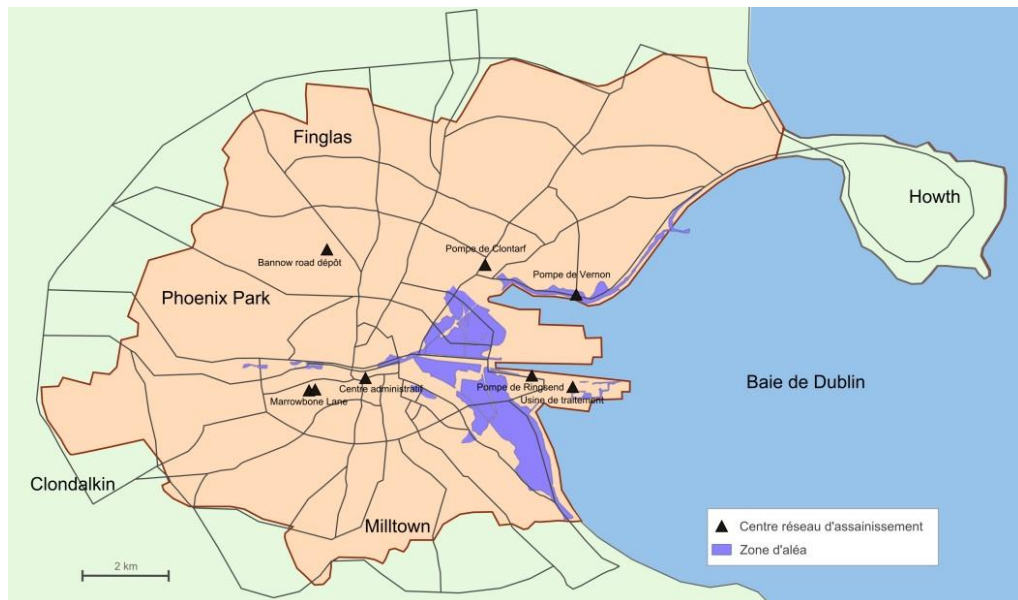


Figure 9.29 : Les centres du DCC (et leurs dépôts) en charge du réseau d'assainissement.

Afin d'analyser la remise en service du réseau d'assainissement, il a été convenu de ne retenir que certains centres. En effet, certains centres sont situés en zone inondable (pompe de Clontarf) tandis que d'autres sont très spécialisés dans des domaines n'ayant pas un rapport direct à la maintenance du réseau (comme le centre de télédétection de Marrowbone Lane) bien que ces derniers puissent servir pour la gestion et l'optimisation de la remise en service. De plus, des centres seront sans doute focalisés sur le fonctionnement d'une infrastructure particulière dont ils ont spécifiquement la charge. Par exemple, le centre qui est en charge du fonctionnement de la station de Ringsend se concentrera sur la protection et la maintenance de cette infrastructure. La situation est en

revanche plus ambiguë concernant le centre de maintenance de la pompe de relevage située à Ringsend. Ainsi, bien que ce centre soit focalisé sur la maintenance et la sécurisation de cette pompe essentielle pour le fonctionnement d'une partie du réseau, ce centre pourrait être amené à participer à la maintenance d'autres ouvrages.

C'est pourquoi, deux cas ont été analysés : un cas considère que trois centres peuvent être amenés à intervenir pour la remise en service du réseau d'assainissement (le centre de la pompe de Ringsend est alors exclu de l'analyse) ; l'autre cas considère que quatre centres peuvent être amenés à intervenir pour la remise en service du réseau d'assainissement (le centre de la pompe de Ringsend est alors inclus dans l'analyse). De plus, ces deux cas sont soumis aux mêmes hypothèses de calcul. Ainsi, les quatre caractéristiques retenues pour analyser la remise en service (Chap. 7) sont pondérées selon la même pondération. Aucune caractéristique n'est alors spécialement mise en avant pour analyser la remise en service.

Concernant le premier cas, l'analyse fait émerger une situation facilement interprétable. Cette situation apparaît très problématique. Ainsi, si les ouvrages endommagés, situés à proximité des centres de remise en service, voient leur maintenance favorisée (ces remises en service ne devraient donc pas poser de problème), les ouvrages endommagés situés à proximité de Ringsend (qui sont isolés par la zone inondée des centres de remise en service) voient leur rétablissement rapide fortement questionné (Fig. 9.30). Or, comme une grande partie du réseau dépend du fonctionnement de ces ouvrages situés à proximité de Ringsend, la remise en service du réseau d'assainissement peut être jugée problématique pour une grande partie du territoire dublinois (Fig. 9.31).

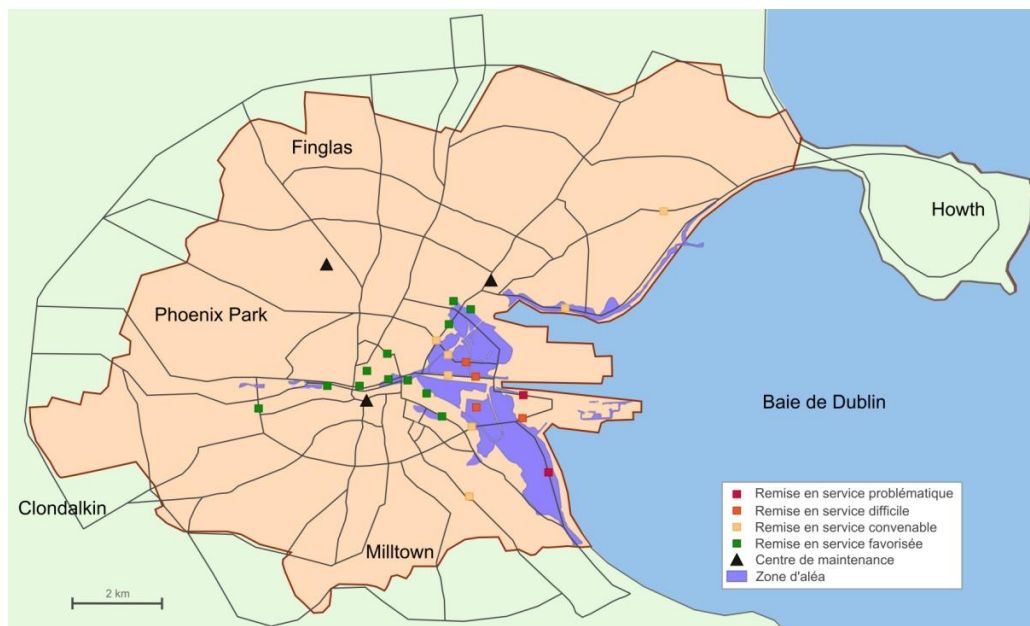


Figure 9.30 : Les endommagements sur le réseau d'assainissement classés en fonction de leur remise en service (avec 3 centres de remise en service).

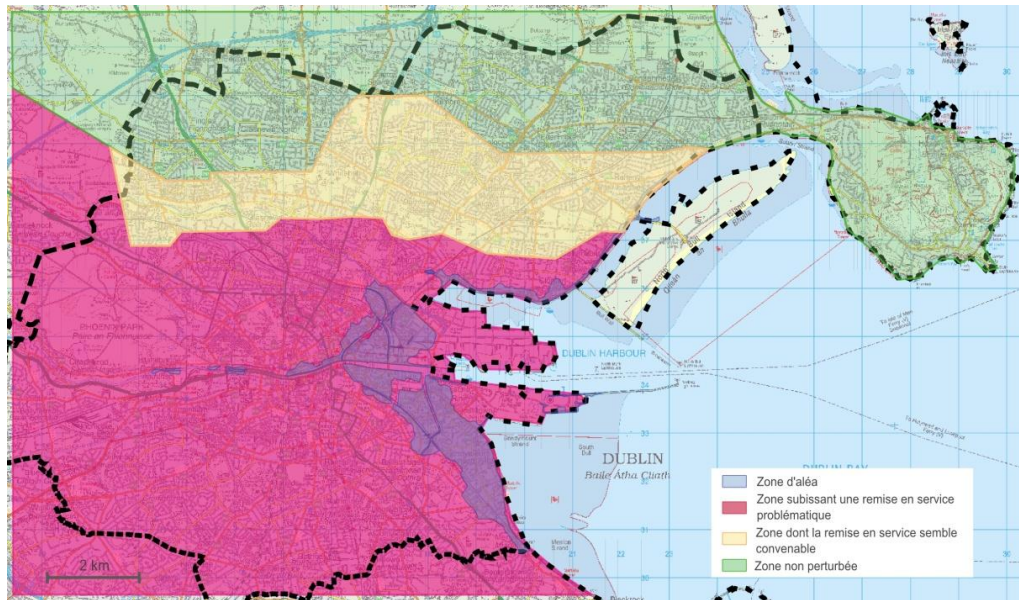


Figure 9.31 : La remise en service du réseau d'assainissement pour le territoire dublinois (avec 3 centres de remise en service).

Le deuxième cas fait apparaître une situation plus difficile à interpréter. Ainsi, si les ouvrages endommagés les plus problématiques en termes de remise en service sont localisés au centre de la zone inondable (*i.e.* dans la zone apparaissant la moins accessible), d'autres résultats apparaissent plus surprenants (Fig. 9.32).

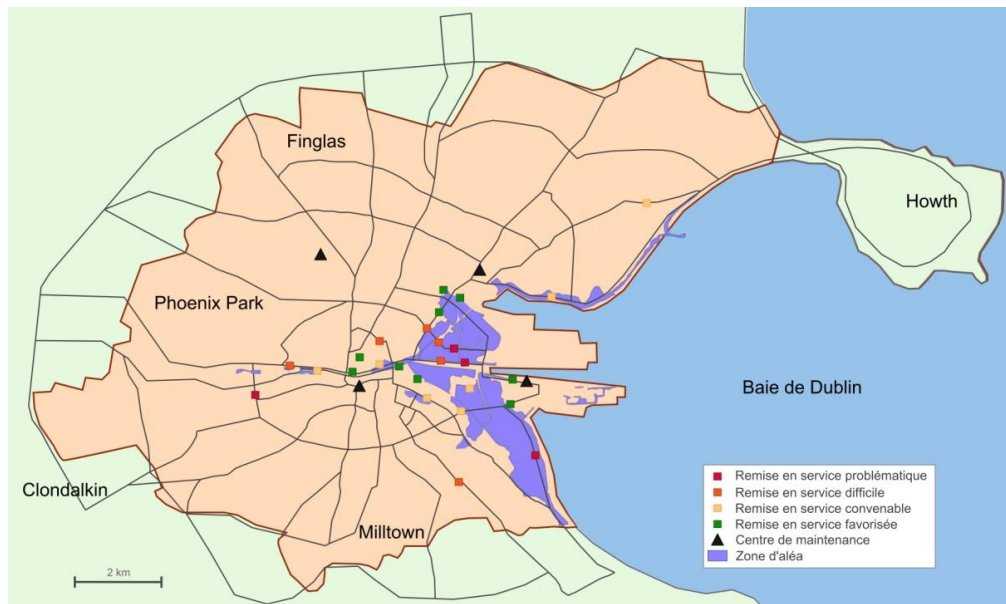


Figure 9.32 : Les endommagements sur le réseau d'assainissement classés en fonction de leur remise en service (avec 4 centres de remise en service).

Par exemple, le rétablissement des ouvrages endommagés situés les plus à l'ouest est jugé problématique, alors même que le centre de remise en service le plus proche n'est

pas très éloigné. De plus, l'inondation dans cette zone peut être qualifiée de résiduelle. Néanmoins, dans ce cas précis, l'identification des positions optimales des centres de remise en service remet fortement en question la localisation de certains centres. Ainsi, le centre de remise en service situé au nord-ouest de Dublin est très mal localisé, ce qui pénalise fortement la remise en service des ouvrages endommagés situés les plus à l'ouest. Finalement, les impacts pour le territoire sont plus diversifiés que dans le premier cas (Fig. 9.33).

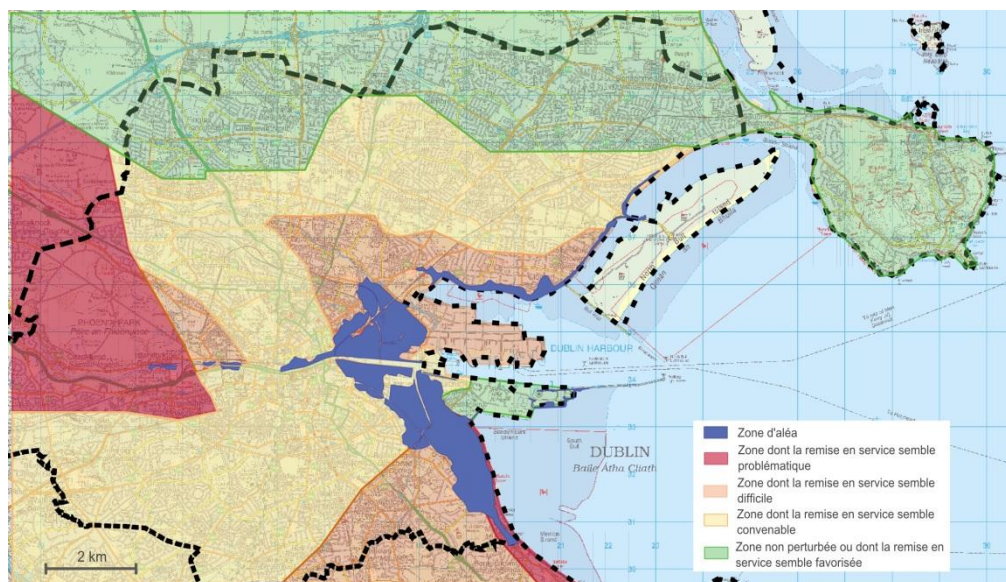


Figure 9.33 : La remise en service du réseau d'assainissement pour le territoire dublinois (avec 4 centres de remise en service considérés).

C'est à partir de ces résultats que les synthèses finales (qui synthétisent les analyses des trois capacités) ont été effectuées. En effet, ces derniers résultats permettent de mieux différencier le territoire dublinois en termes de remise en service. Ainsi, il convient de synthétiser au mieux les résultats obtenus pour le réseau d'assainissement (seul réseau dont les trois capacités ont fait l'objet d'analyses) afin d'obtenir des cartes synthétiques à partir desquelles la répartition de certains enjeux majeurs pourra être analysée.

Premièrement, le réseau d'assainissement présente une redondance nulle. Cette caractéristique n'intervient donc pas dans cette synthèse, puisqu'elle ne permet pas d'identifier des zones plus ou moins résilientes.

Deuxièmement, l'analyse des capacités de résistance permet uniquement de différencier la partie nord de Dublin, car elle est la seule partie de Dublin dont le système d'assainissement devrait fonctionner durant l'inondation (selon les deux scénarios). Cette partie nord de Dublin peut être associée avec le quartier de Ringsend qui fait l'objet d'une protection particulière afin de protéger la station d'épuration et les usines de production d'électricité. Même si dans ce quartier le réseau d'assainissement peut dysfonctionner, la remise en service devrait être rapide. En ce qui concerne la plus grande partie de ville Dublin, les zones de résilience ne peuvent être différenciées que par

l'analyse de la remise en service du réseau d'assainissement. Autrement dit, les cartes de remise en service du réseau d'assainissement peuvent servir de cartes synthétiques.

Dans ce cas précis, c'est donc à partir des cartes qui évaluent les capacités de récupération du réseau d'assainissement que les enjeux majeurs du territoire peuvent être réintroduits pour analyser plus largement la résilience du territoire étudié. Dans ce mémoire, cette partie ne sera pas développée de manière exhaustive, car elle soulève des questions qui dépassent le cadre de cette recherche. Quels sont les facteurs qui définissent un enjeu majeur ? Quels sont les facteurs qui perturbent directement ces enjeux majeurs ? Si cette recherche n'a pas pour objectif de déterminer la résilience urbaine, elle contribue néanmoins à mettre en place une méthodologie qui permet d'en évaluer les contours (Chap. 3). C'est en tout cas ce qu'il convient de montrer maintenant.

Ainsi, les répartitions de certains enjeux majeurs « reconnus » et de certains enjeux caractéristiques d'une capitale ont été analysées. Plus précisément, les analyses concernant la répartition des casernes de pompiers et des hôpitaux (Fig. 9.34) mettent en exergue des questionnements autour d'enjeux majeurs « reconnus » en matière de gestion des risques d'inondation, tandis que les analyses concernant la répartition des ambassades (Fig. 9.35) et des ministères soulignent des enjeux caractéristiques propres à une capitale.

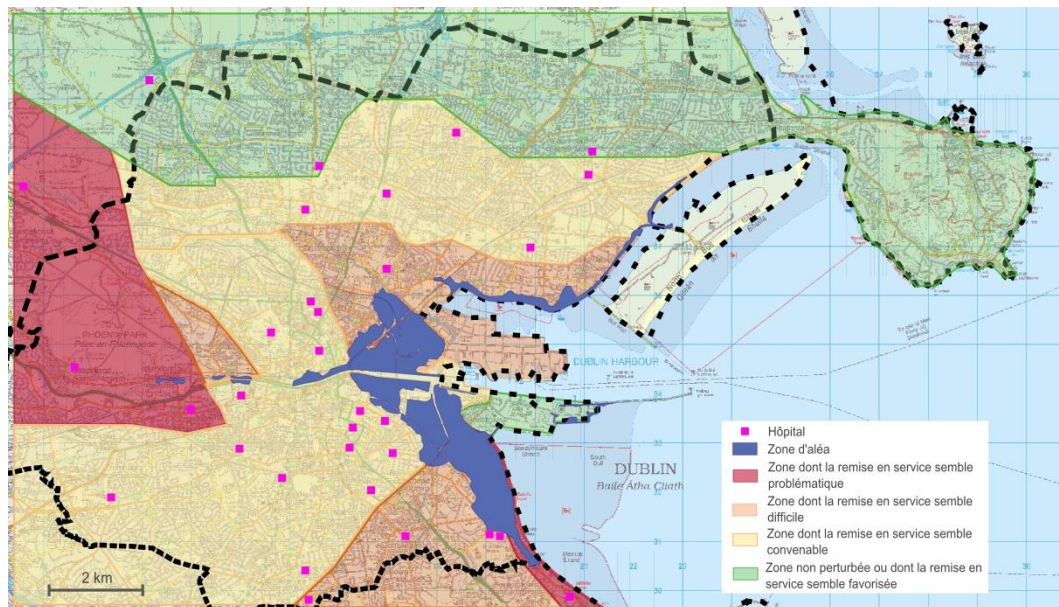


Figure 9.34 : La répartition des hôpitaux et la résilience du réseau d'assainissement.

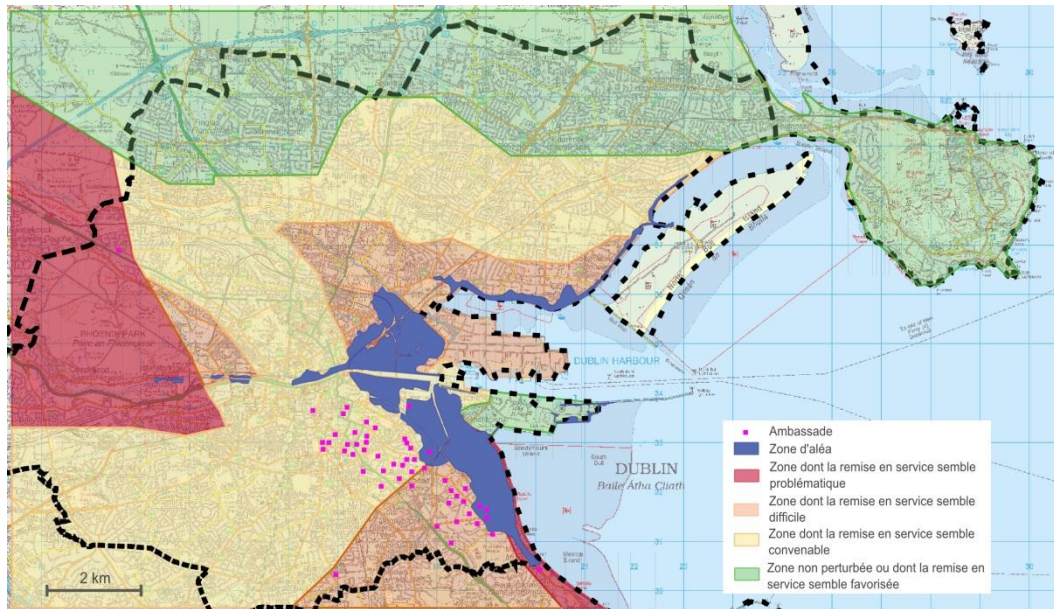


Figure 9.35 : La répartition des ambassades et la résilience du réseau d'assainissement.

Il ressort que si les différents enjeux analysés se concentrent globalement en dehors des zones les moins résilientes du point de vue du réseau d'assainissement, peu de ces enjeux seront épargnés par les dysfonctionnements de ce réseau (Tab. 9.2).

	Casernes de pompiers	Hôpitaux	Ministères	Ambassades
Zones inondées	0%	0%	7,7%	15,6%
Zones problématiques	0%	12,5%	0%	3,8%
Zones difficiles	25%	15,6%	13,4%	34,6%
Zones convenables	50%	62,5%	84,6%	61,5%
Zones non perturbées	25%	9,4%	0%	0%

Tableau 9.2 : Synthèse des résultats obtenus concernant la répartition de certains enjeux vis-à-vis de la résilience du réseau d'assainissement.

Pour conclure, il ressort principalement que si ces enjeux sont situés en dehors des zones inondées, ceux-ci seront malgré tout amenés à subir les conséquences de ces inondations.

D'après les scénarios étudiés et les hypothèses émises, l'analyse de la résilience des réseaux techniques de la ville de Dublin a permis de souligner un certain nombre de problématiques : la centralisation du réseau d'assainissement autour de la station

d'épuration de Ringsend et de sa principale pompe de relèvement induit de fortes perturbations pour une grande partie du territoire lorsque ceux-ci sont endommagés ; la forte dépendance du réseau d'assainissement vis-à-vis du réseau électrique engendre des dysfonctionnements importants du réseau d'assainissement ; de nombreux enjeux majeurs peuvent être perturbés par une inondation côtière bicentennale alors même que ceux-ci ne sont pas situés dans des zones inondables... Ainsi, même si la ville de Dublin présente certains avantages permettant de faire face à une inondation côtière bicentennale (comme un bon maillage de son réseau électrique, des centres de maintenance du réseau d'assainissement situés majoritairement hors des zones inondables...), la situation analysée se révèle problématique.

9.3 SYNTHÈSE DU CHAPITRE 9

Les différentes analyses réalisées révèlent que la ville de Dublin doit faire face à une situation problématique. En effet, si la plupart de ses enjeux majeurs semblent sécurisés (en ce sens où ils ne sont pas majoritairement situés dans des zones inondables), ceux-ci sont particulièrement exposés aux perturbations induites par les dysfonctionnements des différents réseaux techniques. Ainsi, la synthèse réalisée concernant la résilience du réseau d'assainissement montre cette forte exposition.

Certes, le réseau d'assainissement n'est peut-être pas le réseau technique le plus important pour le bon fonctionnement de ces enjeux majeurs, cependant l'analyse de ce réseau illustre les possibles perturbations que peuvent être amenés à subir ces enjeux majeurs face à une crue côtière bicentennale. Plus particulièrement, compte tenu de la forte dépendance du réseau routier de la ville de Dublin vis-à-vis du réseau d'assainissement, il convient de ne pas négliger les impacts relatifs aux dysfonctionnements du réseau d'assainissement pour la gestion de crise.

Si le DCC ignorait l'impact de ces dysfonctionnements sur ses enjeux majeurs, le DCC avait déjà en partie pris conscience de la nécessité de moderniser son réseau d'assainissement. En effet, le DCC est actuellement en train de moderniser son réseau d'assainissement, dont la vétusté est bien connue de ses services. Ainsi, les travaux effectués sur le réseau d'assainissement sont incorporés par le DCC dans sa politique de gestion des risques d'inondation. Néanmoins, il reste toujours un point noir. La centralisation exacerbée du réseau d'assainissement autour de la station d'épuration de Ringsend, conjuguée aux localisations de cette station et de sa principale pompe de relèvement, induisent une dépendance forte du réseau d'assainissement vis-à-vis du réseau électrique.

Ainsi, les questionnements portant sur l'amélioration de la résilience du réseau d'assainissement doivent amener les gestionnaires à revoir leur politique générale de gestion des eaux usées, afin de travailler à la mise en place d'un système plus

polycentrique et favorisant parfois des modes de gestion plus locaux. De plus, la forte dépendance du réseau d'assainissement vis-à-vis du réseau électrique doit plus simplement amener les gestionnaires à trouver des solutions alternatives contribuant *in fine* à rendre le réseau d'assainissement plus autonome.

Enfin, il est nécessaire de rappeler que ces conclusions sont issues de l'analyse de scénarios précis qui ont fait l'objet d'hypothèses. Il convient alors de ne surtout pas généraliser les solutions proposées. Ainsi, ces solutions sont seulement viables pour faire face à une crue côtière bicentennale à Dublin. De plus, d'un point de vue pratique, afin de déterminer si la mise en place des solutions formulées est réellement souhaitable pour la ville de Dublin, il conviendrait d'analyser d'autres aléas de référence. Ainsi, toutes ces solutions doivent être correctement contextualisées.

Quoi qu'il en soit, la ville de Dublin bénéficie de sa position de capitale, puisque la plupart de ses réseaux techniques sont relativement bien maillés. Néanmoins, le développement rapide de la ville conduit à remettre en question cette situation initiale.

SYNTHESE DE LA TROISIEME PARTIE

Cette troisième partie avait pour objectif d'appliquer la méthodologie développée. Pour cela, le développement d'un système informatique s'est révélé nécessaire afin d'automatiser la méthodologie. En effet, l'application de cette méthodologie requiert des capacités de calcul importantes. En outre, l'ensemble de la méthodologie développée requiert de l'analyse spatiale. Dans ce contexte, il est apparu pertinent de développer un Web-SIG, le croisement entre d'une part la recherche thématique et épistémologique concernant la résilience et d'autre part des évolutions sociotechniques, justifiant alors le recours à un Web-SIG plutôt qu'à un SIG bureautique classique.

A l'aide de ce Web-SIG, la résilience des réseaux techniques de la ville de Dublin a été analysée. En effet, la ville de Dublin, engagée dans le projet FloodResilienCity, est fortement exposée aux inondations. Ces inondations peuvent être de différentes natures (pluviales, fluviales ou maritimes). De plus, la ville de Dublin est en plein essor économique. Or, ce développement s'accompagne d'un accroissement démographique aboutissant à un étalement urbain de plus en plus important. Une pression foncière de plus en plus forte est alors exercée sur les zones inondables.

Ainsi, la ville de Dublin a connu trois événements majeurs en l'espace de dix ans. En outre, comme la ville de Dublin est une ville côtière, les gestionnaires sont particulièrement préoccupés par les effets probables induits par les variations climatiques sur les inondations maritimes. C'est pourquoi, les gestionnaires mènent depuis une dizaine d'années une politique volontariste visant à améliorer la résilience de leur ville. Ces gestionnaires ne sont alors plus seulement focalisés sur la lutte contre les inondations. Ils s'intéressent particulièrement à la gestion des impacts relatifs à ces inondations et s'intéressent aux solutions urbanistiques permettant d'y faire face. C'est dans ce contexte, que les gestionnaires dublinois se sont montrés particulièrement intéressés par la méthodologie développée.

Les différentes analyses réalisées révèlent alors que la ville de Dublin doit faire face à une situation problématique. En effet, si la plupart de ses enjeux majeurs semblent sécurisés (en ce sens où ils ne sont pas majoritairement situés dans des zones inondables), ceux-ci sont particulièrement exposés aux perturbations induites par les dysfonctionnements des différents réseaux techniques.

CONCLUSION GENERALE

Résultats

Cette recherche, qui part du postulat que l'analyse de la résilience des réseaux techniques constitue un préalable nécessaire, mais non suffisant, à la mise en place de politiques d'amélioration de la résilience urbaine face aux inondations, a abouti à l'élaboration d'une méthodologie et d'un outil Web-SIG pour analyser la résilience des réseaux techniques. La méthodologie et le Web-SIG (qui contribue à rendre la méthodologie opérationnelle) ont été utilisés pour analyser la résilience des réseaux techniques de la ville de Dublin.

Cette application a alors permis de mettre en exergue les faiblesses du réseau d'assainissement de la ville de Dublin. En effet, d'après les REX passés, ce réseau apparaît très vulnérable aux inondations. De plus, l'application démontre qu'en adoptant des hypothèses plutôt favorables concernant l'état du réseau d'assainissement, ce réseau ne pourra faire face aux dysfonctionnements des stations de relevage situées à proximité de la station d'épuration de Ringsend. Ces dysfonctionnements sont la conséquence d'une forte dépendance de ces installations vis-à-vis du réseau électrique. Ainsi, une rénovation du réseau d'assainissement ne semble pas suffisante pour rendre ce réseau plus résilient. Cette rénovation doit en effet s'accompagner de réflexions sur les dépendances du réseau d'assainissement vis-à-vis du réseau électrique. La configuration du réseau d'assainissement, héritée d'un long processus aboutissant à un réseau centralisé autour de la station d'épuration de Ringsend, peut aussi être repensée (pour tendre vers une configuration plus polycentrique, une gestion plus locale des eaux usées dans certains secteurs de la ville...).

Quoi qu'il en soit, cette application semble démontrer la pertinence de la méthodologie élaborée et de l'outil développé. De plus, cette méthodologie, qui repose sur l'analyse de trois capacités (capacités de résistance, d'absorption et de récupération), a fait l'objet de développements concernant différentes thématiques de recherche. Premièrement, des développements ont été réalisés en matière d'analyse structurelle des réseaux techniques. Ainsi, des indicateurs de redondance ont été développés et l'importance accordée aux indicateurs de centralité a été relativisée. Deuxièmement, des développements ont été accomplis en matière d'analyse des interdépendances entre réseaux techniques. Ainsi, des méthodes issues de la Sûreté de Fonctionnement ont été utilisées pour identifier de manière exhaustive ces interdépendances et pour les modéliser. De plus, un outil indépendant a été développé afin d'automatiser cette

approche. Troisièmement, une approche a été développée pour analyser la remise en service des réseaux techniques à partir de critères spatiaux.

Enfin, des travaux d'ordre conceptuel, théorique et épistémologique ont permis de proposer un cadre relativement nouveau pour appréhender les risques. Ce cadre repose sur une distinction entre d'une part le système de production des risques et ses concepts et d'autre part le système de réalisation des risques. Les concepts d'aléa, de vulnérabilité et de résilience se recoupent alors plus ou moins, le système de réalisation des risques associé ne pouvant alors rendre compte simplement de ces concepts. En effet, le système de réalisation des risques constitue un système dynamique où les événements, les endommagements et les réponses interagissent.

Limites

Cette recherche fait l'objet de certaines limites. Premièrement, le postulat de cette recherche apparaît restrictif. En effet, si appréhender la résilience urbaine par la résilience des réseaux techniques peut être justifié, il n'en reste pas moins que cette approche est critiquable. Ainsi, ce postulat n'est pas neutre puisqu'il peut être associé à une idéologie : la rétiologie. De plus, ce postulat résulte d'une vision très fonctionnaliste de la ville, accordant une importance peut-être excessive à la « technique » au détriment d'aspects plus sociaux ou culturels.

Deuxièmement, les choix méthodologiques qui ont été effectués pour analyser la résilience des réseaux techniques sont critiquables. Par exemple, aborder les réseaux techniques selon une approche structurelle (*i.e.* centrée sur l'analyse de la configuration, de la trame, de la topologie des réseaux) plutôt que fonctionnelle (*i.e.* centrée sur l'analyse des flux, de la rhéologie des réseaux) est critiquable. En effet, l'analyse rhéologique permet de reproduire précisément le fonctionnement des réseaux techniques. C'est pourquoi, cette analyse est privilégiée par les ingénieurs réseaux. De plus, l'absence de prise en compte d'aspects temporels et stochastiques peut être jugée problématique. Ainsi, l'approche développée pour analyser les interdépendances entre les réseaux techniques considère les possibilités de défaillances indépendamment d'aspects temporels (qui ont leur importance) et ne les hiérarchise pas en fonction de leur probabilité d'occurrence. Les scénarios produits sont alors des scénarios « catastrophiques ». Enfin, l'approche uniquement spatiale concernant la remise en service des réseaux techniques est critiquable car fondamentalement restreinte parce qu'elle ne considère pas des aspects plus organisationnels (ressources disponibles, efficacité des équipes...).

Néanmoins, ces choix méthodologiques tendent à donner une certaine cohérence à la méthodologie développée. De plus, ces choix conduisent à rendre la méthodologie opérationnelle. En effet, cette méthodologie requiert *in fine* peu de données concernant les réseaux techniques.

Enfin, l'exploitation effective du Web-SIG soulève de nombreuses questions. En effet, ce prototype, qui fonctionne localement, requiert désormais de développer les protocoles

nécessaires pour le faire fonctionner en réseau et pour le maintenir au sein d'une structure pérenne. Or, si les utilisateurs de cet outil sont identifiés (les collectivités locales), quel peut être l'acteur en mesure de maintenir un tel outil ? De plus, les collectivités peuvent avoir des difficultés pour obtenir les données nécessaires à son fonctionnement. Quelles sont alors les solutions pour que les collectivités soient en mesure de disposer de données cohérentes sur leurs réseaux techniques ?

Perspectives

Pour conclure, ces derniers questionnements soulèvent une problématique plus générale qui dépasse le cadre de cette recherche : dans le futur, quels acteurs devront être en charge de la gestion des interdépendances entre les réseaux techniques ? En effet, le recours croissant aux systèmes d'informations, pour gérer de manière « intelligente » les réseaux techniques (comme les *smart grid*), crée de nouvelles dépendances qui complexifient encore le fonctionnement de ces réseaux. Or, ce recours croissant aux systèmes d'informations apparaît presque inéluctable afin que les sociétés puissent faire face aux pressions qu'elles exercent sur leur environnement. Ainsi, pour optimiser la gestion des ressources en eau et en énergie (écrêtage des pics de consommation, gestion durable de la ressource...), le fonctionnement des réseaux techniques est amené à se complexifier. Il apparaît donc désormais nécessaire de gérer les interdépendances entre les réseaux techniques de manière effective.

Pour que cette gestion soit effective, il faut alors repenser les structures organisationnelles actuelles. Pour cela, différentes pistes sont actuellement avancées. Premièrement, il serait possible de créer des plateformes communes où chaque gestionnaire mettrait à disposition des autres gestionnaires des informations pouvant être consultées librement. Il est aussi possible d'envisager des « entités » (entreprises privées ou services publics) qui auront pour mission de gérer les interdépendances entre les réseaux techniques. Les collectivités locales peuvent être amenées à jouer ce rôle, car il est dans leur intérêt de bien connaître ces interdépendances (gestion des ressources, gestion des risques...). Enfin, le développement de « l'*open data* » peut permettre de dépasser ces questionnements, en rendant public des données actuellement considérées comme privées.

Cette recherche qui requiert des informations sur différents réseaux techniques – que les gestionnaires sont peu enclins à partager et que les collectivités ne possèdent pas toujours – ne peut faire abstraction de ces perspectives. Ainsi, la principale remarque soulevée concernant cette recherche est qu'il n'est pas possible de disposer des données nécessaires à la méthodologie en forçant les gestionnaires des réseaux techniques à les fournir. En dehors du fait que cette objection n'est pas scientifique mais pratique, cette objection tient compte d'une réalité passée et encore présente, mais qui ne présage pas de l'avenir. Les mutations des secteurs de l'énergie et de l'eau, qui requièrent de s'appuyer sur les secteurs de l'informatique et des télécommunications, vont probablement bouleverser une gestion actuellement très segmentée des réseaux techniques. De plus, si

ce cadre ne devait pas évoluer, les choix méthodologiques effectués, qui privilégient des approches « géographiques » au détriment d'approches plus « technicistes » (étude de la topologie des réseaux et non de leur rhéologie, la remise en service des réseaux techniques analysée uniquement par des critères spatiaux, approche qui néglige les probabilités d'occurrence des défaillances...), permettent de minimiser le recours aux données nécessaires pour analyser leur résilience. Il serait alors intéressant de développer une véritable géographie des réseaux techniques pour améliorer encore ces analyses.

Quoi qu'il en soit, la résilience urbaine face aux risques d'inondation passe à l'avenir par une bonne gestion des interdépendances entre les réseaux techniques. C'est pourquoi, l'avènement « annoncé » de « réseaux » plus intelligents doit être considéré comme une opportunité pour mener des réflexions sur la résilience des réseaux techniques face aux risques d'inondation.

LISTE DES FIGURES

<i>Figure 1 : De nouveaux défis et de nouvelles politiques pour la gestion des risques d'inondation.</i> -----	2
<i>Figure 2 : Plan du mémoire.</i> -----	5
<i>Figure 3 : Plan de la partie 1.</i> -----	7
<i>Figure 1.1 : Coûts des catastrophes par point de PIB de 1980 à 2010 (source : CRED et FMI). A gauche les catastrophes naturelles. A droite les catastrophes inondations.</i> -----	11
<i>Figure 1.2 : Les Retours d'EXpérience un processus d'amélioration continue.</i> -----	13
<i>Figure 1.3 : En fonction du temps écoulé depuis l'événement, le REX se concentrera davantage sur une ou plusieurs thématiques.</i> -----	14
<i>Figure 1.4 : Problèmes d'accessibilité après les inondations à Nîmes (rue de la Madeleine 1988). Malgré l'ampleur de la catastrophe, le dégagement des voies a été jugé plutôt rapide (crédit photo : Georges Mathon).</i> -----	17
<i>Figure 1.5 : Dégradations sur le réseau ferroviaire (Cuxac d'Aude crue 1999).</i> -----	19
<i>Figure 1.6 : Les réseaux techniques, aléa inondation et impacts, adapté de (Prost, 1994 ; Blancher, 1998).</i> -	22
<i>Figure 1.7 : Principe de fonctionnement d'un réseau de téléphonie fixe.</i> -----	23
<i>Figure 1.8 : Les réseaux techniques, aléa inondation et impacts, des rétroactions nombreuses.</i> -----	23
<i>Figure 1.9 : La multiplicité des acteurs en région parisienne (Toubin et al., 2012).</i> -----	24
<i>Figure 1.10 : Effondrement d'une chaussée dans un Parking menaçant les réseaux techniques dans le Var après les inondations de Juin 2010.</i> -----	25
<i>Figure 1.11 : Scénario fictif illustrant les interdépendances entre réseaux techniques.</i> -----	26
<i>Figure 1.12 : Le poste de transformation de Walham proche d'être submergé.</i> -----	28
<i>Figure 1.13 : Les infrastructures critiques « sous pressions » (Kroger, 2008).</i> -----	32
<i>Figure 1.14 : Evolution du rétablissement de l'électricité suite à la tempête Klaus survenue en Janvier 2009 (ERDF, 2009).</i> -----	34
<i>Figure 1.15 : Méthodologie mise en place pour l'élaboration du plan de protection des infrastructures critiques américaines (NIPP, 2009).</i> -----	35
<i>Figure 2.1 : Une focalisation sur les risques urbains au niveau des organismes internationaux.</i> -----	43
<i>Figure 2.2 : Une nécessaire prise en compte des dépendances pour analyser la vulnérabilité urbaine (Guézo & Verrhiest, 2006).</i> -----	48
<i>Figure 2.3 : Les risques réseaux.</i> -----	63
<i>Figure 2.4 : De l'endommagement matériel à l'endommagement fonctionnel.</i> -----	64
<i>Figure 2.5 : Les niveaux matériel, structurel et fonctionnel et leur vulnérabilité associée (Reghezza, 2006).</i> 64	
<i>Figure 2.6 : Impact d'un événement catastrophique sur un réseau de transport – détails des dommages et des vulnérabilités impliqués (d'après : Gleyze, 2005).</i> -----	65
<i>Figure 3.1 : La résilience un concept pluridisciplinaire (Lhomme et al., 2010).</i> -----	70
<i>Figure 3.2 : Illustration didactique de l'évolution d'un bassin d'attraction en fonction des changements de paramètres du système (Gallopain, 2006).</i> -----	71
<i>Figure 3.3 : Différentes acceptations de la relation « résilience – vulnérabilité – capacités adaptatives » (Cutter et al., 2008).</i> -----	74
<i>Figure 3.4 : La vulnérabilité synthétique. Dans ce cadre, la résilience est considérée comme synonyme des capacités des sociétés à faire face à une perturbation (i.e. synonyme d'une vulnérabilité sociale) et n'est qu'une composante de la vulnérabilité.</i> -----	76
<i>Figure 3.5 : Les notions d'absorption et de récupération selon les approches analytique et systémique (Lhomme et al., 2012a).</i> -----	78
<i>Figure 3.6 : Les notions d'absorption et de récupération selon l'approche synthétique (Lhomme et al., 2012a).</i> -----	79
<i>Figure 3.7 : La résilience envisagée selon deux échelles de temps (Lhomme et al., 2012a).</i> -----	79
<i>Figure 3.8 : Résilience et vulnérabilité dans un même continuum (Lhomme et al., 2010).</i> -----	80

Figure 3.9 : Proposition d'un nouveau formalisme du risque (Lhomme et al., 2012a).	81
Figure 3.10 : La résilience des bâtiments selon l'Environmental Agency.	83
Figure 3.11 : « Quartier résilient » à Francfort, avec la combinaison de stratégies « légères » pour lutter contre les inondations (ex : barrières mobiles) et de stratégies d'assimilation de l'inondation (ex : routes utilisées pour la rétention de l'eau).	84
Figure 3.12 : Le triangle de la résilience (Bruneau et al., 2003 ; Tierney & Bruneau, 2007)	85
Figure 3.13 : la résilience des infrastructures critiques – plier mais ne pas rompre (Théron, 2011).	88
Figure 3.14 : Une vision simplifiée des dynamiques urbaines (Lhomme et al., 2010).	92
Figure 3.15 : Modélisation systémique simplifiée de la ville (Lhomme et al., 2010).	93
Figure 3.16 : Modélisation systémique simplifiée de la ville en période de crue.	95
Figure 3.17 : Approche générale d'analyse de la résilience urbaine face aux inondations.	96
Figure 4 : Plan de la partie 2.	101
Figure 4.1 : Liste non formalisée et non exhaustive de réseaux techniques. Du concept de « réseaux techniques » à ses éléments constitutifs, il existe différents niveaux d'abstraction.	108
Figure 4.2 : La diversité des réseaux techniques (MEDD, 2005).	108
Figure 4.3 : Le risque comme le croisement entre la probabilité d'occurrence d'un scénario et les conséquences de ce scénario (Kaplan & Garrick, 1981).	111
Figure 4.4 : Formalisation de la prise en considération des incertitudes dans les analyses de risques (Kaplan & Garrick, 1981).	112
Figure 4.5 : Formalisation du risque fondée sur les travaux de Kaplan (Johansson, 2010).	112
Figure 4.6 : Les différents niveaux d'analyse des infrastructures critiques (Lhomme et al., 2011b).	114
Figure 4.7 : Etude des interdépendances entre infrastructures critiques au niveau élémentaire (à gauche) et plus génériquement au niveau des infrastructures critiques (à droite).	115
Figure 4.8 : Nécessité d'approcher les différentes interdépendance selon des niveaux différents (Haines et al., 2005).	115
Figure 4.9 : Les capacités à étudier pour analyser la résilience des réseaux techniques (Lhomme et al., 2010).	122
Figure 4.10 : L'interdépendance des capacités à étudier.	123
Figure 4.11 : Différence entre les approches structurelles et fonctionnelles.	124
Figure 4.12 : Les thématiques de recherche émergeant de la méthodologie d'analyse de la résilience des réseaux techniques.	125
Figure 5.1 : La théorie des graphes.	130
Figure 5.2 : (a) un réseau fictif, (b) la carte axiale, (c) le graphe dual (Jiang & Claramunt, 2004).	132
Figure 5.3 : A gauche un graphe et ses faces. A droite un graphe et son graphe dual (Cardillo, 2010).	133
Figure 5.4 : Les trois indicateurs de référence pour évaluer la vulnérabilité élémentaire. Ils peuvent être classés en fonction de l'importance accordée à l'efficacité ou à la connexité des réseaux.	140
Figure 5.5 : A gauche les conséquences de certains scénarios (Albert et al., 2004). A droite les conséquences de l'ensemble des scénarios pouvant se produire (Matisziw et al., 2008).	142
Figure 5.6 : Méthode employée pour analyser la vulnérabilité élémentaire.	146
Figure 5.7 : Comparaison des classifications obtenues pour la vulnérabilité élémentaire réelle et prédite.	147
Figure 5.8 : Prédiction de la vulnérabilité élémentaire pour Marigny-Les-Usages (présence d'un point fortement sous-estimé)	147
Figure 5.9 : Graphique représentant la corrélation entre la centralité intermédiaire et l'indicateur de pertes de connectivité (pour 3 nœuds impliqués dans le scénario).	149
Figure 5.10 : Analyse de l'ensemble des scénarios possibles pour le réseau américain des routeurs et des impacts de différents types de scénarios.	150
Figure 5.11 : Graphique représentant la corrélation entre la centralité intermédiaire couplée à l'indicateur de DCP et l'indicateur de pertes de connectivité (pour 3 nœuds impliqués).	151
Figure 5.12 : Graphique représentant la corrélation entre la centralité intermédiaire, couplée à l'indicateur de DCP et à l'indicateur de voisinage, et l'indicateur de pertes de connectivité (pour 3 nœuds impliqués).	152
Figure 5.13 : Les scénarios critiques obtenus à partir des indicateurs utilisés sont très proches de ceux obtenus par le calcul dynamique des centralités pour le réseau américain des routeurs.	152

Figure 5.14 : Différents types de scénarios de défaillances appliqués au réseau autoroutier français. Le calcul dynamique des centralités montre ses limites. -----	155
Figure 5.15 : Cartes de vulnérabilité combinatoire pour un nombre donné de composants impliqués. A gauche le réseau autoroutier français pour des scénarios impliquant trois nœuds. A droite le réseau autoroutier français pour des scénarios impliquant quatre nœuds.-----	156
Figure 5.16 : Les résultats agrégés des vulnérabilités combinatoires au niveau des sommets. A gauche le réseau autoroutier français simplifié. A droite le réseau routier d'Indianapolis. -----	157
Figure 5.17 : A gauche la centralité des sommets et des exemples de scénarios critiques. Dans ce cas, plus la centralité d'un sommet est élevée (en rouge foncé) plus le nombre de composants devant être impliqués dans un scénario pour que ce sommet soit impliqué dans un scénario critique doit aussi être élevé. A droite le nombre à partir duquel un sommet peut être impliqué dans un scénario critique. -----	158
Figure 5.18 : Le degré d'un sommet ne peut à lui seul caractériser la redondance d'un réseau. -----	161
Figure 5.19 : Le redundancy ratio. -----	161
Figure 5.20 : Les résultats du redundancy ratio sont parfois incohérents. -----	162
Figure 5.21 : Trois cas où le redundancy ratio souligne davantage le nombre de composantes connexes créées en cas de suppression du sommet entouré (4 à gauche, 2 au centre, 1 à droite) plutôt que la redondance du réseau (plus la valeur baisse plus le nombre de composantes connexes augmente mais la redondance reste inchangée). -----	162
Figure 5.22 : Calcul du clustering coefficient-----	163
Figure 5.23 : Le clustering coefficient ne permet pas de distinguer des structures usuelles (courantes) concernant les réseaux techniques. -----	163
Figure 5.24 : Les deux nouveaux indicateurs développés pour analyser la redondance au sein d'un graphe. A droite le nombre de chemins indépendants moyen local et à gauche l'indicateur d'alternatives moyen local à un sommet.-----	165
Figure 5.25 : Test du nombre de chemins indépendants moyen local. -----	167
Figure 5.26 : Test de l'indicateur d'alternatives moyen local.-----	167
Figure 5.27 : Agrégation des indicateurs de redondance (A droite un réseau redondant à maille carré et à gauche un réseau très peu redondant de type arborescent). -----	168
Figure 5.28 : Mise en pratique des indicateurs de redondance au réseau routier de la communauté d'agglomération de la ville d'Orléans (A droite la ville de Bou à gauche celle de Chanteau). -----	168
Figure 6.1 : La méthodologie de modélisation des interdépendances entre les réseaux techniques (Lhomme et al., 2011b). -----	183
Figure 6.2 : Analyse fonctionnelle externe des réseaux.-----	184
Figure 6.3 : Bloc Diagramme Fonctionnel (BDF) « contacts » du réseau électrique (Lhomme et al., 2011b). -----	185
Figure 6.4 : Exemple d'un scénario pouvant être produit par la méthodologie (Lhomme et al., 2011b). ----	188
Figure 6.5 : Architecture de l'outil permettant d'automatiser la production des scénarios issus de la méthodologie développée pour modéliser les interdépendances entre les réseaux techniques (Lhomme et al., 2011b).-----	189
Figure 6.6 : Algorithme permettant l'automatisation des scénarios par l'établissement d'un graphe des liens de causalité (Lhomme et al., 2011b).-----	189
Figure 6.7 : Exemple d'effets pouvant être provoqués par la perturbation d'une fonction d'un composant. Une interface a été développée pour visionner les résultats et effectuer les requêtes (Lhomme et al., 2011b). 190	190
Figure 6.8 : Illustration des statistiques obtenues. Ces statistiques montrent notamment l'agressivité du réseau électrique envers les autres composants (Lhomme et al., 2011b). -----	191
Figure 6.9 : Démarche générale concernant l'analyse des capacités de résistance des réseaux techniques. --	194
Figure 6.10 : Algorithme correspondant à la procédure générale d'analyse des capacités de résistance des réseaux techniques.-----	195
Figure 6.11 : Diagramme de cas d'utilisation de la procédure permettant d'analyser les capacités de résistance des réseaux techniques face aux inondations. -----	195
Figure 6.12 : Les différents réseaux techniques analysés et la position de certains enjeux. En bleu le réseau d'eau potable, en jaune le réseau électrique, en rouge le réseau d'assainissement. -----	196

Figure 6.13 : Carte représentant les endommagements directs sur les différents réseaux. -----	197
Figure 6.14 : Les endommagements et les premiers dysfonctionnements identifiés lorsque les réseaux sont étudiés isolément. -----	198
Figure 6.15 : Le dysfonctionnement du réseau électrique consécutif à l'endommagement d'une partie de son réseau par le réseau d'assainissement. -----	198
Figure 6.16 : Carte finale du cas théorique présenté. -----	199
Figure 7.1 : Exemple de courbes de remise en service correspondant à la probabilité qu'un terminal portuaire soit remis en service en fonction du temps écoulé après un séisme (Na & Shinozuka, 2009). -----	203
Figure 7.2 : Illustration de l'importance du plus court chemin pour la remise en service des réseaux techniques. En rouge les éléments endommagés et en vert le centre en charge de la remise en service. Dans ce cas, un composant endommagé est beaucoup mieux placé que l'autre. L'indicateur de plus court chemin met en évidence cette différence. -----	211
Figure 7.3 : Illustration du calcul de l'indicateur d'ordonnancement (I_{or}). -----	212
Figure 7.4 : Entre la situation en temps normal (à gauche) et la situation en période de crise (à droite) l'allongement des plus courts chemins entre les composants endommagés et les centres de remise en service peut avoir son importance. -----	213
Figure 5 : Plan de la partie 3. -----	221
Figure 8.1 : Evolution du nombre de sites web (www.news.netcraft.com). -----	225
Figure 8.2 : Néogéographie et géomatique. -----	227
Figure 8.3 : Architecture client-serveur dans le cadre du développement d'un Web SIG. -----	229
Figure 8.4 : Diagramme FAST pour la fonction principale « utiliser les données des collectivités » -----	236
Figure 8.5 : Le modèle « entité-association » du système développé. -----	238
Figure 8.6 : Diagramme des cas d'utilisation concernant la capacité d'absorption. -----	239
Figure 8.7 : Les différentes zones de l'interface. -----	241
Figure 8.8 : Présentation de l'espace cartographique. -----	241
Figure 8.9 : Présentation d'un onglet. -----	242
Figure 8.10 : Exploitation de la zone complémentaire par les graphiques statistiques. -----	243
Figure 8.11 : Affichage d'une couche WMS produite par l'outil web-SIG à l'aide du SIG OpenJump. -----	244
Figure 8.12 : Architecture générale du Web-SIG. -----	246
Figure 8.13 : Architecture du Web-SIG. -----	246
Figure 9.1 : Dublin une ville côtière. -----	250
Figure 9.2 : Le grand Dublin (à gauche) et le comté de Dublin (à droite). -----	251
Figure 9.3 : Dublin d'un point de vue plus fonctionnel et moins administratif (d'après : NTA, 2011). -----	252
Figure 9.4 : Evolution de la population (en millier d'habitants) de la région de Dublin de 1840 aux années 2000 (www.cso.ie). -----	253
Figure 9.5 : Une ville fortement congestionnée. En rouge les embouteillages matinaux à Dublin (NTA, 2011). -----	256
Figure 9.6 : Evolution estimée de la population entre 1996 et 2030 (NTA, 2011). -----	257
Figure 9.7 : Dublin et les différentes zones inondables (Leahy, 2009). -----	258
Figure 9.8 : Les principaux cours d'eau de Dublin. -----	259
Figure 9.9 : Les inondations côtières de 2002 à Dublin dans le quartier de Clontarf (Leahy, 2009). -----	261
Figure 9.10 : Un réseau d'évacuation des eaux pluviales régulièrement dépassé (Leahy, 2009). -----	262
Figure 9.11 : Les principales actions menées par la ville Dublin afin de faire face aux inondations durant la période 2005-2008 (Leahy, 2009). -----	263
Figure 9.12 : Les travaux effectués sur les vannes du Spencer Dock (à gauche) et les réflexions d'aménagement accompagnant ces travaux (à droite) (Leahy, 2009). -----	265
Figure 9.13 : Modélisation retenue du réseau d'assainissement. Il s'agit d'une modélisation simplifiée. -----	268
Figure 9.14 : Une redondance nulle du réseau d'assainissement et par conséquent une capacité d'absorption nulle. -----	269
Figure 9.15 : Le réseau autoroutier du Grand Dublin. -----	270
Figure 9.16 : La modélisation retenue pour l'analyse du réseau routier de Dublin -----	270
Figure 9.17 : Un réseau routier très redondant. -----	271

Figure 9.18 : Un réseau routier vite submergé par les inondations (DCC, 2011). -----	271
Figure 9.19 : La modélisation retenue du réseau électrique haute tension de Dublin. -----	273
Figure 9.20 : La redondance du réseau électrique. -----	274
Figure 9.21 : Les zones de redondance du réseau électrique. -----	274
Figure 9.22 : Les endommagements consécutifs à une inondation côtière bicentennale sur le réseau d'assainissement d'après le scénario principal. -----	276
Figure 9.23 : Endommagements et dysfonctionnements consécutifs à une inondation côtière (bicentennale) sur le réseau d'assainissement d'après le scénario principal. -----	277
Figure 9.24 : Le territoire de Dublin face aux dysfonctionnements du réseau d'assainissement consécutifs à une inondation côtière bicentennale d'après le scénario principal. -----	277
Figure 9.25 : Les parties du réseau électrique en contact avec l'eau ne fonctionnent plus dans le scénario alternatif. -----	279
Figure 9.26 : Malgré des hypothèses plutôt favorables, en ce qui concerne la résistance du réseau d'assainissement, ce réseau est fortement perturbé par le scénario alternatif. -----	279
Figure 9.27 : Des dysfonctionnements importants induits par la dépendance du réseau d'assainissement envers le réseau électrique. -----	280
Figure 9.28 : Les dysfonctionnements du réseau électrique dans le scénario alternatif. -----	280
Figure 9.29 : Les centres du DCC (et leurs dépôts) en charge du réseau d'assainissement. -----	281
Figure 9.30 : Les endommagements sur le réseau d'assainissement classés en fonction de leur remise en service (avec 3 centres de remise en service). -----	282
Figure 9.31 : La remise en service du réseau d'assainissement pour le territoire dublinois (avec 3 centres de remise en service). -----	283
Figure 9.32 : Les endommagements sur le réseau d'assainissement classés en fonction de leur remise en service (avec 4 centres de remise en service). -----	283
Figure 9.33 : La remise en service du réseau d'assainissement pour le territoire dublinois (avec 4 centres de remise en service considérés). -----	284
Figure 9.34 : La répartition des hôpitaux et la résilience du réseau d'assainissement. -----	285
Figure 9.35 : La répartition des ambassades et la résilience du réseau d'assainissement. -----	286
Figure A2.1 : Bloc Diagramme Fonctionnel (BDF) « contact » du réseau d'eau. -----	337
Figure A2.2 : Bloc Diagramme Fonctionnel (BDF) « contact » du réseau télécom. -----	337
Figure A2.3 : Bloc Diagramme Fonctionnel (BDF) « contact » des réseaux routiers et ferrés. -----	338
Figure A2.4 : Bloc Diagramme Fonctionnel (BDF) « flux hydrauliques » du réseau d'eau. -----	338
Figure A2.5 : Bloc Diagramme Fonctionnel (BDF) « flux hydrauliques » du réseau électrique. -----	338
Figure A2.6 : Bloc Diagramme Fonctionnel (BDF) « flux hydrauliques » du réseau télécom. -----	339
Figure A2.7 : Bloc Diagramme Fonctionnel (BDF) « flux hydrauliques » des réseaux routiers et ferrés. -----	339
Figure A2.8 : Bloc Diagramme Fonctionnel (BDF) « vulnérabilité » du réseau d'eau. -----	339
Figure A2.9 : Bloc Diagramme Fonctionnel (BDF) « vulnérabilité » du réseau électrique. -----	340
Figure A2.10 : Bloc Diagramme Fonctionnel (BDF) « vulnérabilité » du réseau télécom. -----	340
Figure A2.11 : Bloc Diagramme Fonctionnel (BDF) « vulnérabilité » des réseaux routiers et ferrés. -----	340
Figure A2.12 : Statique concernant le nombre de scénarios par fonction. En orange le nombre de scénarios de défaillances dont une fonction peut être à l'origine. En bleu le nombre de scénarios de défaillances dont une fonction peut être soumises. -----	358
Figure A2.13 : Statique concernant le nombre de scénarios par fonction. En orange le nombre de scénarios de défaillances dont une fonction est à l'origine. En bleu le nombre de scénarios de défaillances dont une fonction est soumises. En vert le nombre de scénarios où une fonction joue un « rôle intermédiaire ». -----	358
Figure A3.1 : Diagramme FAST pour la fonction principale « incorporer la méthodologie d'analyse de la résilience urbaine ». -----	361
Figure A3.2 : Diagramme FAST pour la fonction principale « communiquer les résultats ». -----	362
Figure A3.3 : Diagramme des cas d'utilisation concernant la capacité de récupération -----	363
Figure A3.4 : Diagramme des cas d'utilisation concernant la capacité de résistance -----	364

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1 : Résumé en chiffre de l'étude concernant l'exposition aux inondations des infrastructures critiques au Royaume-Uni (source : EA-UK, 2007).	29
Tableau 1.2 : Les études concernant les infrastructures critiques (source : Yusta et al., 2011).	31
Tableau 1.3 : Les « blackouts » dans le monde.	31
Tableau 1.4 : Différents plans de protection pour sécuriser les infrastructures critiques.	35
Tableau 1.5 : Synthèse des connaissances empiriques issues de ce premier chapitre (d'après : MEDD, 2005 ; EP Loire, 2006).	39
Tableau 2.1 : Situation concernant les logements dans les zones inondables (Laporte, 2009).	47
Tableau 2.2 : Acceptabilité des inondations en milieu urbain selon la méthode « inondabilité » du Cemagref.	49
Tableau 2.3 : La ville et les caractéristiques d'un système.	53
Tableau 3.1 : Les contradictions attachées au concept de résilience.	72
Tableau 3.2 : La résilience un concept de la pensée complexe (inspiré de : Ahern, 2011).	73
Tableau 3.3 : Notions utilisées dans les définitions de la résilience concernant les risques naturels, d'après celles retenues dans (Mayunga, 2007).	77
Tableau 4.1 : Vision holistique des problématiques concernant l'analyse des infrastructures critiques (adapté de : Rinaldi, 2004).	116
Tableau 4.2 : Tableau comparatif des avantages et des inconvénients des modélisations dans la recherche engagée.	125
Tableau 5.1 : Pertinence des indicateurs en fonction du nombre de composants impliqués dans les scénarios de défaillance.	141
Tableau 5.2 : Quelques exemples représentatifs des diverses possibilités d'analyse de la vulnérabilité des réseaux techniques.	142
Tableau 5.3 : Corrélation entre la centralité intermédiaire et l'allongement moyen.	143
Tableau 5.4 : Résultats des régressions obtenus à partir de différents couplage de l'indicateur d'allongement moyen local et de centralité intermédiaire.	145
Tableau 5.5 : Caractéristiques des villes étudiées.	146
Tableau 5.6 : Résultats des corrélations obtenues entre la vulnérabilité intermédiaire et quatre indicateurs (centralité intermédiaire, vulnérabilité locale et deux indicateurs de redondance).	147
Tableau 5.7 : Corrélation entre la centralité intermédiaire et l'indicateur de pertes de connectivité (pour 3 nœuds impliqués).	149
Tableau 5.8 : Corrélation entre la centralité intermédiaire couplée à l'indicateur de DCP et l'indicateur de pertes de connectivité (pour 3 nœuds impliqués).	151
Tableau 5.9 : Corrélation entre la centralité intermédiaire, couplée à l'indicateur de DCP et à l'indicateur de voisinage, et l'indicateur de pertes de connectivité (pour 3 nœuds impliqués).	152
Tableau 5.10 : Corrélation entre les trois indicateurs retenus et l'indicateur de pertes de connectivité (en bleu le coefficient de régression est négatif et en rouge il est positif).	153
Tableau 5.11 : Pourcentage commun entre les scénarios les plus critiques (en l'occurrence les 5% des scénarios les plus critiques) issus du calcul des indicateurs et du calcul de pertes de connectivité en fonction du nombre de composants impliqués dans les scénarios (en rouge les pourcentages <40% en vert les pourcentages >60%).	154
Tableau 5.12 : Résultats des régressions entre les trois indicateurs retenus et l'indicateur de pertes de connectivité en fonction du nombre de composants impliqués dans les scénarios.	155
Tableau 6.1 : Exemple d'une nomenclature pour une partie du réseau électrique.	185
Tableau 6.2 : Exemple d'un tableau d'analyse fonctionnelle.	187
Tableau 6.3 : Les principales caractéristiques des réseaux étudiés.	197

Tableau 8.1 : Etude de différentes applications à l'aide d'une grille fonctionnelle. -----	229
Tableau 8.2 : Inventaire « partiel » des solutions techniques. -----	245
Tableau 9.1 : Evolution de la population dans la zone d'étude stratégique du système d'assainissement du Grand Dublin (GDSDS, 2005).-----	255
Tableau 9.2 : Synthèse des résultats obtenus concernant la répartition de certains enjeux vis-à-vis de la résilience du réseau d'assainissement. -----	286
Tableau A1.1 : Exemple d'un tableau type AMDE.-----	331
Tableau A3.1 : Suite du tableau concernant les choix des solutions techniques.-----	365

LISTE DES ABREVIATIONS

- B D D** : Base De Données
- C I** : Critical Infrastructure
- C R E D** : Centre for Research on the Epidemiology of Disasters
- C S O** : Central Statistics Office (Ireland)
- D A T A R** : Délégation interministérielle à l'Aménagement du Territoire et à l'Attractivité Régionale
- D C C** : Dublin City Council
- E D F** : Electricité De France
- E R D F** : Electricité Réseau Distribution France
- E S B** : Electricity Supply Board
- F A S T** : Function Analysis System Technique
- F M I** : Fonds Monétaire International
- F R C** : FloodResilienCity
- G D S D S** : Greater Dublin Strategic Drainage Study
- G P S** : Global Positioning System
- G S M** : Global System for Mobile communications
- I A U** : Institut d'Aménagement et d'Urbanisme
- I C E** : Infrastructures Critiques Européenne
- I F S C** : International Financial Services Center
- I S D R** : International Strategy for Disaster Reduction
- M E D D** : Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable
- N I P P** : National Infrastructure Protection Plan
- N T A** : National Transport Authority
- O G C** : Open Geospatial Consortium
- R A T P** : Régie Autonome des Transports Parisiens
- R E X** : Retour d'EXpérience
- S I G** : System d'Information Géographique
- U M L** : Unified Modeling Language
- W F S** : Web Feature Service
- W M S** : Web Map Service

BIBLIOGRAPHIE

- Ahern J.**, 2011, « From fail-safe to safe-to-fail: Sustainability and resilience in the new urban world », *Landscape and Urban Planning*, 100(4), pp. 341-343.
- Albert R., Jeong H., Barabasi A.**, 2000, « Error and attack tolerance of complex networks », *Nature*, 406(6794), pp. 378-382.
- Albert R., Albert I., Nakarado G.**, 2004, « Structural vulnerability of the North American power grid », *Physical Review E*, 69(2), pp. 1-4.
- Alwang J., Siegel P. B., Jorgensen S. L.**, 2001, « Vulnerability: A View from Different Disciplines », *Social Protection Discussion Paper*, Washington, D.C.: The World Bank, 42 p.
- Andrade J., Herrmann H., Andrade R., Da Silva L.**, 2005, « Apollonian Networks: Simultaneously Scale-Free, Small World, Euclidean, Space Filling, and with Matching Graphs », *Physical Review Letters*, 94(1), pp. 14-17.
- Araneda J. C., Rudnick H., Mocarquer S., Miquel P.**, 2010, « Lessons from the 2010 Chilean earthquake and its impact on electricity supply », *2010 international conference on power system technology* (PowerCon 2010), Hangzhou, China, October 24–28.
- Arthur W. B., Durlauf S., Lane D. A.**, 1997, *The Economy as an Evolving Complex System II*, chapter Introduction : Process and Emergence in the Economy, Addison-Wesley, Reading, Mass, pp. 1-14.
- Aschan-Leygonie C.**, 2000, « Vers une analyse de la résilience des systèmes spatiaux », *L'Espace Géographique*, n°1, pp. 67-77.
- Ascher F.**, 2001, *Les Nouveaux Principes de l'urbanisme. La fin des villes n'est pas à l'ordre du jour*, Editions de l'Aube.
- Ashley R. M., Blanksby J., Chapman J., Zhou J. J.**, 2007, « Towards Integrated Approaches to Reduced Flood Risk in Urban Areas », in R. Ashley, S. Garvin, E. Pasche, A. Vassilopoulos, C. Zevenbergen, *Advances in Urban Flood Management*, pp. 415-432.
- Ashley R. M., Blanksby J., Newman R., Gersonius B., Poole A., Lindley G., Smith S., Ogden S., Nowell R.**, 2012, « Learning and Action Alliances to build capacity for flood resilience », *Journal of Flood Risk Management*, 5, pp. 14–22.
- Atlan H.**, 1992, *L'organisation biologique et la théorie de l'information*, Seuil, collection la Librairie du XXIème siècle, 300 p.
- Bailly A., Beaumont C., Hurriot J.-M., Sallez A.**, 1995, *Représenter la ville*, Paris, Economica (coll. « Géo Poche »), 112 p.
- Ballantyne D. B.**, 1990, « Earthquake Loss Estimation Modeling of the Seattle Water System », *Report to the U.S. Geological Survey*, Federal Way, WA.

- Barabasi A. L., Albert R.**, 1999, « Emergence of scaling in random networks », *Science*, 286, pp. 509-512.
- Battelle**, 2007, Evaluation of the systems available redundancy to compensate for loss of transportation assets resulting from natural disasters, Retrieved September 2009, from Transportation for Tomorrow.
- Batty M.**, 2004, « A new theory of space syntax », *Syntax*, 44(0).
- Batty M., Rana S.**, 2004, « The automatic definition and generation of axial lines and axial maps », *Environment and Planning B Planning and Design*, 31(4), pp. 615-640.
- Beaujeu-Garnier**, 1997, *Géographie urbaine*, Collection U., Armand Colin, 349 p.
- Beguín H.**, 1996, « Faut-il définir la ville ? », *Penser la ville : théories et modèles*, Paris, Anthropos, coll. Villes, pp. 301-320.
- Bellec G., Sauvalle B., Boye H., Rochas M.**, 2010, Rapport relatif à la limitation de l'impact des événements climatiques majeurs sur le fonctionnement des réseaux de distribution de l'électricité, 46 p.
- Belu M.**, 2008, « Les modèles de localisation-allocation », *International business and european integration*, 6 p.
- Béraud H.**, 2011, « Organizational resilience assessment method: from theory to waste management application », *How the concept of resilience is able to improve urban risk management? A temporal and a spatial analysis*, Paris, France.
- Berkes F., Colding J., Folke C.**, 2002, *Navigating Social- Ecological Systems: Building Resilience for Complexity and Change*, Cambridge: Cambridge University Press.
- Berry B. L. J.**, 1964, « Cities as systems within systems of cities », *Papers of the Regional Science Association*, 13, pp. 147-163
- Beucher S., Reghezza M.**, 2004, *Les risques*, Bréal, sous la dir : Veyret Y., Paris, 205 p.
- Beucher S., Rode S.**, 2009, « L'aménagement des territoires face au risque d'inondation: regards croisés sur la Loire moyenne et le Val-de-Marne », *Mappemonde*, 94, pp. 1-19.
- Blaikie P., Cannon T., Davis I., Wisner B.**, 1994, *At Risk: Natural hazards, People's vulnerability, and disasters*, London, Routledge.
- Blancher P.**, 1998, Risques, ville et réseaux techniques urbains, *Risques et réseaux techniques urbains*, Collection du Certu, volume 18, 168 p.
- Boccaletti S., Latora V., Moreno Y., Chavez M., Hwang D. U.**, 2006, « Complex networks: Structure and dynamics », *Physics Reports*, 424, pp. 175-308.
- BOE**, 2001, Ley8/2011, por la que se establecen medidas para la proteccion de las infraestructuras criticas, Madrid (Spain), Congress of Spain : Boletín Oficial del Estado, 11p.
- Boin A., McConnell A.**, 2007, « Preparing for Critical Infrastructure Breakdowns: The Limits of Crisis Management and the Need for Resilience », *Journal of Contingencies and Crisis Management*, 15(1), pp. 50-59.

- Boin A., Comfort L. K., Demchak C. C.**, 2010, « The rise of resilience », in *Designing Resilience. Preparing for Extrem Events*, ed. Comfort L. K., Boin A., Demchak C., Pittsburgh, University of Pittsburgh Press, pp. 13-32.
- Bon R.**, 1979, « Allometry in topological structure of transportation networks », *Quality and Quantity*, 13(4), pp. 307-326.
- Brand F. S., Jax K.**, 2007, « Focusing the meaning(s) of resilience: resilience as a descriptive concept and a boundary object », *Ecology and Society*, 12(1).
- Breathnach P.**, 2000, « Globalisation, information technology and the emergence of niche transnational cities: the growth of the call centre sector in Dublin », *Geoforum*, 31(4), pp. 477-485.
- Bregt A., Crompvoets J.**, 2005, « Spatial Data Infrastructures: Hype or Hit? », *Evaluation*.
- Brenkert A., Malone E.**, 2004, « Modeling vulnerability and resilience to climate change: A case study of India and Indian States », *Climatic Change*, 72, pp. 57-102.
- Britton N. R., Clark G. J.**, 2000, « From response to resilience: emergency management reform in New Zealand », *Natural Hazards Review*.
- Brown T. J., Beyeler W. E., Barton D.**, 2004, « Assessing Infrastructure Interdependencies: The Challenge of Risk Analysis for Complex Adaptive Systems », *International Journal of Critical Infrastructures*, Vol. 1, 1, pp. 108-117.
- Brugnot G.**, 2001, *Gestion spatiale des risques*, Hermès, Lavoisier, Paris, 287 p.
- Bruneau M., Chang S. E., Eguchi R. T., Lee G. C., O'Rourke T. D., Reinhorn A. M., Shinozuka M.**, 2003, « A Framework to Quantitatively Assess and Enhance the Seismic Resilience of Communities », *Earthquake Spectra*, 19(4), pp. 733-752.
- BSI**, 2011, Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik.
- Buhl J., Gautrais J., Reeves N.**, 2006, « Topological patterns in street networks of self-organized urban settlements », *The European Physical Journal B*, 522, pp. 513-522.
- Cagnan Z., Davidson R., Guikema S.**, 2004, « Post-earthquake restoration modeling of electric power systems », *13th World Conference on Earthquake Engineering*, Vancouver.
- Cairncross F.**, 1998, « The death of distance: How the communications revolution will change our lives », *Journal of the American Society for Information Science*, 49(11).
- Cardillo M.**, 2010, *Structural Properties of Planar Graphs of Urban Street Patterns*, Thèse de doctorat, University of Catania.
- Cardona O. D.**, 2003, « The Need for Rethinking the Concepts of Vulnerability and Risk from Holistic Perspective: A Necessary review and Criticism for Effective Risk Management », in Bankoff G. and Frerks, D. H., *Mapping Vulnerability: Disasters, Development and People*, Earthscan Publishers, Londres.
- Carpenter S., Walker B., Anderies M., Abel N.**, 2001, « From metaphor to measurement: Resilience of what to what? », *Ecosystems*, 8(8), pp. 765-781.

- Carver S.E., Kingston R.A., Turton I., 2001**, « Public participation, GIS, and cyberdemocracy: evaluating on-line spatial decision support systems », *Environment and Planning B: Planning and Design*, 28(6), pp. 907-921.
- Casals M. R., Valverde S., Sole R. V., 2007**, « Topological vulnerability of the European power grid under errors and attacks », *International Journal of Bifurcation and Chaos*, vol. 17, pp. 2465 – 2475.
- Castells M., 2006**, *De la ville aux réseaux : dialogue avec Manuel Castells / Géraldine Pflieger*, Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne.
- CERTU, 2002**, *Concept « ville accessible à tous »*, Ministère de l'Équipement, des Transports, du Logement, du Tourisme et de la Mer, Centre d'études sur les réseaux, les transports, l'urbanisme et les constructions publiques, 15 p.
- CEU, 2008**, On the identification and designation of European critical infrastructures and the assessment of the need to improve their protection, Official Journal of the European Communities, Brussels (Belgium), Directive 114, 75 p.
- Chaline C., Dubois-Maury J., 2004**, *Les risques urbains*, 2e éd., A. Colin, Paris, 208 p.
- Chang L., Wu Z., 2011**, « Performance and reliability of electrical power grids under cascading failures », *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 33(8), Elsevier, pp. 1410-1419.
- Chang S. E., Seligson H. A., Eguchi R. T., 1996**, « Estimation of the Economic Impact of Multiple Lifeline Disruption: Memphis Light, Gas and Water Division Case study », *Technical Report No. NCEER-96-0011*, Buffalo, NY.
- Chang S. E., Shinozuka M., and Svelka W., 1999**, « Modeling Post – Disaster Urban Lifeline Restoration », in *Optimizing Post Earthquake Lifeline System Reliability: Proceedings of the 5th U.S. Conference on Lifeline Earthquake Engineering*, W.M. Elliott, P. McDonough, (eds), ASCE Technical Council on Lifeline Earthquake Engineering Monograph, No. 16, pp. 602 – 611.
- Chang S. E., Svelka W. D., Shinozuka M., 2002**, « Linking Infrastructure and Urban Economy: Simulation of Water-Disruption Impacts in Earthquakes », *Environment and Planning B: Planning and Design*, vol. 29, pp. 281 – 301.
- Chapelon L., 1996**, « Modélisation multi-échelles des réseaux de transport : vers une plus grande précision de l'accessibilité », *Mappemonde*, 3:2, 36.
- Chapelon L., 2012**, *Accessibilité*, Hypergeo.
- Chevreau F.R., Wybo J.L., 2007**, « Approche pratique de la culture de sécurité pour une maîtrise des risques industriels plus efficace », *Revue Française de Gestion*, n° 174 –2007/5, pp. 171-189.
- Choay F., 1994**, « Le règne de l'urbain et la mort de la ville », in J. Dethier, A. Guiheux (dir.), *La ville, art et architecture en Europe 1870-1993*, Paris, Editions du Centre G. Pompidou.
- Christensen C, Albert R., 2007**, « Using graph concepts to understand the organization of complex systems », *invited tutorial in the special issue "Complex Networks' Structure and Dynamics" of the International Journal of Bifurcation and Chaos*, 17, Issue 7, July 2007, edited by S. Boccaletti and V. Latora, 23 p.

- Cimellaro G. P., Reinhorn A. M., Bruneau M.**, 2010, « Framework for analytical quantification of disaster resilience », *Engineering Structures*, 32(11), Elsevier, p. 3639-3649.
- Claval P.**, 2005, « L'étude géographique des réseaux au croisement des théories de la communication et des relations institutionnalisées », Actes du Festival International de Géographie de 2005, Saint Dié des Vosges.
- Combes L., O'Shea M.**, 2012, The history of the national Electrical Grid in Ireland, Institute of the technology Blanchardstown, 15 p.
- Comfort L. K., Boin A., Demchak C.**, 2010, *Designing Resilience. Preparing fo Extrem Events*, Pittsburgh, University of Pittsburgh Press.
- Corcoran M.**, 2007, *Water, Drainage, People and Heritage*, Engineers Ireland, 14p.
- CPNI**, 2011, Centre for the Protection of National Infrastructure.
- Crotty W.**, 1998, « The Celtic tiger: Economic modernization and social and political ramifications in Ireland », Lille, France, *European Federation of Association and center of Irish Studies*.
- Crotty W.**, 2000, « Ireland: Economics and the Reinventing of a Nation », *Policy Studies Journal*, 28(4), pp. 799-814.
- Crucitti P., Latora V., Marchiori M., Rapisarda A.**, 2004, « Error and attack tolerance of complex networks », *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 340(1-3), pp. 388-394.
- Crucitti P., Latora V., Porta S.**, 2006, « Centrality measures in spatial networks of urban streets », *Physical Review E*, 73(3), pp. 1-5.
- Cumming G. S.**, 2011, *Spatial Resilience in Spatial-Ecological Systems*, 1st Edition, springer, 255 p.
- Cutter S., Barnes L., Berry M., Burton C., Evans E., Tate E., Webb J.**, 2008, « A place-based model for understanding community resilience to natural disasters », *Global Environmental Change*, 18(4), pp. 598-606.
- Dahlhamer J. M., Webb G. R., Tierney K. J.**, 1999, « Predicting business financial losses in the 1989 Loma Prieta and 1994 Northridge Earthquakes: implications loss estimation research », *Preliminary Paper No. 282, Disaster Research Center*, University of Delaware.
- Dal Pont J. P.**, 2010, « Sécurité et gestion des risques », *Techniques de l'ingénieur*, se12, 6 p.
- Dauphiné A.**, 2003, *Les théories de la complexité chez les géographes*, Economica.
- Dauphiné A.**, 2004, *Risques et catastrophes*, Paris, Armand Colin, 276 p.
- Dauphiné A., Provitolo D.**, 2007, « La résilience: un concept pour la gestion des risques », *Annales de Géographie*, n°654, pp. 115-125.
- Debarbieux B., Vanier M.**, 2002, *Ces territorialités qui se dessinent*, Datar et Éditions de l'Aube, Paris, 268 p.
- De Buijn K. M.**, 2005, « Resilience and flood risk management - A systems approach applied to lowland rivers », Thèse de doctorat, Delft University Press (Hydraulics select series), 210 p.

- De Bruijne M., Boin A., Van Eeten M.**, 2010, « Resilience exploring the concept and its meanings », in *Designing Resilience. Preparing for Extrem Events*, ed. Comfort L. K., Boin A., Demchak C., Pittsburgh, University of Pittsburgh Press, pp. 13-32.
- Defossez S.**, 2009, *Evaluation des mesures de gestion du risque inondation. Application au cas des basses plaines de l'Aude*, Thèse de doctorat de l'Université de Montpellier III, 420 p.
- Degardin F.**, 2002, « Urbanisation et inondations : de l'opposition à la réconciliation », *Bulletin de l'Association de géographes français*, n°1, p. 91-103.
- De Man W.H.**, 2008, « The multi-faceted nature of SDIs and their assessment - dealing with dilemmas », *A multi-view framework to Assess SDIs*, édité par Crompvoets J., Rajabifard A., Van Loenen B., Fernández T.D., pp. 23-49.
- Denègre J., Salgé F.**, 2004, *Les systèmes d'information géographique*, PUF, Que sais-je ?, 128 p.
- De Porcellinis S., Issacharoff L., Meloni S., Rosato V., Setola R., Tiriticco**, 2008, « Modelling interdependent infrastructures using interacting dynamical models », *International Journal of Critical Infrastructures*, vol. 4, pp. 63-79.
- De Rosnay J.**, 1975, *Le Macroscopie*, vers une vision globale, Seuil.
- Dodo A., Xu N., Davidson R., Nozick L.**, 2004, « Optimizing the selection of regional earthquake mitigation strategies », *World conference on earthquake*.
- Dong X. J.**, 2002, *The Seismic Performance Analysis of Electric Power Systems*, PhD Dissertation, University of Southern California.
- Dovers S. R., Handmer J. W.**, 1996, « A typology of resilience: rethinking institutions for sustainable development », *Industrial and Environmental Crisis Quarterly*, 9(4), pp. 482-511.
- Ducruet C.**, 2010, *Les mesures globales d'un réseau*, Synthèse du groupe FMR, 9 p.
- Dudenhoeffer D. D., Permann M. R., Manic M.**, 2006, CMIS: A framework for infrastructure interdependency modeling and analysis, 2006 Winter Simulation conference, 8 p.
- Dueñas-Osorio L.**, 2005, *Interdependent response of networked systems to natural hazards and intentional disruptions*, Dissertation, Georgia Institute of Technology, Atlanta: Georgia Tech Library.
- Duhigg C., Kocieniewski D.**, 2012, How apple sidesteps billions in taxes, quotidien The New York Times, ed. 28 avril 2012.
- Dupuy G.**, 1977, *Urbanisme et Technique, chronique d'un mariage de raison*, doctorat en sociologie de l'Université Paris V, sous la direction de L.-T. Vincent.
- Dupuy G.**, 1991, *L'urbanisme des réseaux*, Paris, A. Colin.
- Dupuy G., Offner J. M.**, 2005, « Réseau: bilans et perspectives », *Flux*, (4), pp. 38-46.
- EA-UK (Environment Agency United Kingdom)**, 2007, *Review of 2007 summer floods*, United-Kingdom.
- Ehlen M. A., Scholand A. J.**, 2005, « Modeling interdependencies between power and economic sectors using the N-ABLE agent based model », *IEEE Conference on Power Systems*, San Francisco, July 2005.

- Eisnor D. A.**, 2006, « What is neogeography anyway? », *Platial News and Neogeography*, billet de blog, 26 Mai 2006, <http://platial.typepad.com>
- Ellis G., Kim J.**, 2001, « City profile Dublin », *Cities*, 18(5), Elsevier, pp. 355-364.
- Environment Agency** (United Kingdom), 2007, *Improving the flood Performance of New Buildings, Flood Resilient Construction*, United-Kingdom, 96 p.
- EP Loire** (Etablissement Public Loire), 2006, Etude préalable à la réduction de la vulnérabilité des réseaux liée aux inondations en Loire Moyenne, 180 p.
- ERDF** (Electricité Réseau Distribution France), 2009, Bilan de la tempête Klaus, 29 Janvier 2009, 16 p.
- Eubank S., Guclu H., Anil Kumar V. S., Marathe M., Srinivasan A., Toroczkai Z., Wang N.**, 2004, « Modeling disease outbreaks in realistic urban social networks », *Nature*, 429(6998), pp. 180-184.
- Eusgeld I., Henzi D., Kröger W.**, 2008, *Comparative Evaluation of Modeling and Simulation Techniques for Interdependent Critical Infrastructures*, Scientific Report, Laboratory for Safety Analysis, Institute for Energy Technology, ETH Zürich.
- Eusgeld I., Kröger W., Sansavini G., Schläpfer M., Zio E.**, 2009, « The role of network theory and object-oriented modeling within a framework for the vulnerability analysis of critical infrastructures », *Reliability Engineering & System Safety*, 94(5), pp. 954-963.
- Eusgeld I., Nan C., Dietz S.**, 2011, « "System-of-systems" approach for interdependent critical infrastructures », *Reliability Engineering & System Safety*, 96(6), Elsevier, pp. 679-686.
- Fabiani J. L., Theys J.**, 1987, *La société vulnérable*, Presses de l'ENS.
- Ferber J.**, 2006, « Concepts et méthodologies multi-agents », in *Modélisation et simulation multiagents. Applications pour les sciences de l'Homme et de la Société*, Paris, Hermès Sciences - Lavoisier, Coll. science informatique et S.H.S., pp. 23-48.
- Ferras R.**, 1990, *Ville paraître, être à part*, RECLUS.
- Fiksel J.**, 2003, « Designing resilient, sustainable systems », *Environmental science & technology*, 37(23), pp. 5330-5339.
- Folke C.**, 2006, « Resilience. The emergence of a perspective for social-ecological systems analyses », *Global Environmental Change*, 16(3), pp. 253-267.
- Folke C. et al.**, 2002, *Resilience and Sustainable Development: Building Adaptive Capacity in a World of Transformations*, Environmental Advisory Council to the Swedish Government, Stockholm, Sweden.
- Galland J. P.**, 2010, « Critique de la notion d'infrastructure critique », *Flux* (3), pp. 6-18.
- Gallopin G. C.**, 2006, « Linkages between vulnerability, resilience and adaptive capacity », *Global Environmental Change*, 16(3), pp. 293-303.
- Gastner M. T., Newman M. E. J.**, 2006, « The spatial structure of networks », *The European Physical Journal B*, pp. 1-5.

- GSDSD (Greater Dublin Strategic Drainage Study), 2005, Final Strategy report, 200 p.
- GFCI, 2009, Global Financial Centers Index, London, 52 p.
- Gil J., Steinbach P., 2008, « From flood risk to indirect flood impact: evaluation of street network performance for effective management, response and repair », *First International Conference on Flood Recovery, Innovation and Response*, pp. 335–344.
- Gleyze J. F., 2005, *La vulnérabilité structurelle des réseaux de transports dans un contexte de risque*, Thèse de doctorat, Université Paris VII, Laboratoire COGIT-IGN, 826 p.
- Gleyze J. F., Reghezza M., 2007, « La vulnérabilité structurelle comme outil de compréhension des mécanismes d'endommagement », *Géocarrefour*, vol. 82/1-2.
- Gobin C., 2003, « Analyse fonctionnelle et construction », *Techniques de l'ingénieur*, 6 p.
- Godschalk D. R., 2003, « Urban Hazard Mitigation: Creating Resilient Cities », *Natural Hazards Review*, 4(3), pp. 136-143.
- GONW (Government Office for the North West), 2005, Carlisle storms and associated flooding, Multi-agency debrief report executive summary, United-Kingdom, 27 p.
- Gorman S. P., Schintler L., Kulkarni R., Stough R., 2004, « The Revenge of Distance: Vulnerability Analysis of Critical Information Infrastructure », *Journal of Contingencies and Crisis Management*, 12(2), pp. 48-63.
- Graham S., 2001, « Information Technologies and Reconfigurations of Urban Space », *International Journal of Urban and Regional Research*, pp. 405–410.
- Graham S., 2005, Web 2.0, <http://www.paulgraham.com/web20.html>, consulté Mars 2011.
- Grasland C., Potrykowska A., 2002 « Mesures de la proximité spatiale : les migrations résidentielles à Varsovie », *L'Espace géographique*, 3/2002 (tome 31), pp. 208-226.
- Grison L., 2004, « Les enjeux du Grand Dublin », *Mappemonde*, 75(3), pp. 73-75.
- Groupe Réseaux, 1987, Demande de création d'un Greco « réseaux » – Complément au dossier transmis au CNRS, juin 1987, *Réseaux fiables, réseaux vulnérables* – Compte rendu du 24 Juin 1987, Cahier n°9, pp. 15-29.
- Guézo B., Verrhiest G., 2006, Réduire la vulnérabilité urbaine aux risques majeurs, Techni. Cité, N° 108, 8 p.
- Gursesli O., Desrochers A. A., 2003, « Modeling infrastructure interdependencies using Petri nets », *IEEE International conference on Systems, Man, and Cybernetics*, Vol. 2, pp. 1506-1512.
- Haimes Y. Y., Horowitz B. M., Lambert J. H., Santos J. R., Lian C., Crowther K.G., 2005, « Inoperability input-output model (IIM) for interdependent infrastructure sectors: Theory and methodology », *Journal of Infrastructure Systems*, 11, pp. 67–79.
- Hamad K., Kikuchi S., 2002, « Developing a measure of traffic congestion: Fuzzy inference approach », *Transportation Research Record*, 182, Traffic Flow Theory and Highway Capacity, pp. 77-85.
- Heaslip K., Louisell W., Collura J., 2009, « A methodology to evaluate transportation resiliency for regional network », *88th Transportation Research Board Annual Meeting*, TRB, Washington, D.C.

- Hellstrom T.**, 2007, « Critical infrastructure and systemic vulnerability: Towards a planning framework », *Safety Science*, 45(3), pp. 415-430.
- 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 », *Espace géographique*, Tome 38, n°2, pp. 124-138.
- Hernandez J.**, 2010, *ReNew Orleans ? Résilience urbaine, mobilisation civique et création d'un "capital de reconstruction" à la Nouvelle Orléans après Katrina*, Thèse de doctorat, Université Paris X – Nanterre.
- Hillier B.**, 1996, *Space is the machine*, volume 18. Cambridge University Press.
- Hillier B., Hanson J.**, *The social logic of space*, volume 6, Cambridge University Press, 1984.
- Hines P., Cotilla-Sanchez E.**, 2010, « Do topological models provide good information about electricity infrastructure vulnerability? », *Chaos*, pp. 1-11.
- Hines P., Blumsack S., Sanchez E. C., Barrows C.**, 2010, « The Topological and Electrical Structure of Power Grids », *43rd Hawaii International Conference on System Sciences*, pp. 1-10.
- Holling C. S.**, 1973, « Resilience and stability of ecological systems », *Annual Review of Ecology and Systematics*, n°4, pp. 1-23.
- Holling C. S.**, 1996, « Engineering resilience vs. Ecological resilience », in Schulze P.C. (ed.), *Engineering within ecological constraints*, Washington DC : National Academy Press.
- Hollnagell E., Woods D. D., Leveson N.**, 2006, *Resilience Engineering : Concepts et Precepts*, Ashgate, 397 p.
- Holme P., Kim B. J., Yoon C. N., Han S. K.**, 2002, « Attack vulnerability of complex networks », *Physical review E, Statistical, nonlinear, and soft matter physics*, 65(5 Pt 2).
- Hottois G.**, 1986, *Le technocosme urbain. La ville comme thème de la philosophie de la technique*, 17^e Ecole Urbaine de l'ARAU, mars 1986, 11 p.
- Hubert G., Ledoux B.**, 1999, *Le coût du risque... L'évaluation des impacts socio-économiques des inondations*, Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, 232 p.
- Hudson-Smith A., Batty M., Crooks A., Milton R.**, 2009, Mapping for the masses. Accessing Web 2.0 through Crowdsourcing, *Social science computer review*, pp. 524-537.
- Huet P., Martin X., Prime J.L., Foin P., Laurain C., Cannard P.**, 2003, Retour d'expérience des crues de septembre 2002 dans les départements du Gard, de l'Hérault, du Vaucluse, des Bouches-du-Rhône, de l'Ardèche et de la Drôme, MEDD-IGE, 133 p.
- IAU-IDF (Institut d'aménagement et d'urbanisme en Ile-de-France)**, 2010, Zones inondables : des enjeux toujours plus importants en Ile-de-France, Note rapide, N° 516, 5p.
- Isumi M., Shibuya T.**, 1985, « Simulation of Post-Earthquake Restoration for Lifeline Systems », *International Journal of Mass Emergencies and Disasters*, pp. 87-105.
- Izraelwicz E.**, 1999, Après les tempêtes, les risques de « Réseupolis », *Quotidien Le Monde*, ed. 31 décembre 1999.

- Jiang B., Claramunt C.**, 2004, « A Structural Approach to the Model Generalization of an Urban Street Network », *GeoInformatica*, 8(2), pp. 157-171.
- Johansson J.**, 2010, *Risk and Vulnerability Analysis of Interdependent Technical Infrastructures: addressing Socio-Technical Systems*, doctoral thesis, Lund University, 163 p.
- Johansson J., Hassel H.**, 2010, « An approach for modelling interdependent infrastructures in the context of vulnerability analysis », *Reliability Engineering & System Safety*, 95(12), Elsevier, pp. 1335-1344.
- Joliveau T.**, 2010, « La géographie et la géomatique au crible de la néogéographie », *Tracés. Revue de sciences humaines*.
- Kanno T., Fijii T., Watari R., Furuta K.**, 2011, Modeling and simulation of a service system in a disaster to assess its resilience, *Proceedings of the fourth resilience engineering symposium*, Nice, France, Presses des Mines, collection sciences économiques, pp. 128-134.
- Kaplan S., Garrick B. J.**, 1981, « On the Quantitative Definition of Risk », *Risk Analysis*, 1(1), pp. 11-27.
- Kervern G. Y., Pateyron E.**, 1995, « Quelques outils de cyndinique urbaine », *Bulletin de l'Association des Géographes Français (Risques naturels, risques urbains)*, Vol. 2, pp. 183-192.
- Kinney R., Crucitti P., Albert R., Latora V.**, 2005, « Modeling Cascading Failures in the North American Power Grid », *The European Physical Journal B-Condensed Matter and Complex Systems*, 46(1), Springer, pp. 101-107.
- Klein R. J., Nicholls R. J., Thomalla F.**, 2003, « Resilience to Natural Hazards: How Useful is the Concept? », *Environmental Hazards*, Vol. 5, n°1-2, pp. 35-45.
- Kolp M., Pirotte A., Zimányi E.**, 1997, « Modélisation conceptuelle et ingénierie des systèmes d'information », In *Actes des Journées Francophones Sciences de la Cognition vers les Applications*, Villeneuve d'Ascq, France, 7 p.
- Kordic V.**, 2008, *Petri Net, Theory and Applications*, I-Tech Education and Publishing.
- Kozin F., Zhou H., Zhang R. H.**, 1991, « System Study of Urban Response and Reconstruction due to Earthquake », *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, vol. 116, pp. 1959-1972.
- Kroger W.**, 2008, « Critical infrastructures at risk: A need for a new conceptual approach and extended analytical tools. », *Reliability Engineering and System Safety*, 93(12), pp. 1781-1787.
- Laborit H.**, 1971, *L'homme et la ville*, Paris, Flammarion, p. 215.
- Lair J.**, 2000, *Evaluation de la durabilité des systèmes constructifs du bâtiment*, Thèse de doctorat, Université Blaise Pascal - Clermont 2, 213 p.
- Laganier R., Arnaud-Fassetta G.**, 2009, *Les géographies de l'eau – Processus, dynamique et gestion de l'hydrosystème*, L'Harmattan, Itinéraires géographiques, 298 p.
- Lajoie G.**, 2007, *Recherches en modélisation urbaine*, Habilitation à Diriger des Recherches, Université de La Réunion, 345 p.

- Lalanne L.**, 1863, « Théorie des réseaux de chemins de fer, fondée sur l'observation des faits et sur les Lois primordiales qui président au groupement des populations », *Compte Rendus de l'Académie des sciences*, pp. 206-210.
- Lannoy A.**, 2008, *Maitrise des risques et sûreté de fonctionnement. Repères historiques et méthodologiques*, Lavoisier, Sciences du risque et du danger, 128p.
- Laporte V.**, 2009, Croissance du nombre de logements en zones inondables, le points sur, Commissariat général au développement durable, N°6, 4 p.
- La Porte T.M.**, 2006, « Organizational Strategies for Complex System Resilience, Reliability, and Adaptation », in : Auerswald P.E. et al. (eds), *Seeds of Disaster, Roots of Response. How private action can reduce public vulnerability*, New York, Cambridge University Press, pp. 135-153.
- La Porte T. M.**, 2007, « Critical Infrastructure in the Face of a Predatory Future: Preparing for Untoward Surprise. », *Journal of Contingencies and Crisis Management*, 15(1), pp. 60-64.
- Laprie J. C., Kanoun K., Kaâniche K.**, 2007, « Modelling interdependencies between the electricity and information infrastructures », *26th International Conference on Computer Safety, Reliability and Security (SAFECOMP 2007)*, Nuremberg (Germany), pp. 54-67
- Latour B.**, 1999, *Politiques de la nature : Comment faire entrer les sciences en démocratie*, Paris, La Découverte.
- Leahy T.**, 2009, Flood Risk Management in Dublin, A strategic overview, Dublin City Council, September 2009 Meeting.
- Leahy T.**, 2011, Flood Risk in Dublin, Interim Report on Extreme Pluvial Flooding event 24th October 2011.
- Ledoux B.**, 2005, *La gestion du risque inondation*, Tec et Doc, 2005, 770 p.
- Lefevre H.**, 1970, *La révolution urbaine*, Gallimard, Paris, 1970 Paris.
- Lefrou C., Martin X., Labarthe J. P., Varret J., Maziere B., Tordjman R., Feunteun R.**, 2000, Les crues des 12, 13 et 14 Novembre 1999 dans les départements de l'Aude, des Pyrénées-Orientales et du Tarn, éditeur collection générale des Ponts et Chaussées, 145p.
- Leone F., Aste J. P., Velasquez E.**, 1995, « Contribution des constats d'endommagement au développement d'une méthodologie d'évaluation de la vulnérabilité appliquée aux phénomènes de mouvements de terrain », *Bulletin de l'Association de Géographes Français (Croissance urbaine et risques naturels)*, Vol. 4, pp. 350-371.
- Levy J., Lussault M.**, 2003, *Dictionnaire de la géographie et de l'espace des sociétés*, Saint-Just-la Pendue, Belin, 1034 p.
- Li W. Airriess C., Chen A. C. C., Leong K., Keith V.**, 2010, « Katrina and Migration: Evacuation and Return by African Americans and Vietnamese Americans in an Eastern New Orleans Suburb », *The Professional Geographer*, 62(1), pp. 103-118.
- Liberatore F., Scaparra M. P., Daskin M. S.**, 2011, « Analysis of facility protection strategies against an uncertain number of attacks: the stochastic R-interdiction median problem with fortification », *Computers and Operations Research*, 38, pp. 357-366.

- Lhomme S., Serre D., Laganier R., Diab Y.**, 2010, « Les réseaux techniques face aux inondations ou comment définir des indicateurs de performance de ces réseaux pour évaluer la résilience urbaine », *Le bulletin de l'association des Géographes français*, pp. 487-502.
- Lhomme S., Serre D., Diab Y., Laganier R.**, 2010b, « GIS development for urban resilience », *Sustainable City 2010*, 14 - 16 April, La Coruña, Spain, 11 p.
- Lhomme S., Serre D., Diab Y., Laganier R.**, 2010c, « Etude de la redondance des réseaux pour évaluer leur capacité à fonctionner en mode dégradé », *Conférence internationale SAGEO'10 Spatial Analysis and GEomatics 2010*, 17-19 nov 2010, Toulouse.
- Lhomme S., Serre D., Diab Y., Laganier R.**, 2010d, « La résilience : définitions et concepts voisins », *45è Congrès Société d'ergonomie de langue française, Fiabilité, résilience et adaptation*, 13-15 septembre 2010, Liège.
- Lhomme S., Serre D., Diab Y., Laganier R.**, 2010e, « Resilience : From ecology concept to urban application. A GIS for urban flood resilience », *25th International Conference on Environmental Science and Technology 2010*, American Academy of Sciences, Houston.
- Lhomme S., Serre D., Diab Y., Laganier R.**, 2010f, « A methodology for urban flood resilience assessment », *European Geosciences Union, Session NH9.13 "Natural Hazard Resilient Cities"*, 2-7 mai 2010, Vienne, Autriche.
- Lhomme S., Serre D., Laganier R., Diab Y.**, 2011a, « Apports de la théorie des graphes en géographie des risques : de nouveaux outils de modélisation, de compréhension et d'évaluation », *Les dixièmes rencontres de Théo Quant*, Besançon.
- Lhomme S., Serre D., Laganier R., Diab Y.**, 2011b, « L'étude des effets dominos de systèmes fortement interdépendants à l'aide de méthodes de Sécurité de Fonctionnement : Application aux réseaux techniques urbains en cas d'inondation », *XXIXe Rencontres Universitaires de Génie Civil*, Tlemcen, 29 au 31 Mai 2011, pp. 63-69.
- Lhomme S., Toubin M., Serre D., Laganier R., Diab Y.**, 2011c, « From technical resilience toward urban services resilience », *Proceedings of the fourth resilience engineering symposium*, Nice, France, Presses des Mines, collection sciences économiques, pp. 172-178.
- Lhomme S., Serre D., Diab Y., Laganier R.**, 2011d, « A methodology to produce interdependent networks disturbance scenarios », *International Conference on Vulnerability and Risk Analysis and Management*, 11-13 avril 2011, ASCE, University of Maryland, Hyattsville, MD, USA, 10 p.
- Lhomme S., Serre D., Diab Y., Laganier R.**, 2011e, « Network resiliency assessment integrating network interdependencies », *European Geosciences Union General, Assembly Session NH9.11 - Natural hazard resilient cities : methods and tools to qualify and quantify*, 2011, Vienna, Austria, 03 - 08 April 2011
- Lhomme S., Serre D., Laganier R., Diab Y.**, 2012a, « Penser la résilience urbaine dans un contexte de risques », In *Résilience urbaines, les villes face aux catastrophes*, Djament-Tran G., Reghezza-Zitt M. (eds.), éditions Le Manuscrit, pp. 331-349.
- Louiset O.**, 2011, *Introduction à la ville*, Armand Colin, Coll. Coursus, 256 p.
- Lussault M.**, 2000, « La ville des géographes », *la ville et l'urbain, l'état des savoir*, direction Paquot T., Body-Gendrot S., Lussault M., édition La Découverte.

- Mancebo F.**, 2006, « Du risque 'naturel' à la catastrophe urbaine : Katrina », *Vertigo*, 7(1), pp. 1-10.
- Manyena S. B.**, 2006, « The concept of resilience revisited », *Disasters*, 30(4), pp. 434-450.
- Matisziw T. C., Murray A. T., Grubestic T. H.**, 2008, « Exploring the vulnerability of network infrastructure to disruption », *The Annals of Regional Science*, 43(2), pp. 307-321.
- Mayunga J. S.**, 2007, « Understanding and Applying the Concept of Community Disaster Resilience : A capital-based approach », *Landscape Architecture*, pp. 22 - 28.
- McDaniels T., Chang S., Peterson K., Mikawoz J., Reed D.**, 2007, « Empirical Framework for Characterizing Infrastructure Failure Interdependencies », *Journal of Infrastructure Systems*, Vol. 13, No. 3, pp. 175-184.
- McEntire D., Fuller C., Johnson W., Weber R.**, 2002, « A comparison of disaster paradigms: The search for a holistic policy guide », *Public Administration Review*, 62, pp. 267-281.
- McLaran A.**, 1984, « Dublin: city profile », *Cities*, 1(6), pp. 543-550.
- McManus S., Seville E., Vargo J., Brunson D.**, 2008, « Facilitated Process for Improving Organizational Resilience », *Natural Hazards Review*, pp. 81-90.
- McNally R. K., Lee S. W., Yavagal D., Xiang W.-N.**, 2007, « Learning the critical infrastructure interdependencies through an ontology-based information system », *Environment and Planning B: Planning and Design*, 34(6), pp. 1103-1124.
- MEDD (Ministère de l'Environnement et du Développement Durable)**, 2005, Réduire la vulnérabilité des réseaux urbains aux inondations, 116 p.
- Mermet E.**, 2011, *Conception de méthodes et d'outils d'analyse spatiale pour l'organisation, l'exploration et la représentation d'informations géographiques sur un réseau de transport*, Thèse de doctorat, Université Paris-Est.
- Meschinet de Richemond N., Reghezza M.**, 2010, « La gestion du risque en France : contre ou avec le territoire ? », *Annales de géographie*, 673(3), pp. 248-267.
- Michel-Kerjan E.**, 2000, Risques à grande échelle dans les systèmes en réseaux : quelques interrogations, Série Scientifiques, Centre international de recherche en organisations (CIRADO), p. 26.
- Mileti D.**, 1999, *Disasters by Design*, Joseph Henry Press, Washington, D.C.
- Miller R. E., Polenske K. R., Rose A. Z.**, 1989, *Frontiers of input-output analysis*, Oxford University Press, New York.
- Mitchell T.**, 2005, *Web Mapping Illustrated*, O'Reilly Media, Sebastopol, Etats-Unis, 349 p.
- Morin E.**, 1990, *Introduction à la pensée complexe*, Paris : Ed. Du Seuil.
- Mortureux Y.**, 2001, « La sûreté de fonctionnement : méthodes pour maîtriser les risques », *Techniques de l'ingénieur*, AG 4 670, 9 p.
- Mortureux Y.**, 2005, « l'AMDE(C) », *Techniques de l'ingénieur*, SE 4040, 12 p.
- Motter A. E.**, 2004, « Cascade control and defense in complex networks », *Physical Review Letters*, 4 p.

- Murray A. T., Grubestic T. H.**, 2011, « Critical infrastructure protection: The vulnerability conundrum », *Telematics and Informatics*, 29(1), Elsevier, pp. 56-65.
- Murray-Tuite P.**, 2006, A comparison of transportation network resilience under simulated system optimum and user equilibrium conditions, Winter Simulation Conference.
- Musso P.**, 2003, *Critique des réseaux*, Paris, PUF.
- Na U. J., Shinozuka M.**, 2009, « Simulation-based seismic loss estimation of seaport transportation system, Reliability », *System Safety*, Volume 94, Issue 3, pp. 722-731.
- Nabaa M.**, 2011, *Morphodynamique de réseaux viaires, application au risque*, Thèse de doctorat, Université du Havre, 237 p.
- Newman M. E. J.**, 2003, « The structure and function of complex networks », *Siam Review* 45, pp. 167-256.
- NIPP**, 2009, National Infrastructure Protection Plan. US Department of Homeland Security. U.S. Department of Home Security, Washington DC (USA), 175 p.
- Nojima N., Kameda H.**, 1992, « Optimal Strategy by Use of Tree Structure for Post-earthquake Restoration of Lifeline Network Systems », *Proceedings of the 10th World Conference on Earthquake Engineering*, Balkema, Rotterdam, pp. 5541-5546.
- Nojima N., Ishikawa Y., Okumura T., Sugito M.**, 2001, « Empirical Estimation of Lifeline Outage Time in Seismic Disaster », *Proceedings of U.S.-Japan Joint Workshop and Third Grantee Meeting, U.S.-Japan Cooperative Research on Urban Earthquake Disaster Mitigation*, Seattle, WA., pp. 516-517.
- November V.**, 1994, « Risques naturels et croissance urbaine : réflexion théorique sur la nature et le rôle du risque dans l'espace urbain. », *Revue de géographie alpine*, 82(4), pp.113-123.
- November V.**, 2006, « Le risque comme objet géographique », *Cahiers de géographie du Québec*, 50(141), pp. 289-296.
- November V., Penelas M., Viot P.**, 2008, « L'effet Lully : un territoire à l'épreuve d'une inondation », *Cosmopolitiques*, vol. 17, pp. 89-106.
- November V.**, 2010, « "Risques territorialisés" ou "territorialité du risque"? Réflexion géographique autour de la relation risque-territoire », in *Risques et territoires: Interroger et comprendre la dimension locale de quelques risques contemporains*, Coanus (T.), Comby (J.), Duchêne (F.), Martinais (E), Paris: Lavoisier, pp. 275-286.
- Noyes D., Peres F.**, 2007, « Analyse des systèmes – Sûreté de Fonctionnement », *Techniques de l'ingénieur*, AG3520, 9 p.
- NTA (National Transport Authority)**, 2011, Greater Dublin Area, Draft Transport Strategy 2011-2030, 2030 vision, 188p.
- Offner J. M.**, 1990, « La représentation graphique des réseaux: outil heuristique ou innovation de gestion? », *Flux*, 6(2), pp. 61-65.
- Offner J. M.**, 2000, « Réseaux et dynamiques urbaines: le filigrane trompeur des maillages techniques », in *La ville et l'urbain, état des savoirs*, T. Paquot (dir.), éditions de la Découverte, pp. 137-145.

- Ollinger E.**, 2007, *Infrastructures critiques : construction d'une méthode d'identification*, thèse professionnelle, Master d'action publique, École des Ponts ParisTech, MEDAD.
- O'Rourke T. D.**, 2007, « Critical infrastructure, interdependencies and resilience », *The Bridge – The Journal of the National Academy of Science*, 37(1), pp. 22-31.
- O'Sullivan J. W.**, 1996, *Modelling and Identification of emergency reserve with applications to isolated power systems*, these de doctorat, University College Dublin, 151 p.
- Ouyang M., Dueñas-Osorio L.**, 2011, « An approach to design interface topologies across interdependent urban infrastructure systems », *Reliability Engineering & System Safety*. Elsevier.
- Ouyang M., Dueñas-Osorio L., Min X.**, 2012, « A three-stage resilience analysis framework for urban infrastructure systems », *Structural Safety*, 36-37: pp. 23-31.
- Pahwa S., Hodges A., Scoglio C., Wood S.**, 2010, « Topological analysis of the power grid and mitigation strategies against cascading failures », *Conference, 2010 4th*, 5.
- Paquot T.**, 2010, *L'urbanisme c'est notre affaire !*, L'Atalante.
- Parrochia D.**, 2001, *Penser les réseaux*, Champ Vallon, Collection Milieu, 267 p.
- Parrochia D.**, 2005, « Quelques aspects historiques de la notion de réseau », *Flux*, (4), pp. 10-20.
- Parry G., Moyser G., Day N.**, 1992, *Political participation and democracy in Britain*, Cambridge university press, Cambridge.
- Pasche E., Geisler T. R.**, 2005, « New strategies of damage reduction in urban areas prone to flood », *Urban flood management*, pp. 101-117.
- Pedersen P., Dudenhoefter D., Hartley S., Permann M.**, 2006, *Critical Infrastructure Interdependency Modeling: A Survey of U.S. and International Research*, Idaho National Laboratory.
- Péguy P. Y., Goffette-Nagot F., Schmitt B.**, 2000, « L'étalement urbain », *Economie géographique : les théories à l'épreuve des faits*, eds : Baumont C., Combes P.-P., Derycke P.-H., Jayet H., Paris : Economica, pp. 241-276.
- Pelling M.**, 2003, *The Vulnerability of Cities: social resilience and natural disaster*, Earthscan, London.
- Peng Z. R., Tsou M. H.**, 2003, *Internet GIS Distributed Geographic Information Services for the Internet and Wireless Networks*, Wiley, New Jersey, États-Unis, 679 p.
- Petit S.**, 2011, « Eau, assainissement, énergie, déchets : vers une ville sans réseaux ? », *Métropolitiques*, 14 décembre 2011, 4 p.
- Peyras L.**, 2009, *Evaluation de la performance et des risques des ouvrages hydrauliques de génie civil*, Mémoire d'HDR, université Blaise Pascal – Clermont II, décembre 2009, Clermont-Ferrand, France.
- Pigeon P.**, 2005, *Géographie critique des risques*, Economica, collection Anthropos, Paris, 217 p.
- Pimm S. L.**, 1984, « The complexity and stability of ecosystems », *Nature*, 307, pp. 321-326.

- Ponton A., Deniel J., Estienne J., Villevieille A., Bosc R.**, 1988, Rapport de la mission technique chargée de tirer les enseignements de la catastrophe de Nîmes du 3 octobre 1988, Secrétariat d'Etat chargé de la prévention des risques technologiques et naturels majeurs.
- Porta S., Crucitti P., Latora V.**, 2006a, « The network analysis of urban streets: a primal approach », *Environment and Planning B: Planning and Design*, 33(5), pp. 705-725.
- Porta S., Crucitti P., Latora V.**, 2006b, « The network analysis of urban streets: A dual approach », *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 369(2), pp. 853-866.
- Propeck-Zimmermann E.**, 2003, « L'inscription des risques dans l'Espace : difficultés d'appréhension et de représentation - l'exemple des risques industriels », *Les risques*, dir. Moriniaux V., Editions du Temps, pp 157-172.
- Prost T.**, 1994, *La ville, les risques et le génie urbain*, mémoire de DEA, Méthodes de conception en bâtiment, aménagement et techniques urbaines, INSA de Lyon.
- Prost T.**, 1999, *Le risque, frontière du génie urbain : identification et organisation des connaissances utiles pour l'aide à la décision dans les techniques urbains (Eau potable et assainissement)*, Thèse de doctorat, 189 p.
- Provitolo D.**, 2009, « Vulnérabilité et résilience : géométrie variable des deux concepts », *séminaire résilience urbaine de l'ENS*, Paris.
- Pumain D.**, 1997, « Pour une théorie évolutive des villes », *Espace géographique*, 1997/2.
- Pumain D., Saint-julien T.**, 1997, *L'analyse Spatiale, La localisation dans l'espace*, Paris.
- Quarantelli E. L.**, 1998, *What is a Disaster ? Perspective on the Question*, Routledge, Londres, 312 p.
- Rahman H. A., Beznosov K., Martí J. R.**, 2009, « Identification of Sources of Failures and their Propagation in Critical Infrastructures from 12 years of Public Failure Reports », *International Journal of Critical Infrastructures*, Vol. 5, No. 3, pp. 220-244.
- Rajabifard A., Williamson M. E. F., Feeney I. P.**, 2002, « Future directions for SDI development », *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 4(1), pp. 11-22.
- Ratti C.**, 2004, « Space syntax : some inconsistencies », *Environment and Planning B Planning and Design*, 31(4), pp. 487-499.
- Reghezza M.**, 2006, *Réflexions sur la vulnérabilité métropolitaine. La métropole parisienne face au risque de crue centennale*, Thèse de doctorat, Université Paris X - Nanterre.
- Reghezza M., Rufat S., Djament-Tran G., Leblanc A., Lhomme S.**, 2012, « What resilience is not : Resilience use and abuse », *Cybergeo*.
- Renard F., Chapon P. M.**, 2010, « Une méthode d'évaluation de la vulnérabilité urbaine appliquée à l'agglomération lyonnaise », *L'Espace Géographique*, n°1/2010, pp. 35-50.
- Rinaldi S. M., Peerenboom J. P., Kelly T. K.**, 2001, « Identifying, understanding, and analyzing critical infrastructure interdependencies », *IEEE Control Systems Magazine*, 21(6), pp. 11-25.
- Rinaldi S. M.**, 2004, « Modeling and simulating critical infrastructures and their interdependencies. », *37th Annual Hawaii International Conference on System Sciences 2004, Proceedings of the*, 00(C), 8 p.

- Robert B.**, 2004, « A method for the study of cascading effects within lifeline networks », *International Journal of Critical Infrastructures*, Vol. 1, No. 1, pp 86-99.
- Robert B., Morabito L.**, 2010, « An approach to identifying geographic interdependencies among critical infrastructures », *International Journal of Critical Infrastructures*, Vol. 6, No. 1, pp. 17-30.
- Rocher O.**, 1987, Les risques engendrés par une concentration de réseaux urbains, *Réseaux fiables, réseaux vulnérables* – Groupe Réseaux – Compte-rendu de la réunion du 24 Juin 1987, Cahier n°9, pp. 61-70.
- Roncayolo M.**, 1990, *La ville et ses territoires*, Paris, Gallimard.
- Rosales-Montano**, 2002, Différences et inégalités territoriales, quel lien avec la mobilité ? Réalités et perceptions analysées à partir des documents de planification et du discours d'acteurs dans l'aire urbaine de Lyon. Projet PUCA.
- Ross M. S.**, 2002, *Simulation*, Academic Press, USA.
- Rouzeau M., Martin X., Pauc J. C.**, 2010, Retour d'expérience des inondations survenues dans le département du Var les 15 et 16 Juin 2010, 87p.
- Rozenblat C., Cicille P.**, 2003, *Les villes européennes, analyse comparative*, DATAR – La Documentation française, 94 p.
- RTF-URR**, 2008, City profile: Climate and disaster resilience, Kyoto University.
- Ruas A., Perret J., Curie F., Mas A., Puissant A., et al.**, 2011, « Conception of a GIS platform to study and simulate urban densification based on the analysis of topographic data », *Advances in Cartography and GIScience Vol.1, Selection from 25th International Cartographic Conference (ICC'11)*, 3-8 July, Paris (France), pp. 413-430.
- Rufat S.**, 2007, « L'estimation de la vulnérabilité urbaine, un outil pour la gestion du risque. Approche à partir du cas de l'agglomération lyonnaise », *Géocarrefour*, vol 82, n°1-2, pp. 7-16.
- Rufat S.**, 2010, « Bucarest entre inertie et résilience, pérennité urbaine », in *traces*, ed. Harmattan, pp. 92-101.
- Ruin I.**, 2007, *Conduite à contre-courant. Les pratiques de mobilité dans le Gard : facteur de vulnérabilité aux crues rapides*, Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier de Grenoble, 362 p.
- Salagnac J. L.**, 2006, *Vulnérabilité des bâtiments à l'inondation : qualification du comportement des matériaux*, publication scientifique CSTB, 24 p.
- Sanders L.**, 2006, « Les modèles agents en géographie urbaine », in *Modélisation et systèmes multi-agents : applications pour les Sciences de l'Homme et de la Société*, Paris, Hermès Sciences - Lavoisier, Coll. science informatique et S.H.S., pp. 173-191.
- Santella N., Steinberg L. J., Parks K.**, 2009, « Decision Making for Extreme Events: Modeling Critical Infrastructure Interdependencies to Aid Mitigation and Response Planning », *Review of Policy Research*, 26(4), pp. 409-422.
- Santos J. R.**, 2006, « Inoperability input-output modeling of disruptions to interdependent economic systems », *Systems Engineering*, 9(1), pp. 20-34.

- Santos J. R., Haines Y. Y.**, 2004, « Modeling the demand reduction input-output (I-O) inoperability due to terrorism of interconnected infrastructures », *Risk Analysis* 24, pp. 1437-1451.
- Schelfaut K., Pannemans B., Van der Craats I., Krywkow J., Mysiak J., Cools J.**, 2011, « Bringing flood resilience into practice: the FREEMAN project », *Environmental Science & Policy*, 14(7), pp. 825-833.
- Schläpfer M., Kessler T., Kröger W.**, 2008, « Reliability analysis of electric power systems using an object-oriented hybrid modeling approach », *Proceedings of the 16th power systems computation conference*, Glasgow.
- Schmidt C. W.**, 1998, « The Specter of Sprawl », *Environmental Health Perspectives*, (6 vol. 106), pp. 274-279.
- Seligson H. A., Eguchi R. T., Lund L., Taylor C. E.**, 1991, « Survey of 15 Utility Agencies Serving the Areas Affected by the 1971 San Fernando and the 1987 Whittier Narrows Earthquakes », *Report Prepared for the NSF*.
- 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.
- Serre D., Peyras L., Curt C., Boissier D., Diab Y.**, 2007, « Assessment of civil engineering hydraulic infrastructures », *Canadian Geotechnical Journal*, n°44, pp. 1298-1313.
- Serre D., Peyras L., Tourment R., Diab Y.**, 2008, « Levee performance assessment: development of a GIS tool to support planning maintenance actions », *Journal of Infrastructure System*, ASCE, Vol. 14, Issue 3, pp. 201-213.
- Serulle N. U.**, 2010, *Transportation Network Resiliency : A Fuzzy Systems Approach*, Master Thesis, Utah State University, 95 p.
- Sfez L.**, 1991, *La communication*, Paris, PUF, coll. Que sais-je?
- SGDSN**, 2011, Secrétariat General de la Défense Nationale.
- Sheffy Y.**, 2007, « Building a resilient organization », *The Bridge –The Journal of the National Academy of Science*, 37(1), pp. 30-36.
- Shimbel A.**, 1953, « Structural parameters of communication networks », *Bulletin of Mathematical Biophysics*, 15(4), pp. 501-507.
- Shinozuka M., Rose A., Eguchi R. T.**, 1998, *Engineering and Socioeconomic Impacts of Earthquakes: An Analysis of Electricity Lifeline Disruptions in the New Madrid Area*, Monograph No.2, MCEER, Buffalo NY.
- Sigward E.**, 2002, *Introduction à la théorie des graphes*, Académie Metz-Nancy, 46 p.
- Strunz S.**, 2012, « Is conceptual vagueness an asset? Arguments from philosophy of science applied to the concept of resilience », *Ecological Economics*, vol. 76, pp. 112-118.
- Sudakov B., Vu V.**, 2008, « Local resilience of graphs », *Random Structures and Algorithms* 33, pp. 409-433.

- Ta C., Goodchild A. V., Pitera K.,** 2009, « Structuring a definition of resilience for the freight transportation system », *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2097, pp. 19-25.
- Tabucchi T., Davidson R., Brink S.,** 2008, « Restoring the Los Angeles water supply system following an earthquake », *14th World Conference on Earthquake Engineering*, China.
- Thadakamalla H. P., Albert R., Kumar S. R. T.,** 2007, « Search in spatial scale free networks », *New Journal of Physics*, 9.
- Théron P.,** 2011, Seven findings on critical infrastructures resilience, *CRITIS 2011, 6th International conference on critical information infrastructures security*, Lucerne.
- 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, Spécialité Science et Génie des Activités à risques.
- Thomas I.,** 1986, « Analyse spatiale et modèles de localisation optimale. Outils opérationnels d'aide à la décision », *Actes des colloques de l'AIDELF*, pp.139-153.
- Tierney K., Dahlhamer J.,** 1998, « Earthquake vulnerability and emergency preparedness among businesses », in *Engineering and Socioeconomic Impacts of Earthquakes: An Analysis of Electricity Lifeline Disruptions in the New Madrid Area*, Shinozuka M., Rose A., Eguchi R. (eds), Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research: Buffalo, NY, pp. 53-74.
- Tierney K., Bruneau M.,** 2007, « Conceptualizing and measuring resilience: a key to disaster loss reduction », *TR news*, pp. 14-18.
- Timmerman P.,** 1981, *Vulnerability: resilience, and the collapse of society: a review of models and possible climatic applications*, University of Toronto, Institute of Environment Studies.
- Tisseron S.,** 2009, *La résilience*, Que sais-je, PUF, 3^{ème} édition.
- Todini E.,** 2000, *Looped water distribution network design using a resilience index based heuristic approach*, Elsevier Science Ltd.
- Toroczkaï Z., Eubank S.,** 2005, « Agent-based modeling as decision-making tool », *Bridge*, Washington.
- Toubin M., Lhomme S., Diab Y., Serre D., Laganier R.,** 2012 « La Résilience urbaine : un nouveau concept opérationnel vecteur de durabilité urbaine ? », *Développement durable et territoires*, Vol. 3, n°1.
- Trouillard E.,** « Approches géographiques contemporaines de l'espace urbain », *Le Prisme*, 4 p.
- Tsou M., Battenfield B. P.,** 2002, « A Dynamic Architecture for Distributing Geographic Information Services », *Transactions in GIS*, 6, pp. 355-381.
- Turner A.,** 2006, *Introduction to Neogeography*, O'Reilly, London, p. 54.
- Turner A.,** 2007, « From axial to road-centre lines : a new representation for space syntax and a new model of route choice for transport network analysis », *Environment and Planning B : Planning and Design*, 34(3), pp. 539-555.

- UNISDR, 2011, *Towards Resilient cities - A guidance note on engaging urban poor*, New York and Geneva: United Nations publication.
- UNISDR, 2010, *Making Cities Resilient: addressing urban risk*, New York and Geneva: United Nations publication.
- UNISDR, 2005, *Hyogo Framework for Action 2005-2015: Building the Resilience of Nations and Communities to Disasters*, New York and Geneva: United Nations publication.
- UN-HABITAT (United Nations Human Settlements Programme), 2007, *State of the World's Cities 2007*.
- U.S.-Canada Power System Outage Task Force, 2004, *Final Report on the August 14, 2003 Blackout in the United States and Canada: Causes and Recommendations*.
- Valadas E., 2003, *Identification des scénarios de dégradations des chaussées bitumineuses épaisses*, Mémoire présenté pour l'obtention du diplôme d'ingénieur en génie civil, CUST, Université Blaise Pascal Clermont 2, 148 p.
- Vale J. V., Campanella T. J., 2005, *The Resilient City. How modern cities recover from disaster*, New York, Oxford University Press.
- Van Wassenhove W., Garbolino E., 2008, *Retour d'expérience et prévention des risques, Principes et méthodes*, Paris, Lavoisier, Tec et Doc, coll. « SRD Sciences du risque et du danger », série Notes de synthèse et de recherche.
- Veyret Y., 2003, *Les risques*, A. Colin, SEDES, 255 p.
- Veyret Y., Reghezza M., 2005, « Aléas et risques dans l'analyse géographique », *Annales des Mines, série responsabilité et environnement*, pp. 61-70.
- Villemeur A., 1998, *Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels. Fiabilité, facteurs humains, informatisation*, Collection de la Direction des Études et Recherches d'Électricité de France. Éd. Eyrolles, Paris.
- Vilmin T., 2008, *L'aménagement urbain en France. Une approche systémique*, CERTU, 250 p.
- Vinet F., 2010, *Le risque inondation, Diagnostic et gestion*, Éditions Tec & Doc Lavoisier, coll. « Science du Risque et du Danger (SRD) », 318 p.
- Vis M., Klijn F., De Bruijn K., 2003, « Resilience strategies for flood risk management in the Netherlands », *International Journal of river basin management*, 1(1), pp. 33-40.
- VTPI, 2008, *Evaluation transportation resilience: Evaluating the transportation system's ability to accommodate diverse, variable and unexpected demands with minimal risk*. TDM Encyclopedia.
- Walker B., Salt D., 2006, *Resilience thinking: Sustaining ecosystems and people in a changing world*, Washington DC: Island Press.
- Wallace D., Wallace R., 2008, « Urban systems during disasters: factors for resilience », *Ecology and Society*, 13(1):18.
- Wang J. W., Rong L. L., 2009, « Cascade-based attack vulnerability on the US power grid », *Safety Science*, 47(10), Elsevier, pp. 1332-1336.

- Wang J. W., Rong, L. L.,** 2011, « Robustness of the western United States power grid under edge attack strategies due to cascading failures », *Safety Science*, 49(6), Elsevier, pp. 807-812.
- Wang S., Sarker B., Mann Jr. L., Triantaphyllou E.,** 2004, « Resource planning and a depot location model for electric power restoration », *European Journal of Operational Research*, 155, pp. 22–43.
- Watts D. J., Strogatz S.,** 1998, « Collective dynamics of ‘small-world’ networks », *Nature*, 393, pp. 440-442.
- Wybo J. L.,** 2006, *Mémento sur la conduite du retour d’expérience*, document interne du ministère de l’Intérieur et de l’Aménagement du territoire, Direction de la Défense et de la Sécurité civiles, Sous-direction de la gestion des risques.
- Xu N., Guikema S., Davidson R. A., Nozick L. K., Cagnan Z., Vaziri K.,** 2007, « Optimizing scheduling of post-earthquake electric power restoration tasks », *Earthquake engineering and structural dynamics*, pp. 265-284.
- Yusta J. M., Correa G. J., Lecal-Arántegui R.,** 2011, « Methodologies and applications for critical infrastructure protection: State-of-the-art », *Energy Policy*, 39(10), pp. 6100-6119.
- Zevenbergen C., Cashman A., Evelpidou N., Pasche E., Garvin S., Ashley R.,** 2010, *Urban flood management*, CRC press, Taylor & Francis Group, 322 p.
- Zimmerman R., Restrepo C. E.,** 2006, « The next step: quantifying infrastructure interdependencies to improve security », *International Journal of Critical Infrastructure*, Vol. 2, No. 2/3, pp. 215-230.
- Zwingelstein G.,** 1996, *La maintenance basée sur la fiabilité*, Collection Diagnostic et Maintenance, Hermès.
- Zwingelstein G.,** 2009, « Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels complexes – principaux concepts », *Techniques de l’ingénieur*, 6 p.

ANNEXES

ANNEXE 1

LES METHODES ISSUES DE LA SURETE DE FONCTIONNEMENT

Il est question dans cette annexe de présenter succinctement les méthodes issues de la Sûreté de Fonctionnement. En effet, ces méthodes permettent de modéliser le fonctionnement de systèmes complexes. Or, les interrelations entre différents réseaux techniques définissent des systèmes complexes composés de plusieurs infrastructures qu'il devient dès lors intéressant de modéliser et d'étudier à l'aide de ces méthodes. A noter, que cette revue ne prétend à l'exhaustivité, car il existe de nombreuses méthodes (Dal Pont, 2010).

La sûreté de fonctionnement

Bien qu'il n'existe aucune certitude en matière de sûreté de fonctionnement, celle-ci tend précisément à minimiser les incertitudes. L'objectif final est finalement de pouvoir placer dans le système considéré une « confiance justifiée » (Dal Pont, 2010) et ce malgré les incertitudes qui l'entoure (probabilité de défaillance, effets non planifiés...). La sécurité exige alors de bien concevoir, bien construire, bien exploiter, bien maintenir l'outil industriel. Cette volonté de connaissances exhaustives – permettant d'allouer une confiance rationnelle dans la sûreté du système étudié – est à la base de la Sûreté de Fonctionnement. Cependant, la confiance dépend de ce à quoi on accorde de l'importance (innocuité, productivité, qualité... ?) et des valeurs relatives de ces caractéristiques. En cela, la sûreté de fonctionnement, bien que se plaçant dans une démarche rationnelle, ne peut se soustraire à des aspects plus subjectifs et cognitifs.

Parmi l'ensemble des méthodes issues de la sûreté de fonctionnement deux grandes familles de méthodes sont distinguées. Les méthodes inductives qui décrivent les relations entre composants en partant des causes pour en déduire les conséquences, et les méthodes déductives qui partent des conséquences pour remonter aux causes. Il est aussi possible distinguer les approches dynamiques et les approches statiques. Les approches statiques permettent d'analyser le système d'un point de vue structurel sans tenir compte des évolutions au cours du temps, tandis que les approches dynamiques prennent en compte les aspects temporels. Cependant, la distinction principale généralement opérée afin de distinguer les méthodes issues de la sûreté de fonctionnement distingue d'une part les approches quantitatives et d'autre part les approches qualitatives

Les méthodes qualitatives

Les méthodes qualitatives ne cherchent pas à quantifier les informations qu'elles manipulent. Ainsi, les conséquences ne sont pas évaluées et les événements ne sont pas probabilisés. Ces méthodes se placent alors dans le monde des possibles et non du probable. Elles constituent souvent une première étape qui sera par la suite suivie d'analyses plus quantitatives.

➤ *L'analyse préliminaire des dangers / des risques (APD/APR)*

Souvent ces deux méthodes sont présentées conjointement, elles peuvent néanmoins être différenciées car l'APR évalue une probabilité d'occurrence (cela explique le terme risque) contrairement à l'APD. L'APR est utilisée dans la phase préliminaire d'identification des risques. C'est une démarche essentiellement déductive. En effet, les accidents potentiels sont le point de départ de l'analyse. L'analyse Préliminaire des Risques nécessite d'identifier les éléments dangereux de l'installation, pour déterminer une ou plusieurs situations de dangers. Ainsi, pour chaque accident potentiel, les situations dangereuses qui peuvent précéder cet accident sont identifiées. Au-delà de cette identification, la description des mesures de prévention ou de protection demeure l'aboutissement habituel de la démarche. Pour résumer, cette méthode recherche les entités dangereuses, les événements pouvant la causer, les situations dangereuses et les accidents potentiels en découlant. Pour cela, la démarche dans laquelle rentre l'APR nécessite un recours important aux experts.

Le principal avantage de l'Analyse Préliminaire des Risques est de permettre un examen relativement rapide des situations dangereuses sur des installations, en écartant les situations aux conséquences jugées peu importantes. Elle est ainsi relativement économique en terme de temps passé et ne nécessite pas un niveau de description très détaillé du système étudié. Cet avantage est conjugué au fait qu'elle est généralement mise en œuvre au stade de la conception des installations. En revanche, l'APR ne permet pas de caractériser finement l'enchaînement des événements susceptibles de conduire à un accident majeur pour des systèmes complexes. En cela, elle s'éloigne de la sûreté de fonctionnement *stricto sensu*, elle est plutôt une première démarche généralement indispensable lorsque les questions de sécurité sont abordées.

➤ *L'analyse des modes de défaillance et de leurs effets (AMDE)*

L'AMDE est une Méthode apparue dans les années 60 dans le milieu industriel de l'aéronautique. C'est une méthode inductive d'analyse des défaillances potentielles d'un système. Ainsi, elle considère chacun des composants du système et analyse ses modes de défaillances. 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. Les résultats sont finalement présentés sous forme d'un tableau, spécialement conçu pour le système étudié. Il n'existe donc pas un unique tableau AMDE. Cependant, ce tableau comporte au minimum les composants, les fonctions qui y sont associées, les

modes de défaillance, leurs causes et leurs effets (Tab. A1.1). Théoriquement, l'AMDE répond à une logique de production industrielle, afin de limiter les défaillances liées aux phases de fabrication. C'est pourquoi, il est possible de distinguer l'AMDE produit, l'AMDE processus et l'AMDE moyen (cette dernière est assez rare).

Composant	Fonctions	Défaillances	Causes	Effets

Tableau A1.1 : Exemple d'un tableau type AMDE.

Compte tenu de sa prétention à l'exhaustivité, l'AMDE est une démarche qui est souvent longue et fastidieuse. Elle regroupe généralement un ensemble de spécialistes, d'experts, de *risk-managers* et requiert différentes étapes : une analyse fonctionnelle, une analyse structurelle, une analyse des modes de défaillance, une analyse des effets, et la synthèse dans un tableau AMDE.

Plus précisément, l'analyse fonctionnelle est une étape préparatoire nécessaire à l'élaboration de l'AMDE. Sans vraiment faire partie de la méthode, cette analyse est néanmoins obligatoire afin de réaliser une AMDE. Cette analyse fonctionnelle est composée de deux analyses plus ou moins disjointes : l'analyse fonctionnelle externe et l'analyse fonctionnelle interne. L'analyse fonctionnelle externe du système décrit les finalités du système. Cette description est essentielle pour donner du sens à l'analyse des dysfonctionnements. L'objectif est alors de savoir si les fonctionnements identifiés sont conformes à ces exigences, empêchent la réalisation d'une fonction, dégradent l'accomplissement d'une fonction ou encore s'ils produisent un résultat différent par rapport au cahier des charges. Cette analyse est complétée par une analyse fonctionnelle interne qui décrit comment le système fonctionne quand celui-ci fonctionne « bien ». Elle est donc nécessaire pour évaluer les effets des modes de défaillance. La validation des analyses fonctionnelles existantes ou la réalisation d'analyses fonctionnelles est une étape d'initialisation nécessaire avant d'aborder l'AMDE *stricto sensu*.

Ensuite, l'AMDE comprend une décomposition du système avec le recensement des modes de défaillance susceptibles d'affecter chaque composant, puis une description des effets engendrés par ces modes de défaillance. La première étape va donc consister à décomposer le système en éléments plus petits, c'est l'analyse structurelle. Il faut alors choisir un niveau de décomposition (une échelle, une granularité) adéquat pour les besoins de l'analyse. Ainsi, une décomposition trop fine augmente inutilement la charge de travail et peut rendre plus difficile, sinon l'identification des modes de défaillance, du moins la prévision de leurs effets. Cette analyse aboutit à l'élaboration d'une liste de fonctions « élémentaires » (des sous-fonctions par rapport aux fonctions principales définies dans les analyses fonctionnelles), d'une liste de composants et d'une liste de sous-systèmes « élémentaires ». Chaque fonction (éventuellement chaque sous-système

ou chaque composant) étant affectée des différents modes de défaillance qu'elle peut connaître. La connaissance des modes de défaillance susceptibles d'affecter un « composant » est déterminante pour la qualité du résultat de l'AMDE. Cette connaissance s'appuie alors principalement sur des retours d'expérience, des expertises...

L'analyse des effets va consister à imaginer et à décrire ce qui va se passer dans le système quand le mode de défaillance étudié est apparu. C'est peut-être l'étape la plus délicate, car il faut être en mesure d'identifier exhaustivement tous les effets. Il peut s'agir d'effets (sur la sécurité du système ou de son environnement) qui peuvent ne pas être recensés. D'ailleurs, l'intérêt majeur d'une démarche systématique comme l'AMDE est de révéler des effets indirects auxquels le système n'a pas encore été confronté et que les concepteurs n'ont pas imaginés. L'intérêt est aussi de prévoir les interactions malheureuses entre des technologies ou des domaines habituellement étrangers les uns aux autres, car relevant de compétences différentes. Pour imaginer précisément ces effets, il peut alors être utile de passer par des étapes intermédiaires : rechercher les effets sur l'environnement immédiat du composant (ou sur les fonctions dans lesquelles le composant est impliqué), puis au niveau des sous-systèmes et enfin les effets finaux. L'AMDEC, contrairement à l'AMDE, propose alors de quantifier ces effets.

La conduite d'une analyse des modes de défaillance et de leurs effets sur un système réel conduit normalement à un volume très important de documentation. Ainsi, le tableau qui synthétise ces informations est primordial.

Plus qu'une méthode, l'AMDE est une véritable démarche qui permet d'analyser un système dans son ensemble et ce dans un contexte de risques. En revanche, la validation de l'AMDE qui peut difficilement être empirique est souvent difficile.

➤ *Méthode des Combinaisons des Pannes Résumées (MCPR)*

Cette méthode est généralement utilisée dans le prolongement de l'AMDE. Elle prend alors en considération les combinaisons des modes de défaillance produites par l'AMDE. C'est une méthode purement inductive, qui analyse en premier lieu les effets des modes de défaillance des composants, puis étudie les combinaisons de ces modes de défaillance, afin de définir des ensembles de pannes correspondant à des fonctionnements anormaux, ou à des événements indésirables pour les systèmes à analyser. Elle se décompose en quatre étapes :

- La décomposition du système et l'élaboration d'une AMDE pour chaque système élémentaire : pour chaque composant du système, ses modes de défaillances et leurs effets sur le système considéré ainsi que sur les autres systèmes sont identifiés.
- L'élaboration des pannes résumées internes (PRI) : l'ensemble des modes de défaillance qui ont les mêmes effets sur le système considéré ainsi que sur les autres systèmes sont identifiés. Ces modes de défaillances sont alors regroupés en des ensembles de pannes appelés « pannes résumées internes ».

- L'élaboration des pannes résumées externes (PRE) : suite au déroulement des étapes précédentes, tous les systèmes ont été analysés. Les pannes résumées internes d'autres systèmes peuvent alors affecter le fonctionnement du système étudié. Ces pannes sont nommées : « pannes résumées externes ».
- L'élaboration des pannes résumées globales (PRG) : une PRG englobe les pannes résumées internes, externes et/ou leurs combinaisons ayant les mêmes effets sur le système étudié que sur les autres systèmes.

Les méthodes quantitatives

➤ *La méthode des arbres des causes ou de défaillances (MAC/MAD)*

Ces deux méthodes sont des méthodes déductives, où il est question de partir de l'événement indésirable situé au sommet de l'arbre, pour en déduire les événements intermédiaires constituant la base de l'arbre. Ainsi, ces méthodes explicitent la façon dont des combinaisons d'événements ont conduit à la réalisation d'un accident. Plus précisément, ce sont des représentations logiques de l'analyse des causes d'un accident. En effet, chaque événement est relié à un autre par une relation logique (ou, et, si...). Ces arbres sont donc généralement réalisés après un accident. Le plus souvent ces méthodes sont quantitatives, mais rien n'empêche de les utiliser qualitativement (c'est d'ailleurs souvent le cas dans un premier temps).

La méthode des arbres de causes aide à découvrir au niveau organisationnel, les facteurs qui ont entraîné un accident et qui pourront engendrer d'autres accidents. En effet, un accident ne survient pas par hasard, il est l'aboutissement logique (seulement des connecteurs ET dans cette méthode) d'une série d'incidents. La construction d'un arbre de causes consiste à partir de l'événement final à remonter, étape par étape, en se demandant à chaque fois, quelle est la combinaison d'événements, d'actions, de décisions qui a provoqué l'événement immédiatement supérieur. Elle a été promue dans le domaine de la sécurité au travail et largement diffusée par l'INRS (Institut National de Recherche et de Sécurité) dans ce cadre.

La méthode des arbres de défaillances, quant à elle, a été élaborée au début des années 1960 par la compagnie américaine Bell Téléphone et fut expérimentée pour l'évaluation de la sécurité des systèmes de tir de missiles. Cette méthode est beaucoup plus formalisée que la précédente et repose sur l'algèbre de Boole. Chaque niveau d'événements est ainsi relié en cascade à l'aide de symboles correspondant à un ensemble d'opérateurs logiques (et, ou, si...). A chaque événement de base correspond alors une variable booléenne. A noter que l'arbre de défaillances, si tout a pu être imaginé, inclut tous les arbres de causes possibles. La détermination des événements étudiés peut être facilitée par la mise en œuvre de méthodes inductives (APR, AMDE...), qui mettent tous les événements de défaillances en évidence. Cette méthode consiste ensuite à se demander comment l'événement non désiré peut se produire, et ce (ainsi de suite)

jusqu'au niveau désiré. Comme les liens sont des fonctions logiques, la probabilité de l'événement « sommet » se déduit par algèbre booléenne des probabilités des événements « feuilles ».

➤ **La méthode des arbres de conséquences ou d'événements (MAE)**

L'analyse par arbres d'évènements a été développée au début des années 1970, pour l'évaluation des risques liés aux centrales nucléaires à eau légère. Particulièrement utilisée dans le domaine du nucléaire, son utilisation s'est étendue à d'autres secteurs d'activité. 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). *A contrario*, l'analyse par arbres d'évènements suppose la défaillance d'un composant ou d'une partie du système et s'attache à déterminer les événements qui en découlent. Ce raisonnement est représenté sous forme d'un schéma qui se lit usuellement de la gauche (une entrée unique : l'événement dont on cherche les conséquences) vers la droite (les événements « ultimes » dont l'événement étudié peut être une cause) en progressant de bifurcation en bifurcation, le nombre de branches croissant alors au fur et à mesure que l'on progresse vers les conséquences (en explorant à chaque fois les deux branches des alternatives qui s'ouvrent).

La démarche généralement retenue pour réaliser un arbre d'événements est la suivante :

- définir l'événement initiateur à considérer ;
- identifier les fonctions de sécurité prévues pour y faire face ;
- construire l'arbre ;
- décrire et exploiter les séquences d'évènements identifiées.

Pour construire les arbres d'événements, il convient de définir les fonctions de sûreté du système et les événements initiateurs. Deux approches sont alors possibles :

- une approche déductive basée sur la construction de l'arbre d'événements pour une fonction de sûreté considérée ;
- une approche inductive basée sur la méthode de combinaisons des pannes résumées (ou sur une AMDE) permettant la sélection des événements initiateurs avant la construction des arbres de conséquences.

Autrement dit, cette méthode ne se suffit pas à elle-même, elle nécessite au préalable l'utilisation de méthodes plus générales (AMDE, MAC...).

➤ **Le nœud papillon**

Le « Nœud Papillon » est une approche de type arborescente développée par la société Shell pour représenter les différentes étapes de la gestion de risques dans une installation. Cette méthode part de l'identification des dangers, puis décrit ensuite les

différentes menaces ainsi que les barrières et les causes pouvant aboutir à l'évènement redouté. De là, un certain nombre de mesures de prévention et de protection – qui seront traitées par l'organisation de gestion de crise – seront définies afin d'atténuer les conséquences de l'évènement redouté.

Pour cela, le nœud papillon est un outil qui combine un arbre de défaillances et un arbre d'évènements. Le point central du Nœud Papillon (Evénement Redouté Central ou événement majeur indésirable) désigne généralement une perte de confinement ou une perte d'intégrité physique (décomposition). Ainsi, la partie gauche du Nœud Papillon s'apparente à un arbre des défaillances s'attachant à identifier les causes de cette perte de confinement, tandis que la partie droite du Nœud Papillon s'attache à déterminer les conséquences de cet évènement redouté central tout comme le ferait un arbre d'évènements.

➤ ***Processus de Markov ou méthode de l'Espace des Etats (MEE)***

Cette méthode permet d'évaluer les principales caractéristiques de fiabilité et de disponibilité d'un système réparable. Elle a la particularité d'être dynamique. Ainsi, elle est capable de reproduire de manière correcte le fonctionnement et l'évolution d'un système au cours du temps, lorsqu'il est soumis à différents aléas (défaillance, réparations, événements extérieurs...). L'ensemble des composants sont représentés dans un nombre fini d'états. Dès que le nombre de composants et d'états est important l'utilisation de cette méthode devient difficile. Plus précisément, la première étape d'une analyse par processus de Markov consiste à identifier les différents états que le système peut présenter au cours de son exploitation (table de vérité). Ensuite, un graphe de Markov, qui associe à chaque état un taux de transition permettant le passage d'un état à l'autre, est défini. Une simulation de Monte-Carlo est nécessaire lorsque le processus est quelconque (par conséquent les taux de transition aussi). En revanche, lorsque le processus est markovien, (les taux de transition sont « constants »), le traitement analytique est « relativement » aisé.

ANNEXE 2

APPLICATION DES METHODES ISSUES DE LA SURETE DE FONCTIONNEMENT

Cette annexe ajoute des éléments concernant l'application des méthodes issues de la Sûreté de Fonctionnement. Le tableau AMDE revêt notamment une importance particulière, puisque par la suite c'est par l'analyse de ce tableau que les scénarios d'interdépendance sont produits.

Les Blocs diagrammes fonctionnels

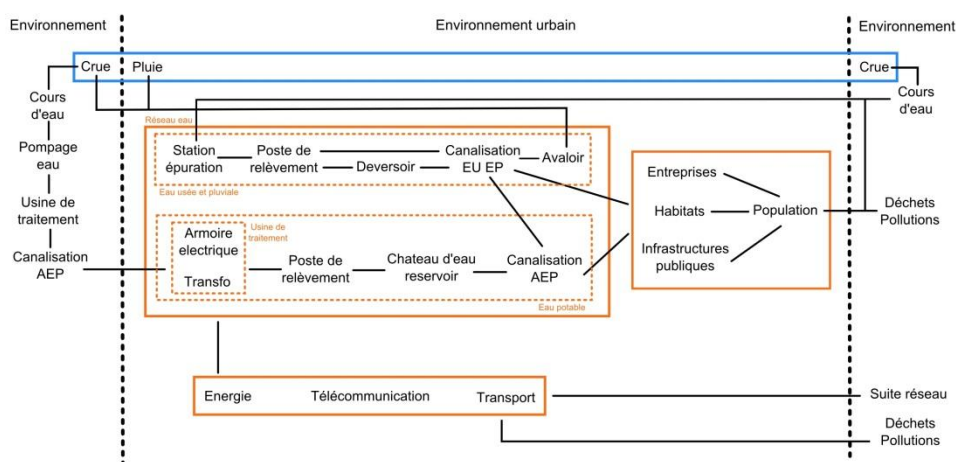


Figure A2.1 : Bloc Diagramme Fonctionnel (BDF) « contact » du réseau d'eau.

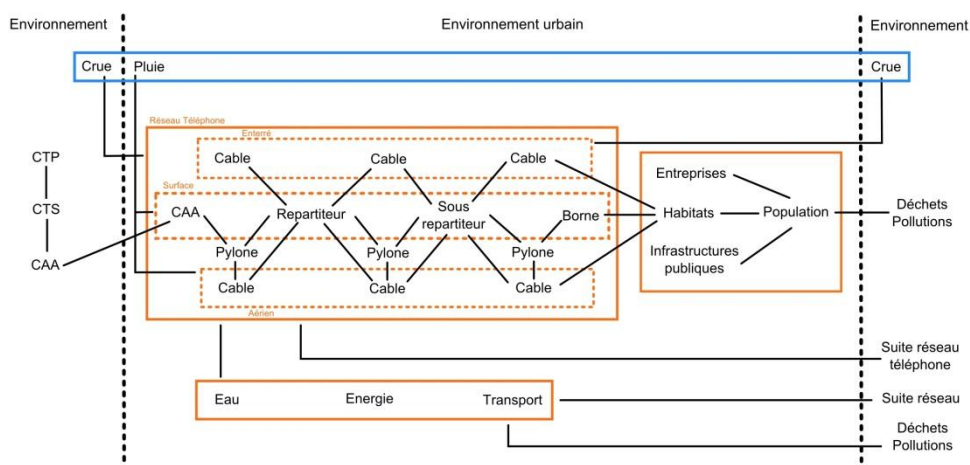


Figure A2.2 : Bloc Diagramme Fonctionnel (BDF) « contact » du réseau télécom.

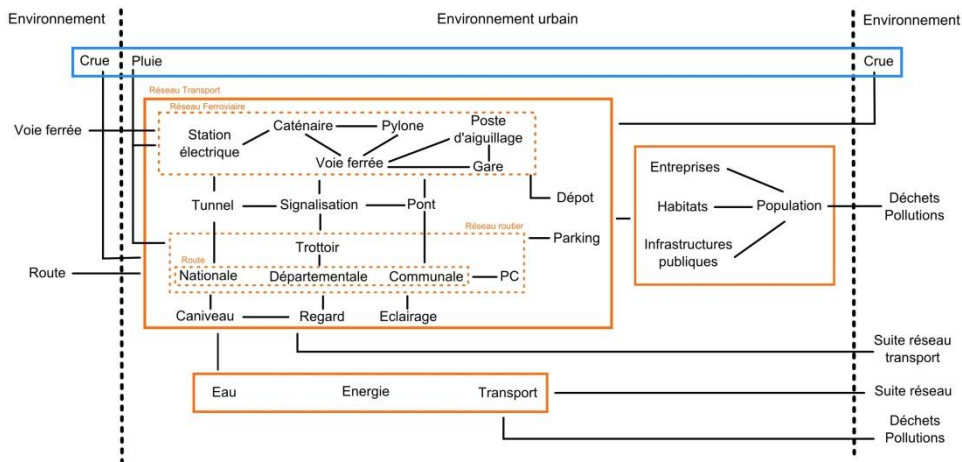


Figure A2.3 : Bloc Diagramme Fonctionnel (BDF) « contact » des réseaux routiers et ferrés.

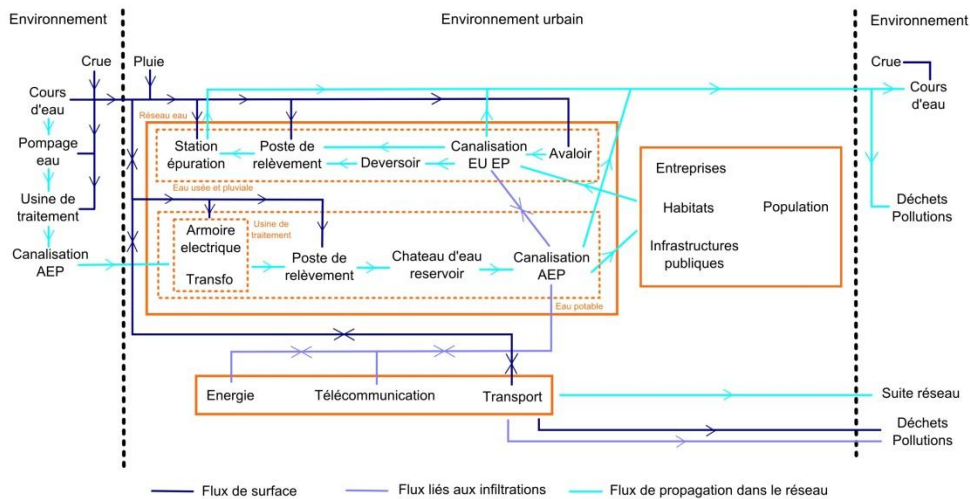


Figure A2.4 : Bloc Diagramme Fonctionnel (BDF) « flux hydrauliques » du réseau d'eau.

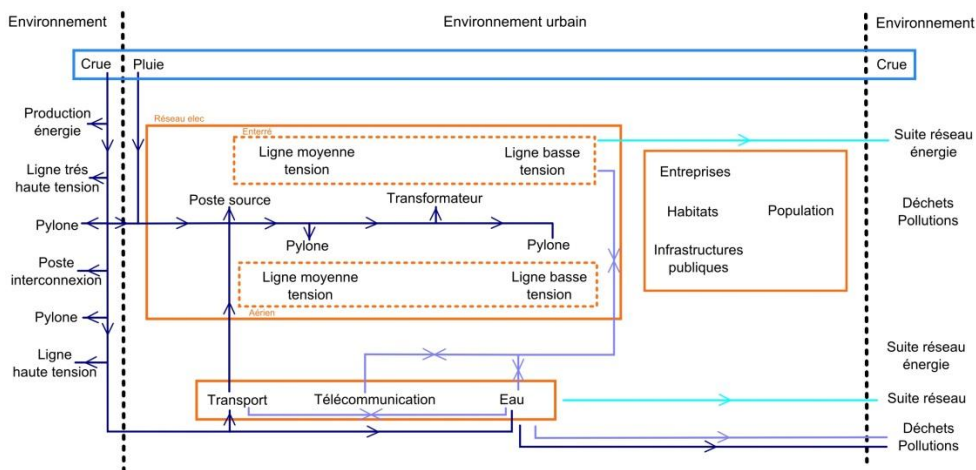


Figure A2.5 : Bloc Diagramme Fonctionnel (BDF) « flux hydrauliques » du réseau électrique.

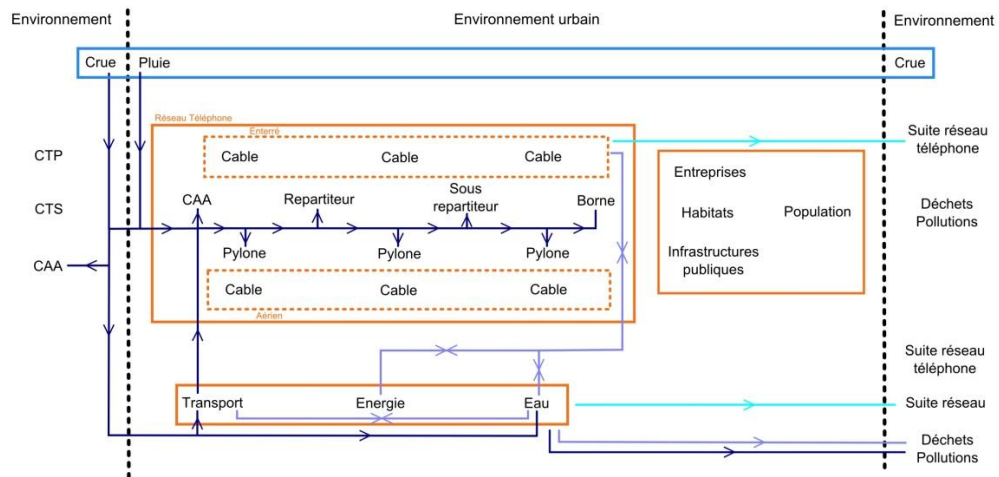


Figure A2.6 : Bloc Diagramme Fonctionnel (BDF) « flux hydrauliques » du réseau télécom.

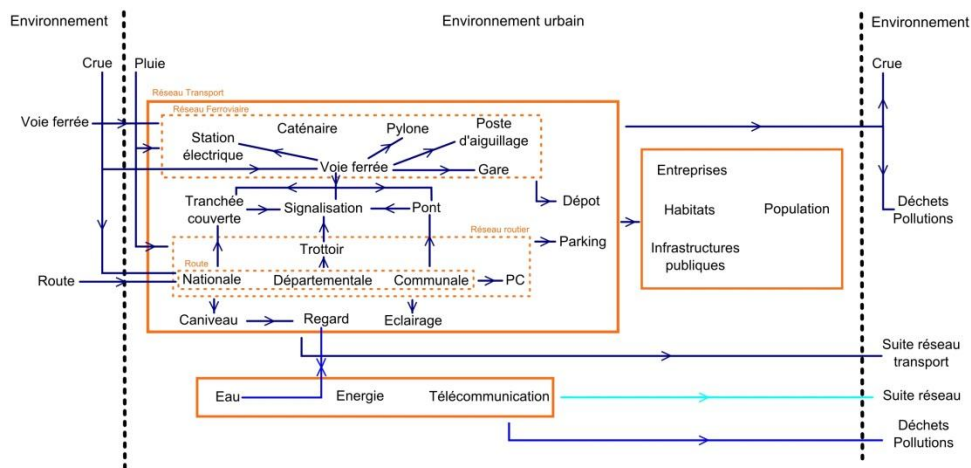


Figure A2.7 : Bloc Diagramme Fonctionnel (BDF) « flux hydrauliques » des réseaux routiers et ferrés.

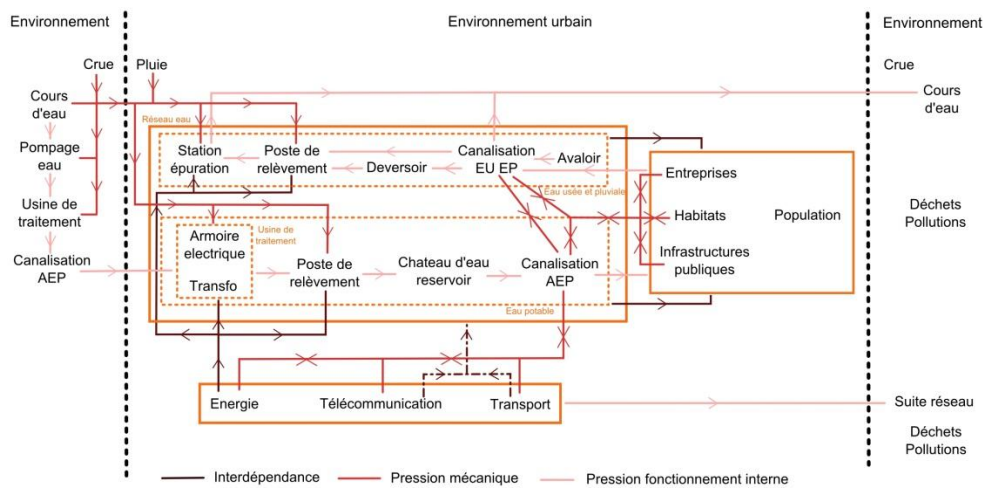


Figure A2.8 : Bloc Diagramme Fonctionnel (BDF) « vulnérabilité » du réseau d'eau.

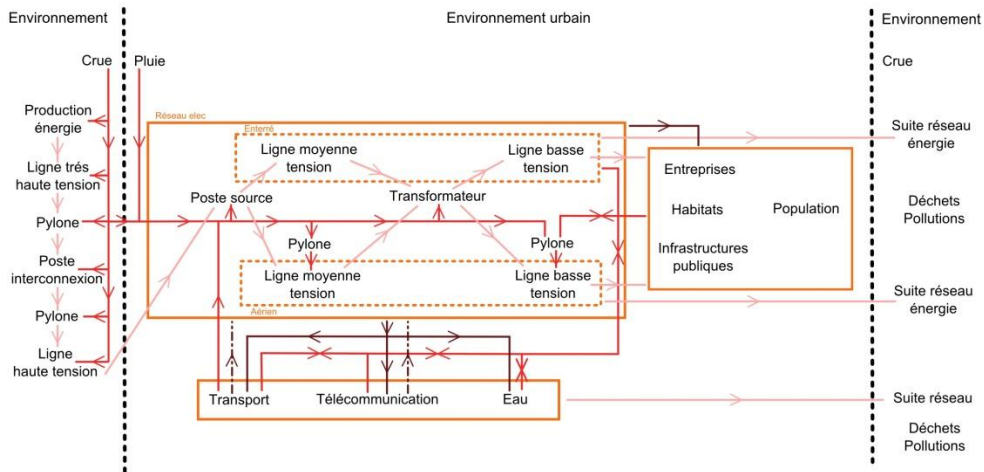


Figure A2.9 : Bloc Diagramme Fonctionnel (BDF) « vulnérabilité » du réseau électrique.

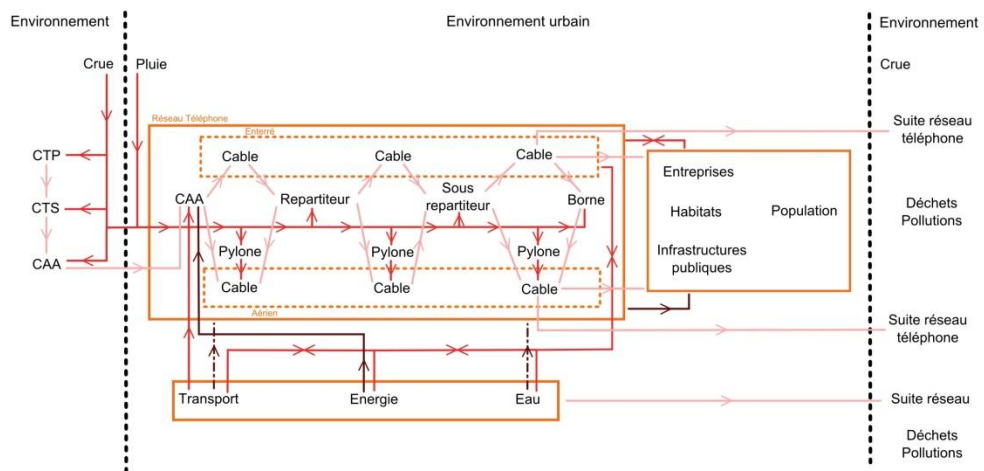


Figure A2.10 : Bloc Diagramme Fonctionnel (BDF) « vulnérabilité » du réseau télécom.

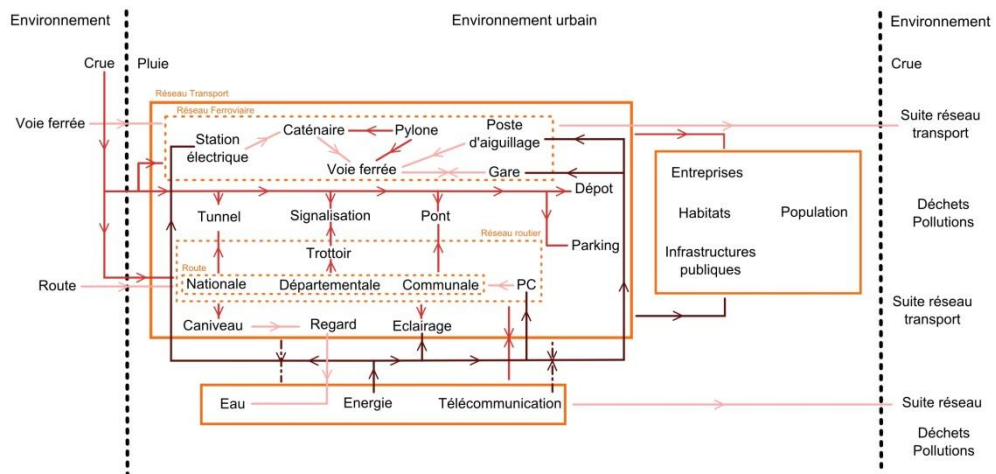


Figure A2.11 : Bloc Diagramme Fonctionnel (BDF) « vulnérabilité » des réseaux routiers et ferrés.

Le tableau AMDE

Réseau	Composant	Fonction	Défaillance	Causes	Effets
Energie	Ligne MT enterré	Assurer la continuité du service (1) Assurer le transport d'électricité	La fonction	Rupture de la ligne Endommagement de la ligne court-circuit	Perturbation alimentation interruption alimentation
		Résister aux flux hydrauliques (2) Limiter les flux d'infiltration provenant de la galerie	La fonction	ennoisement de la ligne problème étanchéité	court-circuit
		Résister aux sollicitations mécaniques (3) Résister aux pressions mécaniques des autres réseaux de la galerie Résister aux pressions mécaniques du réseau de transport	La fonction	déformation d'une canalisation voisine déformation de la chaussée	Rupture de la ligne Endommagement de la ligne
	Ligne BT enterré	Assurer la continuité du service (4) Assurer la distribution d'électricité	La fonction	Rupture de la ligne Endommagement de la ligne court-circuit	Perturbation alimentation interruption alimentation
		Résister aux flux hydrauliques (5) Limiter les flux d'infiltration provenant de la galerie	La fonction	ennoisement de la ligne problème étanchéité	court-circuit
		Résister aux sollicitations mécaniques (6) Résister aux pressions mécaniques des autres réseaux de la galerie Résister aux pressions mécaniques du réseau de transport	La fonction	déformation d'une canalisation voisine déformation de la chaussée	Rupture de la ligne Endommagement de la ligne
		Permettre le bon fonctionnement des autres composants urbains (7) Fournir l'énergie aux autres composants urbains	La fonction	Perturbation alimentation interruption alimentation	Perturbation vie des usagers Perturbation activité économique Perturbation des autres réseaux

	Transformateur	<p>Assurer la continuité du service (8) Permettre le transport d'électricité Adapter la tension Permettre la distribution d'électricité</p> <p>Résister aux flux hydrauliques (9) Limiter les flux d'infiltration provenant de la crue Résister aux pressions hydromécaniques de la crue Eviter submersion</p> <p>Résister aux sollicitations mécaniques (10) Résister aux pressions mécaniques des autres composants urbains Résister aux endommagements dus aux chocs des embâcles</p>	<p>La fonction</p> <p>La fonction</p> <p>La fonction</p>	<p>activation disjoncteur</p> <p>ennoisement du transfo problème étanchéité localisation (hauteur) du transfo</p> <p>Charriage d'éléments grossiers déformation surface contact au sol localisation (hauteur) du transfo</p>	<p>Perturbation alimentation interruption alimentation court-circuit</p> <p>activation disjoncteur</p> <p>ennoisement du transfo</p> <p>Détérioration du transfo</p>
	Poste source	<p>Assurer la continuité du service (11) Permettre le transport d'électricité Adapter la tension Permettre la distribution d'électricité</p> <p>Résister aux flux hydrauliques (12) Résister aux pressions hydromécaniques de la crue</p> <p>Résister aux sollicitations mécaniques (13) Résister aux pressions mécaniques des autres composants urbains Résister aux endommagements dus aux chocs des embâcles</p>	<p>La fonction</p> <p>La fonction</p>	<p>Problème d'approvisionnement Détérioration structure poste source</p> <p>Débit trop fort</p> <p>Charriage d'éléments grossiers Détérioration éléments voisins</p>	<p>Perturbation alimentation interruption alimentation</p> <p>Détérioration structure poste source</p> <p>Détérioration structure poste source</p>

	Ligne MT aérienne	<p>Assurer la continuité du service (14) Assurer le transport d'électricité</p> <p>Résister aux sollicitations mécaniques (15) Résister aux pressions mécaniques exercées par le pylône Résister aux pressions mécaniques des autres composants urbains</p>	<p>La fonction</p> <p>La fonction</p>	<p>Rupture de la ligne Endommagement de la ligne</p> <p>Chute ou inclinaison d'un pylône Déstabilisation d'un bâtiment</p>	<p>Perturbation alimentation interruption alimentation</p> <p>Rupture de la ligne Endommagement de la ligne</p>
	Ligne BT aérienne	<p>Assurer la continuité du service (16) Assurer la distribution d'électricité</p> <p>Résister aux sollicitations mécaniques (17) Résister aux pressions mécaniques exercées par le pylône Résister aux pressions mécaniques des autres composants urbains</p> <p>Permettre le bon fonctionnement des autres composants urbains (18) Livrer l'électricité aux composants urbains</p>	<p>La fonction</p> <p>La fonction</p> <p>La fonction</p>	<p>Rupture de la ligne Endommagement de la ligne</p> <p>Chute ou inclinaison d'un pylône Déstabilisation d'un bâtiment</p> <p>Perturbation alimentation interruption alimentation</p>	<p>Perturbation alimentation interruption alimentation</p> <p>Rupture de la ligne Endommagement de la ligne Chute ou inclinaison d'un pylône</p> <p>Perturbation vie des usagers Perturbation activité économique Perturbation des autres réseaux</p>
	Pylône	<p>Assurer la continuité du service (19) Permettre le transport d'électricité Assurer le support des lignes</p> <p>Résister aux flux hydrauliques (20) Résister aux pressions hydromécaniques de la crue</p> <p>Résister aux sollicitations mécaniques (21) Résister aux pressions mécaniques des autres composants urbains Résister aux endommagements dus aux chocs des embâcles</p>	<p>La fonction</p> <p>La fonction</p> <p>La fonction</p>	<p>Chute ou inclinaison du pylône</p> <p>Détérioration du pylône Débit trop fort Mauvaise ancrage au sol</p> <p>Effondrement d'un élément voisin Déformation surface contact au sol</p>	<p>Perturbation alimentation interruption alimentation Effondrement d'un élément voisin</p> <p>Chute ou inclinaison du pylône</p> <p>Détérioration du pylône Chute ou inclinaison du pylône</p> <p>Mauvaise ancrage au sol</p>

Eau potable	Usine de traitement	<p>Assurer la continuité du service (22) Assurer le traitement d'eau potable Permettre le transport d'eau potable</p> <p>Assurer les flux hydrauliques (23) Transmettre les flux hydrauliques</p> <p>Résister aux flux hydrauliques (24) Résister aux surcharges du réseau Résister aux pressions hydromécaniques de la crue</p> <p>Permettre le bon fonctionnement des autres composants urbains (25) Traiter l'eau nécessaire à la population</p>	<p>La fonction</p> <p>La fonction</p> <p>La fonction</p> <p>La fonction</p>	<p>Endommagement équipement Ennoiement équipements sensibles Augmentation traitement</p> <p>Dégradation eau brute Problème des stations de pompage Endommagement équipement</p> <p>Débit trop fort Infiltration d'eau dans l'usine</p> <p>Problème alimentation eau potable</p>	<p>Problème alimentation eau potable</p> <p>Augmentation traitement Problème alimentation eau potable</p> <p>Endommagement équipement Ennoiement équipements sensibles</p> <p>Problème sanitaire Perturbation vie des usagers</p>
	Armoire électrique	<p>Assurer la continuité du service (26) Permettre la distribution d'électricité Fournir de l'énergie</p> <p>Résister aux flux hydrauliques (27) Limiter les flux d'infiltration provenant de la crue Résister aux pressions hydromécaniques de la crue</p>	<p>La fonction</p> <p>La fonction</p>	<p>ennoiement du transfo ennoiement équipement</p> <p>problème étanchéité localisation (hauteur) de l'armoire</p>	<p>Perturbation alimentation électrique Interruption alimentation électrique</p> <p>ennoiement du transfo ennoiement équipement</p>
	Transformateur	<p>Assurer la continuité du service (28) Permettre le transport d'électricité Adapter la tension Permettre la distribution d'électricité</p> <p>Résister aux flux hydrauliques (29) Limiter les flux d'infiltration provenant de la crue</p>	<p>La fonction</p> <p>La fonction</p>	<p>activation disjoncteur Perturbation alimentation</p> <p>ennoiement du transfo problème étanchéité</p>	<p>Court-circuit</p> <p>activation disjoncteur</p>

	Poste de relèvement	<p>Assurer la continuité du service (30)</p> <p>Assurer le relèvement d'eau potable</p> <p>Permettre le transport d'eau potable</p> <p>Assurer les flux hydrauliques (31)</p> <p>Transmettre les flux hydrauliques</p> <p>Résister aux flux hydrauliques (32)</p> <p>Résister aux surcharges du réseau</p>	<p>La fonction</p> <p>La fonction</p> <p>La fonction</p>	<p>Endommagement pompe de relèvement</p> <p>Perturbation alimentation électrique</p> <p>Endommagement pompe de relèvement</p> <p>Débit trop fort</p>	<p>Problème alimentation eau potable</p> <p>Problème alimentation eau potable</p> <p>Endommagement pompe de relèvement</p>
	Canalisation AEP	<p>Assurer la continuité du service (33)</p> <p>Assurer le transport d'eau potable</p> <p>Assurer la distribution d'eau potable</p> <p>Assurer les flux hydrauliques (34)</p> <p>Transmettre les flux hydrauliques</p> <p>Résister aux flux hydrauliques (35)</p> <p>Résister aux surcharges du réseau</p> <p>Limiter les flux d'infiltration provenant de la galerie</p> <p>Résister aux pressions hydromécaniques de la galerie</p> <p>Résister aux sollicitations mécaniques (36)</p> <p>Résister aux pressions mécaniques des autres réseaux de la galerie</p> <p>Résister aux pressions mécaniques du réseau de transport</p> <p>Permettre le bon fonctionnement des autres composants urbains (37)</p> <p>Livrer l'eau jusqu'aux particuliers</p>	<p>La fonction</p> <p>La fonction</p> <p>La fonction</p> <p>La fonction</p> <p>La fonction</p>	<p>Rupture de la canalisation</p> <p>Fragilisation de la canalisation</p> <p>Contamination du réseau</p> <p>Fragilisation de la canalisation</p> <p>Contamination du réseau</p> <p>Débit trop fort</p> <p>Fragilisation de la canalisation</p> <p>problème étanchéité</p> <p>déformation d'une canalisation voisine</p> <p>déformation de la chaussée</p> <p>Perturbation alimentation</p> <p>Contamination du réseau</p>	<p>Problème alimentation eau potable</p> <p>Perte dans le réseau</p> <p>déformation d'une canalisation voisine</p> <p>Problème alimentation eau potable</p> <p>Rupture de la canalisation</p> <p>Fragilisation de la canalisation</p> <p>Contamination du réseau</p> <p>Rupture de la canalisation</p> <p>Fragilisation de la canalisation</p> <p>Perturbation vie des usagers</p> <p>Problème sanitaire</p> <p>Pollution</p>

	Réservoir (château d'eau)	<p>Assurer la continuité du service (38) Assurer le stockage d'eau potable Permettre le transport d'eau potable</p> <p>Assurer les flux hydrauliques (39) Transmettre les flux hydrauliques</p>	<p>La fonction</p> <p>La fonction</p>	<p>Perturbation en aval du réseau</p> <p>Problème alimentation eau potable</p>	<p>Problème alimentation eau potable</p> <p>Problème alimentation eau potable</p>
Assainissement	Avaloir	<p>Assurer la continuité du service (40) Permettre le transport de l'eau</p> <p>Assurer les flux hydrauliques (41) Collecter les flux hydrauliques</p> <p>Résister aux sollicitations mécaniques (42) Résister aux endommagements dus aux chocs des embâcles Résister aux pressions mécaniques du réseau de transport</p> <p>Permettre le bon fonctionnement des autres composants urbains (43) Evacuer l'eau de la voirie</p>	<p>La fonction</p> <p>La fonction</p> <p>La fonction</p> <p>La fonction</p>	<p>Obstruction avaloir</p> <p>Déformation avaloir</p> <p>Obstruction avaloir</p> <p>Déformations chaussée Embâcles nombreux</p> <p>Inondation</p>	<p>Perturbation du cycle urbain de l'eau</p> <p>Perturbation du cycle urbain de l'eau</p> <p>Obstruction avaloir Déformation avaloir</p> <p>Réseau de voirie devient le réseau d'eau</p>
	Déversoir	<p>Assurer la continuité du service (44) Permettre la décharge d'eau</p> <p>Assurer les flux hydrauliques (45) Collecter les flux hydrauliques</p>	<p>La fonction</p> <p>La fonction</p>	<p>Sous dimensionnement Embâcles en amont du système</p> <p>Sous dimensionnement Embâcles en amont du système</p>	<p>Accentuation risque inondation</p> <p>Accentuation risque inondation</p>

	Canalisation	<p>Assurer la continuité du service (46) Assurer le transport des eaux usées Assurer la distribution des eaux usées</p> <p>Assurer les flux hydrauliques (47) Evacuer les flux hydrauliques</p> <p>Résister aux flux hydrauliques (48) Résister aux surcharges du réseau Résister aux pressions hydromécaniques provenant de la galerie</p> <p>Résister aux sollicitations mécaniques (49) Résister aux pressions mécaniques des autres réseaux de la galerie Résister aux pressions mécaniques du réseau de transport</p> <p>Permettre le bon fonctionnement des autres composants urbains (51) Evacuer les eaux usées des autres composants urbains</p>	<p>La fonction Sous dimensionnement Fissuration canalisation Encombrement canalisation</p> <p>La fonction Surcharge d'eau pluviale et souterraine Encombrement canalisation Dépôt suite à la crue</p> <p>La fonction Surcharge d'eau pluviale et souterraine Coup de bélier</p> <p>La fonction Déformation d'une canalisation voisine Déformation de la chaussée</p> <p>La fonction Inondation</p>	<p>Inondation</p> <p>Rejet eau usée Rejet eau pluviale</p> <p>Fissuration canalisation Encombrement canalisation</p> <p>Fissuration canalisation Encombrement canalisation</p> <p>Perturbation du milieu urbain Pollution</p>
	Poste de relèvement	<p>Assurer la continuité du service (52) Assurer le relèvement des eaux usées Permettre le transport</p> <p>Assurer les flux hydrauliques (53) Transmettre les flux hydrauliques</p> <p>Résister aux flux hydrauliques (54) Résister aux surcharges du réseau</p>	<p>La fonction Endommagement pompe de relèvement</p> <p>La fonction Endommagement pompe de relèvement</p> <p>La fonction Débit trop fort</p>	<p>Perturbation alimentation</p> <p>Perturbation alimentation</p> <p>Endommagement pompe de relèvement</p>

	Station épuration	<p>Assurer la continuité du service (55) Assurer le traitement des eaux usées Recycler dans le milieu naturel</p> <p>Assurer les flux hydrauliques (56) Evacuer les flux hydrauliques</p> <p>Résister aux flux hydrauliques (57) Résister aux surcharges du réseau Résister aux pressions hydromécaniques de la crue</p> <p>Permettre le bon fonctionnement des autres composants urbain (58) Traiter l'eau avant retour dans l'environnement</p>	<p>La fonction</p> <p>La fonction</p> <p>La fonction</p> <p>La fonction</p>	<p>Surcharge hydraulique Submersion de la station Endommagent des équipements</p> <p>Endommagent des équipements</p> <p>Surcharge hydraulique Débit trop fort Situation géographique: bord cours d'eau</p> <p>Rejet direct des eaux usées</p>	<p>Rejet direct des eaux usées</p> <p>Rejet direct des eaux usées</p> <p>Endommagent des équipements</p> <p>Pollution du milieu naturelle Problème sanitaire</p>
Télécom	Borne	<p>Assurer la continuité du service (59) Assurer la distribution des communications</p> <p>Résister aux flux hydrauliques (60) Résister aux pressions hydromécaniques de la crue Eviter submersion</p> <p>Résister aux sollicitations mécaniques (61) Résister aux pressions mécaniques des autres composants urbains Résister aux endommagements dus aux chocs des embâcles</p> <p>Permettre le bon fonctionnement des autres composants urbains (62) Assurer la demande en communication</p>	<p>La fonction</p> <p>La fonction</p> <p>La fonction</p> <p>La fonction</p>	<p>Submersion de la borne Endommagement de la borne Infiltration Etanchéité borne Localisation (hauteur borne) Fort débit</p> <p>Charriage d'éléments grossiers Déformation surface contact au sol</p> <p>Perturbation communication Interruption communication</p>	<p>Perturbation communication Interruption communication</p> <p>Infiltration</p> <p>Endommagement de la borne</p> <p>Endommagement de la borne</p> <p>Perturbation vie des usager Problème pour l'alerte des secours</p>

	Répartiteur	<p>Assurer la continuité du service (63) Permettre le transport des communications Permettre la distribution des communications</p> <p>Résister aux flux hydrauliques (64) Résister aux pressions hydromécaniques de la crue Eviter la submersion</p> <p>Résister aux sollicitations mécaniques (65) Résister aux pressions mécaniques des autres composants urbains Résister aux endommagements dus aux chocs des embâcles</p>	<p>La fonction</p> <p>La fonction</p> <p>La fonction</p>	<p>Submersion répartiteur Endommagement répartiteur Infiltration</p> <p>Etanchéité répartiteur Localisation (hauteur borne) Fort débit</p> <p>Charriage d'éléments grossiers Déformation surface contact au sol</p>	<p>Perturbation communication</p> <p>Infiltration Endommagement de la borne</p> <p>Endommagement de la borne</p>
	CAA	<p>Assurer la continuité du service (66) Permettre le transport des communications Permettre la distribution des communications</p> <p>Résister aux flux hydrauliques (67) Résister aux pressions hydromécaniques de la crue</p> <p>Résister aux sollicitations mécaniques (68) Résister aux pressions mécaniques des autres composants urbains Résister aux endommagements dus aux chocs des embâcles</p> <p>Permettre le bon fonctionnement des autres composants urbains (69) Assurer la demande en communication</p>	<p>La fonction</p> <p>La fonction</p> <p>La fonction</p> <p>La fonction</p>	<p>Endommagement équipements Ennoiement équipements sensibles</p> <p>Fort débit Charriage d'éléments grossiers</p> <p>Charriage d'éléments grossiers Déstabilisation composants urbains</p> <p>Perturbation communication Interruption communication</p>	<p>Perturbation communication interruption communication</p> <p>Endommagement équipements Ennoiement équipements sensibles</p> <p>Endommagement équipements</p> <p>Perturbation vie des usager Perturbation des secours</p>

Télécom	Câble enterré	Assurer la continuité du service (70) Assurer la distribution des communications Assurer le transport des communications	La fonction	Rupture de la ligne Endommagement de la ligne	Perturbation alimentation interruption alimentation
		Résister aux flux hydrauliques (71) limiter les flux d'infiltration provenant de la galerie	La fonction	ennoisement de la ligne problème étanchéité	Endommagement de la ligne
		Résister aux sollicitations mécaniques (72) Résister aux pressions mécaniques des autres réseaux de la galerie Résister aux pressions mécaniques du réseau de transport	La fonction	déformation d'une canalisation voisine déformation de la chaussée	Rupture de la ligne Endommagement de la ligne
		Permettre le bon fonctionnement des autres composants urbains (73) Assurer la demande en communication	La fonction	Perturbation alimentation interruption alimentation	Perturbation vie des usagers Perturbation activité économique Perturbation des autres réseaux
	Câble aérien	Assurer la continuité du service (74) Assurer la distribution des communications Assurer le transport des communications	La fonction	Rupture de la ligne Endommagement de la ligne	Perturbation alimentation interruption alimentation
		Résister aux sollicitations mécaniques (75) Résister aux pressions mécaniques exercées par le pylône Résister aux pressions mécaniques des autres composants urbains	La fonction	Chute ou inclinaison d'un pylône Déstabilisation d'un bâtiment voisin	Rupture de la ligne Endommagement de la ligne
		Permettre le bon fonctionnement des autres composants urbains (76) Assurer la demande en communication	La fonction	Perturbation alimentation interruption alimentation	Perturbation vie des usagers Perturbation activité économique Perturbation des autres réseaux

	Pylône	<p>Assurer la continuité du service (77) Permettre le transport des communications Assurer le support des câbles</p> <p>Résister aux flux hydrauliques (78) Résister aux pressions hydromécaniques de la crue</p> <p>Résister aux sollicitations mécaniques (79) Résister aux pressions mécaniques des autres composants urbains Résister aux endommagements dus aux chocs des embâcles</p>	<p>La fonction</p> <p>La fonction</p> <p>La fonction</p>	<p>Chute ou inclinaison du pylône</p> <p>Détérioration du pylône Très fort débit hydraulique (crue éclair) Mauvaise ancrage au sol</p> <p>Charriage d'éléments grossiers Déformation surface contact au sol Effondrement d'un élément voisin</p>	<p>Perturbation alimentation interruption alimentation</p> <p>Chute ou inclinaison du pylône</p> <p>Détérioration du pylône Chute ou inclinaison du pylône</p>
Transport	Chaussée	<p>Assurer la continuité du service (80) Permettre le transport des véhicules</p> <p>Résister aux flux hydrauliques (81) Résister aux pressions hydromécaniques de la crue Eviter submersion</p> <p>Résister aux sollicitations mécaniques (82) Résister aux pressions mécaniques des autres composants urbains Résister aux endommagements dus aux chocs des embâcles</p> <p>Permettre le bon fonctionnement des autres composants urbains (83) Assurer la circulation (les échanges) de flux</p>	<p>La fonction</p> <p>La fonction</p> <p>La fonction</p> <p>La fonction</p>	<p>Submersion des voies Endommagement des voies Encrassement de la voirie</p> <p>Débordement réseau assainissement Fort débit Type et état de la voirie Voirie non surélevé</p> <p>Type et état de la voirie Destabilisation autres réseaux Charriage d'éléments grossiers Effondrement d'un élément voisin</p> <p>Perturbation circulation</p>	<p>Perturbation circulation Mise en danger des usagers</p> <p>Submersion des voies Endommagement des voies Encrassement de la voirie</p> <p>Endommagement des voies Encrassement de la voirie</p> <p>Aggravation crise Dangerosité augmenté Perturbation activité économique Perturbation approvisionnement</p>

	Trottoir	<p>Assurer la continuité du service (84) Permettre le transport des personnes</p> <p>Résister aux flux hydrauliques (85) Résister aux pressions hydromécaniques de la crue Eviter submersion</p> <p>Résister aux sollicitations mécaniques (86) Résister aux pressions mécaniques des autres composants urbains Résister aux endommagements dus aux chocs des embâcles Résister aux déformations de la route</p> <p>Permettre le bon fonctionnement des autres composants urbains (87) Assurer la circulation protégée des personnes</p>	<p>La fonction</p> <p>La fonction</p> <p>La fonction</p> <p>La fonction</p>	<p>Submersion trottoir Endommagement des trottoirs Encrassement des trottoirs Débordement réseau assainissement Fort débit Type et état du trottoir Type et état de la voirie Destabilisation autres réseaux Charriage d'éléments grossiers Effondrement d'un élément voisin Perturbation circulation</p>	<p>Perturbation circulation Mise en danger des usagers Submersion trottoir Endommagement des trottoirs Encrassement des trottoirs Endommagement des trottoirs Encrassement des trottoirs Perturbation usagée Dangerosité augmentée</p>
	Caniveau	<p>Assurer la continuité du service (88) Assurer l'évacuation l'eau</p> <p>Assurer les flux hydrauliques (89) Drainer les flux hydrauliques</p> <p>Résister aux sollicitations mécaniques des autres réseaux (90) Résister aux endommagements dus aux chocs des embâcles</p> <p>Permettre le bon fonctionnement des autres composants urbains (91) Assurer le bon fonctionnement du réseau routier</p>	<p>La fonction</p> <p>La fonction</p> <p>La fonction</p> <p>La fonction</p>	<p>Obstruction caniveau Déformation caniveau Obstruction caniveau Déformation caniveau Déformations chaussée Embâcles nombreux Inondation</p>	<p>Perturbation du cycle urbain de l'eau Perturbation du cycle urbain de l'eau Obstruction caniveau Déformation caniveau Réseau de voirie devient le réseau d'eau</p>

	Regard\avaloir	<p>Assurer la continuité du service (92) Assurer l'évacuation l'eau</p> <p>Assurer les flux hydrauliques (93) Evacuer les flux hydrauliques</p> <p>Permettre le bon fonctionnement des autres composants urbains (94) Assurer le bon fonctionnement du réseau d'eaux usées Assurer l'interface entre l'extérieur et les autres réseaux</p>	<p>La fonction Obstruction Regard</p> <p>La fonction Obstruction Regard</p> <p>La fonction Perturbation intervention assainissement</p>	<p>Perturbation intervention assainissement</p> <p>Perturbation intervention assainissement</p> <p>Aggravation de la crise</p>
	Eclairage	<p>Assurer la continuité du service (95) Assurer l'éclairage</p> <p>Résister aux flux hydrauliques (96) Limiter les flux d'infiltration provenant de la crue Résister aux pressions hydromécaniques de la crue</p> <p>Résister aux sollicitations mécaniques (97) Résister aux pressions mécaniques des autres composants urbains Résister aux endommagements dus aux chocs des embâcles Résister aux déformations du trottoir</p> <p>Permettre le bon fonctionnement des autres composants urbains (98) Assurer la circulation protégée des flux</p>	<p>La fonction Détérioration Eclairage Problème électrique</p> <p>La fonction Mauvaise état de la signalisation Très fort débit hydraulique (crue éclair) Mauvaise ancrage au sol</p> <p>La fonction Charriage d'éléments grossiers Déformation surface contact au sol Effondrement d'un élément voisin</p> <p>La fonction Problème de circulation</p>	<p>Problème de circulation</p> <p>Détérioration Eclairage Problème électrique</p> <p>Détérioration signalisation Problème électrique</p> <p>Problème sécurité des personnes</p>

	Signalisation	<p>Assurer la continuité du service (99) Permettre le transport des flux</p> <p>Résister aux flux hydrauliques (100) Limiter les flux d'infiltration provenant de la crue Résister aux pressions hydromécaniques de la crue</p> <p>Résister aux sollicitations mécaniques (101) Résister aux pressions mécaniques des autres composants urbains Résister aux endommagements dus aux chocs des embâcles Résister aux déformations du trottoir</p> <p>Permettre le bon fonctionnement des autres composants urbains (102) Assurer la circulation protégée des flux</p>	<p>La fonction</p> <p>La fonction</p> <p>La fonction</p> <p>La fonction</p>	<p>Détérioration signalisation Problème électrique</p> <p>Mauvaise état de la signalisation Très fort débit hydraulique (crue éclair) Mauvaise ancrage au sol</p> <p>Charriage d'éléments grossiers Déformation surface contact au sol Effondrement d'un élément voisin</p> <p>Problème de circulation</p>	<p>Problème de circulation</p> <p>Détérioration signalisation Problème électrique</p> <p>Détérioration signalisation Problème électrique</p> <p>Problème sécurité des personnes</p>
	Pont	<p>Assurer la continuité du service (103) Permettre le transport des flux d'une rive à l'autre</p> <p>Résister aux flux hydrauliques (104) Résister aux pressions hydromécaniques de la crue Eviter submersion</p> <p>Résister aux sollicitations mécaniques (105) Résister aux endommagements dus aux chocs des embâcles</p> <p>Permettre le bon fonctionnement des autres composants urbains (106) Assurer la circulation des flux entre deux rives</p>	<p>La fonction</p> <p>La fonction</p> <p>La fonction</p> <p>La fonction</p>	<p>Submersion des voies Endommagement des voies Encrassement de la voirie Cours d'eau en crue Fort débit Type et état de la voirie Type et état de la voirie Charriage d'éléments grossiers</p> <p>Perturbation circulation</p>	<p>Perturbation circulation Mise en danger des usagers</p> <p>Submersion des voies Endommagement des voies Encrassement de la voirie Endommagement des voies Encrassement de la voirie</p> <p>Perturbation activité économique Perturbation approvisionnement</p>

	Tunnel	<p>Assurer la continuité du service (107) Permettre le transport des flux</p> <p>Résister aux flux hydrauliques (108) Résister aux pressions hydromécaniques de la crue Eviter submersion</p> <p>Résister aux sollicitations mécaniques (109) Résister aux endommagements dus aux chocs des embâcles</p> <p>Permettre le bon fonctionnement des autres composants urbains (110) Assurer la circulation (les échanges) de flux</p>	<p>La fonction</p> <p>La fonction</p> <p>La fonction</p> <p>La fonction</p>	<p>Submersion des voies Endommagement des voies Encrassement de la voirie Type et état de la voirie Point bas/cuvette Débordement réseau assainissement</p> <p>Type et état de la voirie Charriage d'éléments grossiers Effondrement d'un élément voisin</p> <p>Perturbation circulation</p>	<p>Perturbation circulation Mise en danger des usagers</p> <p>Submersion des voies Endommagement des voies Encrassement de la voirie</p> <p>Endommagement des voies Encrassement de la voirie</p> <p>Perturbation activité économique Perturbation approvisionnement</p>
	Voie ferrée	<p>Assurer la continuité du service (111) Permettre le transport des flux</p> <p>Résister aux flux hydrauliques (112) Résister aux pressions hydromécaniques de la crue Eviter submersion</p> <p>Résister aux sollicitations mécaniques (113) Résister aux endommagements dus aux chocs des embâcles Résister aux pressions mécaniques des autres composants urbains</p> <p>Permettre le bon fonctionnement des autres composants urbains (114) Assurer la circulation (les échanges) des flux</p>	<p>La fonction</p> <p>La fonction</p> <p>La fonction</p> <p>La fonction</p>	<p>Submersion des voies Endommagement des voies Obstacles Fort débit Voirie en zone inondable</p> <p>Type et état de la voie Déstabilisation des pylônes Charriage d'éléments grossiers</p> <p>Perturbation circulation</p>	<p>Perturbation circulation Mise en danger des usagers</p> <p>Submersion des voies Endommagement des voies</p> <p>Endommagement des voies Obstacles</p> <p>Perturbation activité économique Perturbation approvisionnement Perturbation de la vie des usagers</p>

	Gare	<p>Assurer la continuité du service (115) Permettre le transport des flux Permettre la distribution des flux</p> <p>Résister aux flux hydrauliques (116) Résister aux pressions hydromécaniques de la crue Limiter les flux d'infiltration provenant de la crue</p> <p>Résister aux sollicitations mécaniques (117) Résister aux endommagements dus aux chocs des embâcles Résister aux pressions mécaniques des autres composants urbains</p> <p>Permettre le bon fonctionnement des autres composants urbains (118) Assurer l'interface avec les autres composants urbains</p>	<p>La fonction</p> <p>La fonction</p> <p>La fonction</p> <p>La fonction</p>	<p>Inondation de la gare Endommagement de la gare Problème électrique</p> <p>Débit trop fort Pénétration d'eau dans la gare Gare en zone inondable</p> <p>Charriage d'éléments grossiers Effondrement d'un élément voisin</p> <p>Perturbation circulation</p>	<p>Perturbation circulation Mise en danger des usagers</p> <p>Inondation de la gare Endommagement de la gare Problème électrique</p> <p>Endommagement de la gare</p> <p>Perturbation activité économique Perturbation approvisionnement Perturbation de la vie des usagers</p>
	Poste d'aiguillage	<p>Assurer la continuité du service (119) Permettre le transport des flux</p> <p>Résister aux flux hydrauliques (120) Résister aux pressions hydromécaniques de la crue Limiter les flux d'infiltration provenant de la crue</p> <p>Résister aux sollicitations mécaniques (121) Résister aux endommagements dus aux chocs des embâcles Résister aux pressions mécaniques des autres composants urbains</p>	<p>La fonction</p> <p>La fonction</p> <p>La fonction</p>	<p>Infiltration dans le poste Endommagement du poste</p> <p>Ennoiement du poste Fort débit</p> <p>Charriage d'éléments grossiers Déformation surface contact au sol</p>	<p>Perturbation circulation</p> <p>Infiltration dans le poste Endommagement du poste</p> <p>Endommagement du poste</p>

	Pylône	<p>Assurer la continuité du service (122) Permettre le transport d'électricité Assurer le support des câbles</p> <p>Résister aux flux hydrauliques (123) Résister aux pressions hydromécaniques de la crue</p> <p>Résister aux sollicitations mécaniques (124) Résister aux endommagements dus aux chocs des embâcles Résister aux pressions mécaniques des autres composants urbains</p>	<p>La fonction Chute ou inclinaison du pylône</p> <p>La fonction Détérioration du pylône Très fort débit hydraulique (crue éclair) Mauvaise ancrage au sol</p> <p>La fonction Charriage d'éléments grossiers Déformation surface contact au sol Effondrement d'un élément voisin</p>	<p>Perturbation alimentation électrique Mise en danger des usagers</p> <p>Chute ou inclinaison du pylône</p> <p>Détérioration du pylône Chute ou inclinaison du pylône</p>
	Caténaire	<p>Assurer la continuité du service (125) Assurer la distribution d'électricité</p> <p>Résister aux sollicitations mécaniques (126) Résister aux pressions mécaniques du pylône</p>	<p>La fonction Arrachement des câbles Détérioration des caténaires</p> <p>La fonction Chute d'arbre ou d'autres éléments Chute ou inclinaison du pylône</p>	<p>Perturbation alimentation électrique train</p> <p>Arrachement des câbles Détérioration des caténaires</p>
	Station électrique	<p>Assurer la continuité du service (127) Permettre le transport d'électricité Permettre la distribution d'électricité Fournir de l'énergie</p> <p>Résister aux flux hydrauliques (128) Limiter les flux d'infiltration provenant de la crue Résister aux pressions hydromécaniques de la crue Eviter submersion</p> <p>Résister aux sollicitations mécaniques (129) Résister aux endommagements dus aux chocs des embâcles Résister aux pressions mécaniques des autres composants urbains</p>	<p>La fonction Infiltration dans la station Endommagement de la station Problème alimentation</p> <p>La fonction Problème étanchéité Localisation (hauteur) de la station</p> <p>La fonction Charriage d'éléments grossiers Déformation surface contact au sol</p>	<p>Problème alimentation électrique gare Problème alimentation électrique train</p> <p>Infiltration dans la station Endommagement de la station Ennoisement de la station</p> <p>Endommagement de la station</p>

Eléments statistiques concernant les scénarios

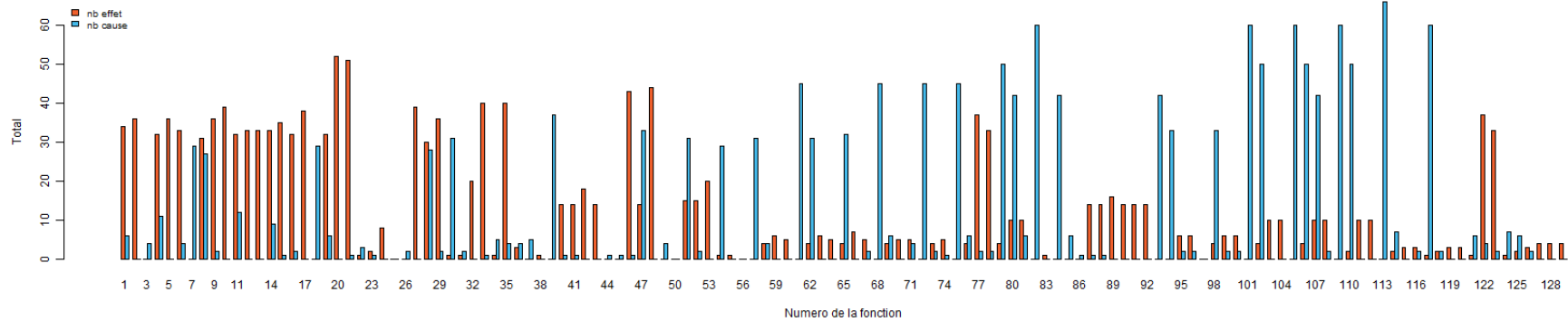


Figure A2.12 : Statique concernant le nombre de scénarios par fonction. En orange le nombre de scénarios de défaillances dont une fonction peut être à l’origine. En bleu le nombre de scénarios de défaillances dont une fonction peut être soumise.

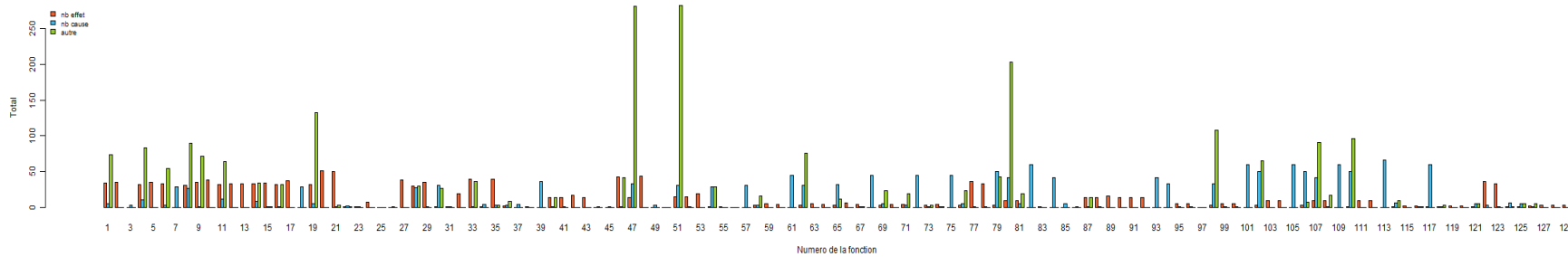


Figure A2.13 : Statique concernant le nombre de scénarios par fonction. En orange le nombre de scénarios de défaillances dont une fonction est à l’origine. En bleu le nombre de scénarios de défaillances dont une fonction est soumise. En vert le nombre de scénarios où une fonction joue un « rôle intermédiaire ».

ANNEXE 3

COMPLEMENTS SUR LE PROTOTYPE

WEB-SIG

Il a été fait référence dans le chapitre 8 à différents diagrammes qui n'ont pu être tous présentés dans le corps du texte. Il s'agit ici de les y faire figurer.

Les diagrammes FAST

Différents diagrammes FAST (*Function Analysis System Technique*) ont été réalisés afin d'élaborer les fonctions techniques permettant de répondre aux fonctions de service définies. Ce diagramme permet une traduction rigoureuse de chaque fonction de service en différentes fonctions techniques. Ainsi, un diagramme FAST permet de rechercher un maximum de solutions technologiques devant satisfaire les fonctions du système étudié. Trois diagrammes FAST ont été réalisés pour chacune des trois fonctions principales : utiliser les données des collectivités (Fig. 8.4) ; incorporer la méthodologie d'étude de la résilience (Fig. A3.1) ; communiquer les résultats (Fig. A3.2).

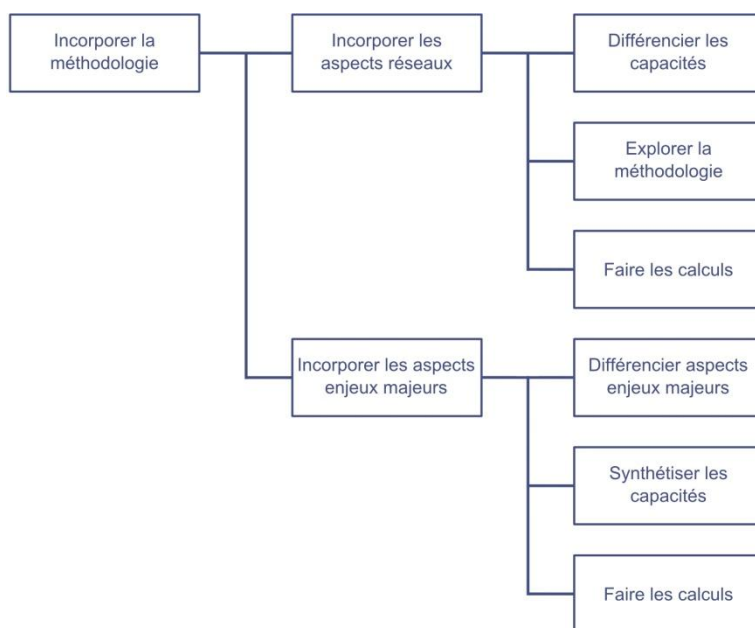


Figure A3.1 : Diagramme FAST pour la fonction principale « incorporer la méthodologie d'analyse de la résilience urbaine ».

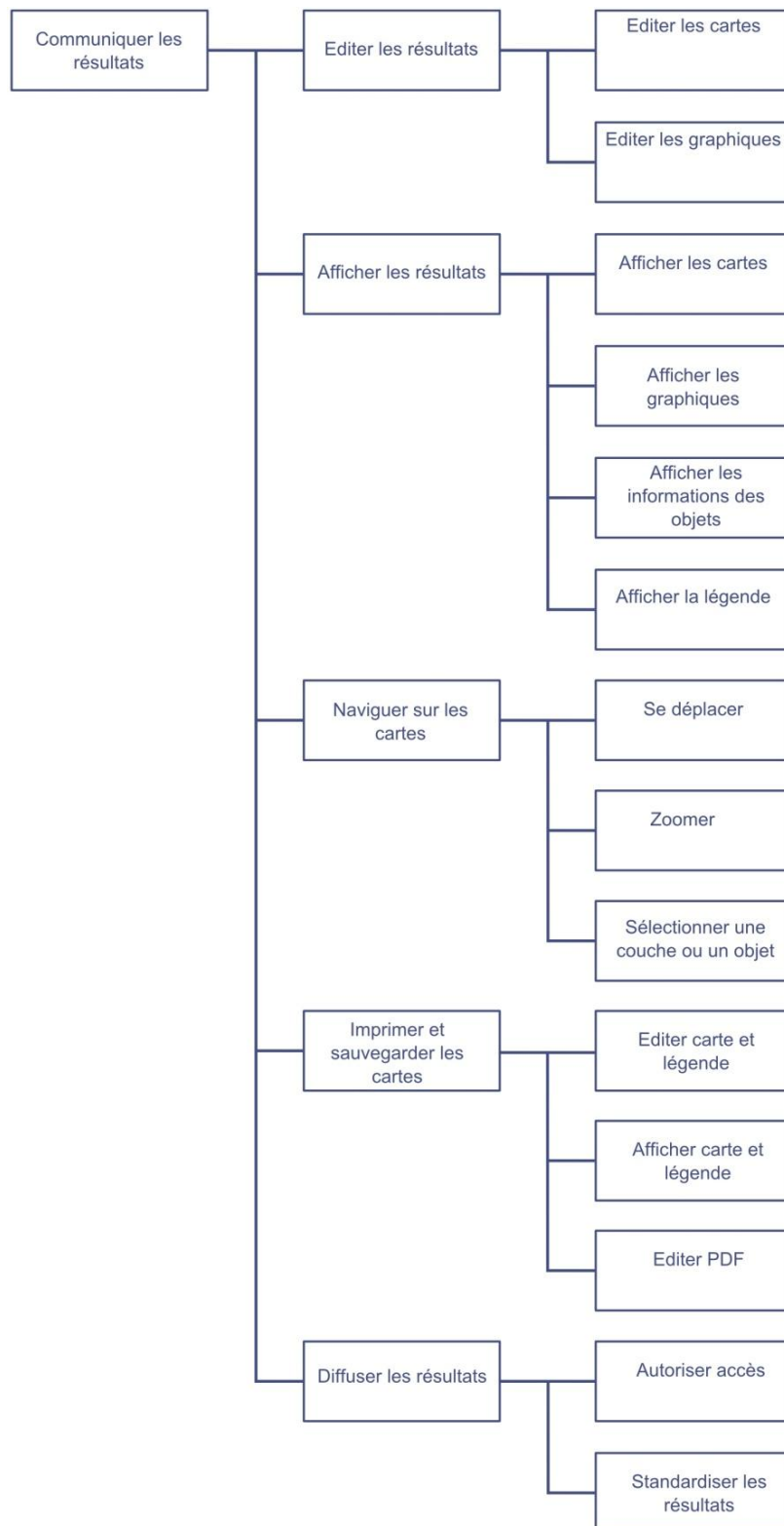


Figure A3.2 : Diagramme FAST pour la fonction principale « communiquer les résultats ».

Les diagrammes de cas d'utilisation

La modélisation des traitements a pour finalité de représenter la dynamique du système d'information, c'est-à-dire de représenter l'enchaînement des traitements réalisés par ce système. Ces traitements sont alors déclenchés par des événements. Dans cette recherche, chaque capacité a fait l'objet d'un modèle conceptuel de traitement. Ces modèles sont simplement exprimés ici sous la forme de diagrammes de cas d'utilisation (Fig. 8.6) (Fig. A3.3) (Fig. A3.4).

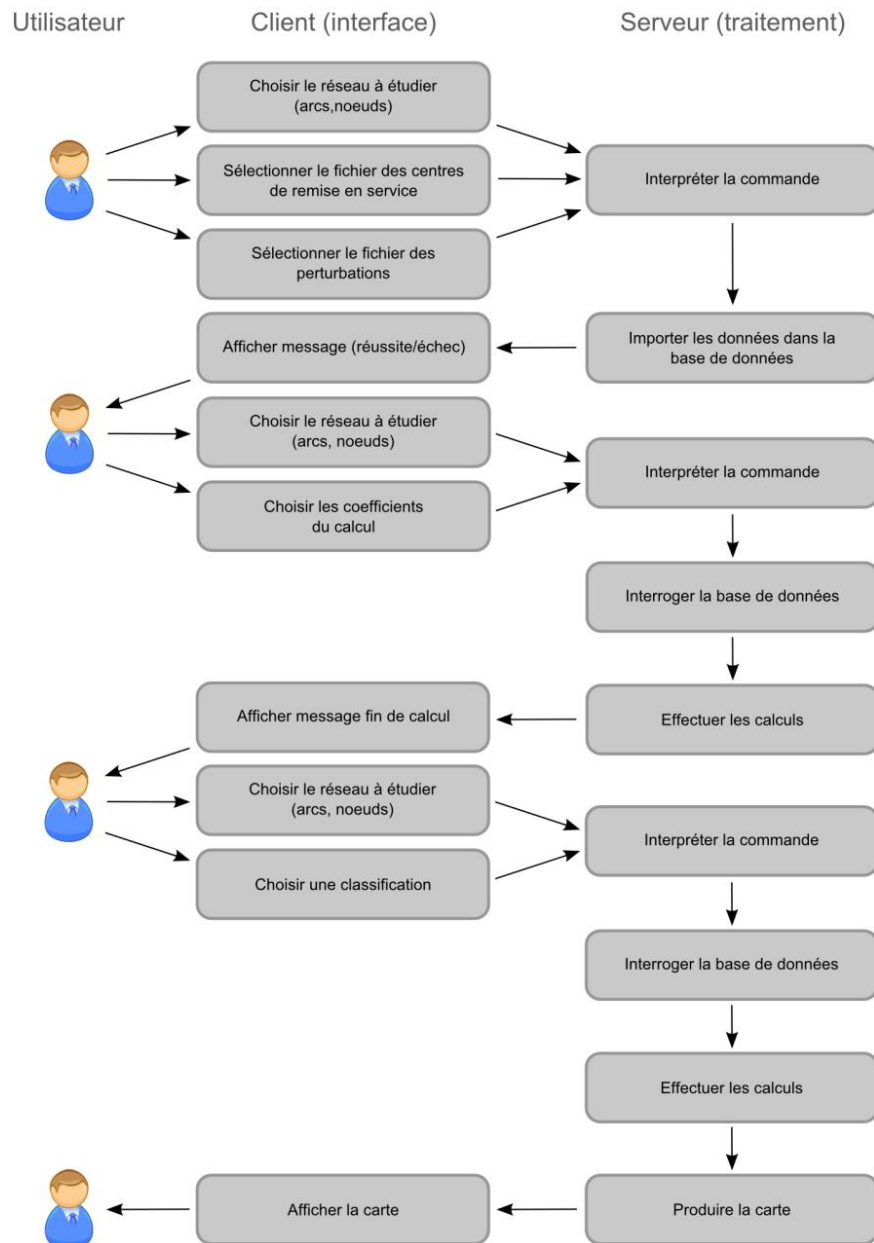


Figure A3.3 : Diagramme des cas d'utilisation concernant la capacité de récupération

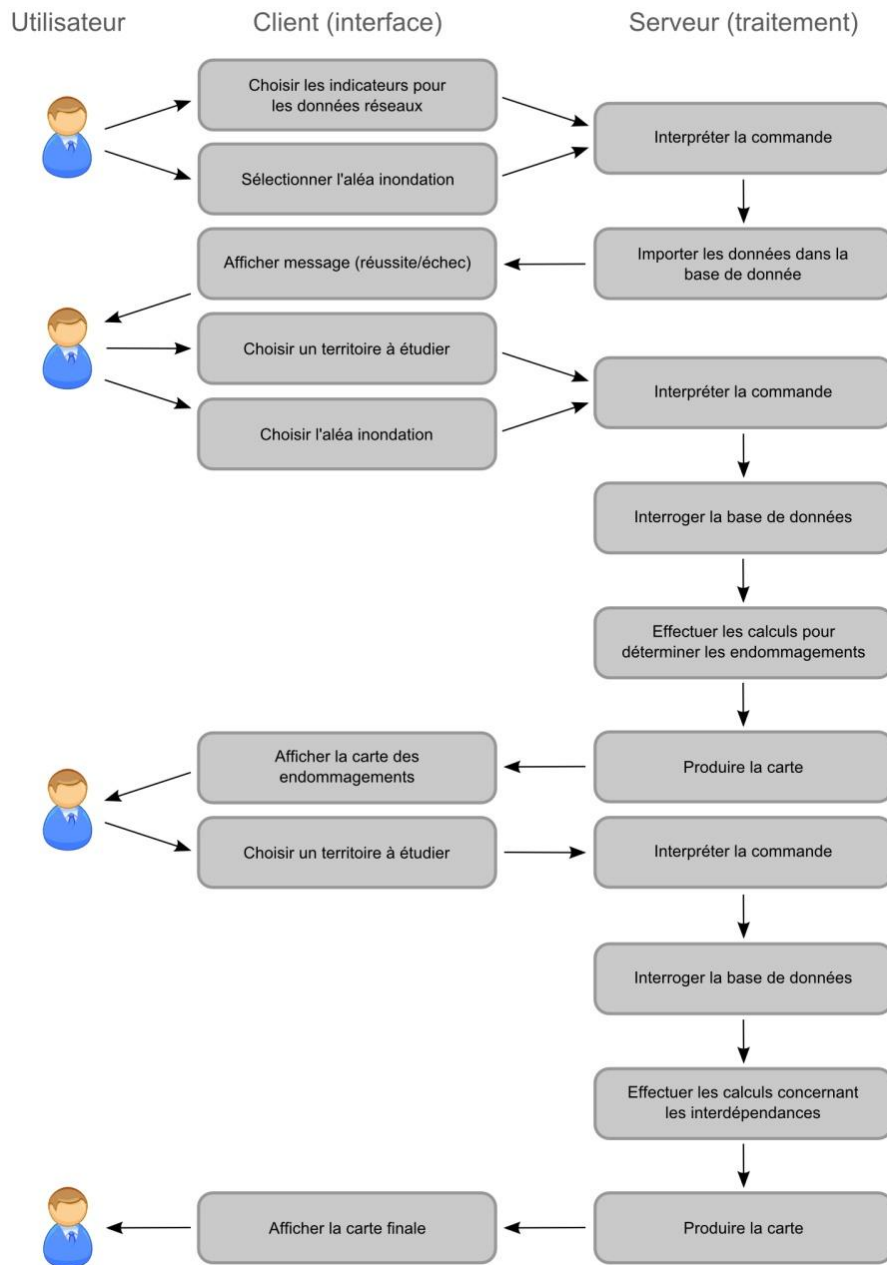


Figure A3.4 : Diagramme des cas d'utilisation concernant la capacité de résistance

Choix des solutions techniques

Chaque fonction technique a fait l'objet de recherches afin d'identifier les meilleures solutions technique. Certaines solutions ont été présentées dans le corps du texte. Voici, celles qui manquent.

Fonctions de service	Fonctions techniques	Solutions techniques
Incorporer les aspects enjeux majeurs	Différencier ces aspects	Interface HTML
	Synthétiser les capacités	PHP
	Faire les calculs	PHP
Editer les résultats	Editer les cartes	Mapserver
	Editer les graphiques	Google Chart
Afficher les résultats	Afficher les cartes	OpenLayers
	Afficher les graphiques	Google Chart/Javascript
	Afficher les informations des objets sélectionnés	OpenLayers/Mapserver
	Afficher la légende	MapServer/Javascript
Naviguer sur la carte	Se déplacer	OpenLayers
	Zoomer	OpenLayers
Imprimer/Sauvegarder les résultats	Editer les cartes et leur légende	Mapserver
	Afficher cartes et leur légende	Javascript/HTML
	Imprimer PDF	PDFCreator
Diffuser les résultats	Autoriser la diffusion	PHP
	Standardiser les résultats	OGC (WFS)

Tableau A3.1 : Suite du tableau concernant les choix des solutions techniques.